

COLECCIÓN
Naturaleza

Los páramos del Ecuador

Pasado, presente y futuro

Editores

Robert Hofstede

Patricio Mena-Vásquez

Esteban Suárez Robalino



USFQ
PRESS

Los páramos del Ecuador

Pasado, presente y futuro

Editores

Robert Hofstede

Patricio Mena-Vásquez

Esteban Suárez Robalino

USFQ PRESS

Universidad San Francisco de Quito USFQ
Campus Cumbayá USFQ, Quito 170901, Ecuador.
<https://usfqpress.com/>

Somos la casa editorial de la Universidad San Francisco de Quito USFQ. Fomentamos la misión de la universidad al divulgar el conocimiento para formar, educar, investigar y servir a la comunidad dentro de la filosofía de las Artes Liberales.

Los páramos del Ecuador: Pasado, presente y futuro

Autores: Robert Hofstede^{1,2}, Patricio Mena-Vásconez^{3,4}, Esteban Suárez Robalino¹, Fernando Anaguano-Yanchar⁵, Karla Beltrán Valenzuela⁶, Ross Borja⁷, Josselin Caiza⁸, Marlon Calispa⁹, Rolando Céleri Alvear¹⁰, Segundo Chimbolema¹, Patricio Crespo Sánchez¹⁰, Sisimac A. Duchicela¹¹, Emilie Dupuits¹, Andrea C. Encalada¹, David A. Espinel Ortiz¹², Marcelo Guamán Hidalgo¹³, Bryan A. Idrovo-Torres⁵, Ricardo Jaramillo¹⁴, Luis Daniel Llambi¹⁵, Fausto V. López Rodríguez¹⁶, Rossana Manosalvas^{3,4}, Giovanni M. Mosquera¹, Priscilla Muriel Mera¹⁷, Ana E. Ochoa Sánchez¹⁸, Pedro J. Oyarzún⁶, Myriam Paredes¹⁹, Aura Paucar Cabrera²⁰, Gabriela Pazmiño²¹, Manuel Peralvo²², Juan P. Pesántez Vallejo⁹, Mónica Ribadeneira Sarmiento²³, Diego Riveros-Iregui²⁴, Chaquira Romolero¹⁷, Katya Romolero¹⁷, Daniela Rosero-López¹, Yerka Sagredo⁶, Pablo Samaniego Eguiguren²⁵, Santiago D. Santamaría Freire²⁶, Tatiana Santander García^{27,28}, María Claudia Segovia²¹, Steven G. Sherwood¹⁷, Petr Sklenář²⁹, Carmen Ulloa Ulloa³⁰, Francisco J. Vásconez Paredes³¹, Galo Zapata Ríos³

¹Universidad San Francisco de Quito USFQ, Quito, Ecuador; ²Corporación Ecopar, Quito, Ecuador; ³EcoCiencia, Quito, Ecuador; ⁴Wageningen University & Research, Wageningen, Países Bajos; ⁵Wildlife Conservation Society, Quito, Ecuador; ⁶Investigador independiente; ⁷EkoRural, Quito, Ecuador; ⁸Colaboradora externa, Comunidad EcoCentro, EMGIRS-EP, Quito, Ecuador; ⁹Université Catholique de Louvain, Louvain, Bélgica; ¹⁰Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador; ¹¹University of California, Riverside, EE.UU.; ¹²Sociedad Ecuatoriana de Biología, Quito, Ecuador; ¹³Universidad de Las Américas, Quito, Ecuador; ¹⁴Michigan Technological University, Michigan, EE.UU.; ¹⁵Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela; ¹⁶Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador; ¹⁷Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador; ¹⁸Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador; ¹⁹Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, FLACSO, Quito, Ecuador; ²⁰Museo de Zoología LOUNAZ, Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador; ²¹Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Quito, Ecuador; ²²Consortio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina-CONDESAN, Quito, Ecuador; ²³Alliance for Water Stewardship-AWS, North Berwick, Escocia; ²⁴University of North Carolina at Chapel Hill, EE. UU.; ²⁵Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo-IRD, Quito, Ecuador; ²⁶Instituto de Investigación Geológica y Energética, Quito, Ecuador; ²⁷Aves y Conservación, Quito, Ecuador; ²⁸BirdLife International, Quito, Ecuador; ²⁹Universita Karlova, Praga, República Checa; ³⁰Missouri Botanical Garden, St. Louis, EE. UU.; ³¹Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

Esta obra fue publicada luego de un proceso de revisión por pares (*peer-review*), con la participación de los siguientes revisores: Brigitte Baptiste (Universidad EAN, Bogotá, Colombia), Henrik Baslev (Aarhus University, Aarhus, Dinamarca) y Galo Medina (The Nature Conservancy Quito, Ecuador).

Esta publicación fue apoyada con financiamiento del Instituto Biosfera USFQ y el programa *Conservando nuestras fuentes de agua: los páramos de Ecuador (Iniciativa Páramos)*, una alianza entre Produbanco y Conservación Internacional Ecuador para impulsar la conservación de este ecosistema andino de enorme importancia para la protección y regulación de los recursos hídricos en nuestro país.

Editores: Robert Hofstede, Patricio Mena-Vásconez y Esteban Suárez Robalino

Producción editorial: Andrea Naranjo y Diego F. Cisneros-Heredia

Editor de la colección Naturaleza: Diego F. Cisneros-Heredia

Diseño y diagramación de cubierta e interiores: Krushenka Bayas

Diseño de mapas: Emilia Peñaherrera-Romero y Diego F. Cisneros-Heredia

Fotografía de la cubierta: Jorge J. Anhalzer

Corrección profesional: Elizabeth Salgado

© Hofstede, Mena-Vásconez, Suárez Robalino, et al. 2023

© De esta edición USFQ PRESS, Universidad San Francisco de Quito USFQ, 2023

© De la fotografía de cubierta, Jorge J. Anhalzer, 2023

El texto de esta obra se publica bajo una licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0. Esta licencia no aplica a las figuras, las cuales mantienen sus propios derechos de autor y licencias y su reproducción debe ser autorizada por cada autor respectivo.

ISBN: 978-9978-68-264-7

ISBNe: 978-9978-68-265-4

Primera edición: junio, 2023

Tiraje: 300 ejemplares

Impreso en Ecuador por Imprenta Mariscal, Quito-Printed in Ecuador

Catalogación en la fuente Biblioteca de la Universidad San Francisco de Quito USFQ.

Los páramos del Ecuador : pasado, presente y futuro / editores: Robert Hofstede, Patricio Mena-Vásconez, Esteban Suárez Robalino ; [autores, Robert Hofstede ... [y otros]]. – Quito : USFQ Press, ©2023. 443 p. : il. ; 16,5 x 24 cm.

ISBN: 978-9978-68-264-7
ISBNe: 978-9978-68-265-4

1. Páramos – Ecuador. – 2. Ecología de páramos. – I. Hofstede, Robert, ed. y aut. – II. Mena-Vásconez, Patricio, ed. y aut. – III. Suárez Robalino, Esteban, ed. y aut.

CLC: GB628.36 .P37 2023
CDD: 577.687

OBI-172

Se sugiere citar esta obra de la siguiente forma:

Hofstede, R., Mena-Vásconez, P. y Suárez Robalino, E. (Eds.) (2023). *Los páramos del Ecuador: Pasado, presente y futuro*. USFQ PRESS.

Se sugiere citar cada capítulo de la siguiente forma (ejemplo):

Manosalvas, R., Dupuits, E. y Mena-Vásconez, P. (2023). Historia, realidad social y resistencias territoriales contemporáneas en los páramos ecuatorianos. En R. Hofstede, P. Mena-Vásconez y E. Suárez, (Eds.), *Los páramos del Ecuador: Pasado, presente y futuro* (pp. 218-245). USFQ PRESS.

El uso de nombres descriptivos generales, nombres comerciales, marcas registradas, etcétera, en esta publicación no implica, incluso en ausencia de una declaración específica, que estos nombres están exentos de las leyes y reglamentos de protección pertinentes y, por tanto, libres para su uso general.

La información presentada en este libro es de entera responsabilidad de sus autores. USFQ PRESS presume que la información es verdadera y exacta a la fecha de publicación. Ni la USFQ PRESS ni los editores dan una garantía, expresa o implícita, con respecto a los materiales contenidos en este documento ni de los errores u omisiones que se hayan podido realizar.

Los páramos del Ecuador

Pasado, presente y futuro

Editores

Robert Hofstede

Patricio Mena-Vásquez

Esteban Suárez Robalino



A scenic landscape photograph of a lake with mossy islands and a small building in the distance. The water is dark blue and reflects the sky. The islands are covered in vibrant green moss. The hills in the background are covered in dry grass and some green patches. A small, dark building is visible on the far shore. The sky is blue with scattered white clouds.

—CONTENIDO

Fotografía: Esteban Suárez Robalino

Presentación	10
Agradecimientos	12
Capítulo 1	
Introducción: ¿De qué hablamos al hablar de páramos?	14
Una conceptualización básica	18
Extensión y distribución de los páramos en el Ecuador	26
La estructura del libro	33
Capítulo 2	
Los suelos de los páramos del Ecuador	40
Introducción	44
¿Cómo influye el volcanismo en la formación de los suelos en el páramo ecuatoriano?	44
Fenómenos volcánicos asociados a la formación de suelo en el páramo ecuatoriano	48
Los suelos de los páramos	51
El proceso de formación de los suelos volcánicos	64
Distribución espacial de los suelos volcánicos en los páramos ecuatorianos ...	66
Factores que amenazan a los suelos de los páramos	72
Perspectivas y vacíos de investigación	74
Capítulo 3	
Hidrología de los páramos en el Ecuador	76
Introducción	81
Procesos y variables hidrológicas	83
Generación de caudal	90
Calidad química del agua	98
Conclusiones y principales vacíos de conocimiento	101

Capítulo 4

La flora de los páramos ecuatorianos: orígenes, diversidad y endemismo	104
Introducción	108
Reseña de los orígenes y la evolución de la flora del páramo	108
Tipos de vegetación y diversidad florística	109
Páramos septentrionales vs. páramos australes	115
Diversidad de las especies de plantas vasculares registradas en el páramo	115
Endemismo	118
Plantas invasoras que amenazan la vegetación nativa del páramo	121
Conclusiones	123

Capítulo 5

La fauna de los páramos ecuatorianos: riqueza, endemismo, adaptaciones y amenazas	126
Introducción	130
Insectos	131
Peces	133
Anfibios	136
Reptiles	138
Aves	139
Mamíferos	142
Adaptaciones de la fauna silvestre a los ambientes extremos de los páramos	148
Impactos de las actividades humanas en la fauna de los páramos	149
Conclusiones.....	153

Capítulo 6

Ecología de los páramos del Ecuador:

un paisaje altoandino integrado por múltiples ecosistemas.....	154
Introducción	158
Los pajonales de páramo en el Ecuador.....	159
Estructura y funcionamiento de las turberas de páramo en los Andes ecuatorianos	164
Los bosques altoandinos: ecología y conservación de bosques de <i>Polylepis</i> y <i>Cynoxys</i>	168
<i>Treelines</i> : ecología y dinámica del ecotono entre bosques andinos y páramos	172
Ecología y dinámica de comunidades en superpáramos y zonas de retroceso glacial	175
La interfase entre los ecosistemas terrestres y los ecosistemas acuáticos	182
Conclusiones	186

Capítulo 7

El páramo ecuatoriano: la ley que tenemos y la que

deberíamos tener	188
Introducción	192
Generalidades legales	192
Los páramos y la ley que tenemos	194
Discusión sobre el Régimen Legal	209
Los páramos y la ley que deberíamos tener.....	213
Comentario final	216
Agradecimientos	216

Capítulo 8

Historia, realidad social y resistencias territoriales

contemporáneas en los páramos ecuatorianos	218
Introducción	222
La historia socioambiental de los páramos ecuatorianos	224
El rol del Estado en el páramo a nivel nacional y subnacional	230
Pueblos indígenas, campesinas y campesinos como guardianes del páramo	236
Nuevos actores privados en el páramo: la minería y la floricultura	241
Conclusiones: el futuro de los páramos como territorios sicionaturales	244

Capítulo 9

Agricultura y páramos en el centro-norte del Ecuador

Agricultura y páramos en el centro-norte del Ecuador	246
Introducción	251
Los páramos andinos	252
La modernización del sector rural: la reforma agraria y la tecnificación agropecuaria	256
Tendencias de la degradación ambiental en la frontera agrícola-páramo	269
Reflexiones finales	276

Capítulo 10

La minería en los páramos del Ecuador

La minería en los páramos del Ecuador situación actual y futura	282
Introducción	286
La actividad minera en el Ecuador	288
La actividad minera en los páramos	293
Conclusiones y perspectivas	299

Capítulo 11

La infraestructura en los páramos ecuatorianos	302
Introducción.....	306
La infraestructura en el páramo	306
Infraestructura de aprovechamiento y uso de agua.....	312
Infraestructura de comunicación y producción.....	319
Infraestructura para el turismo y la recreación.....	321
Desafíos y oportunidades relacionados con la infraestructura en el páramo	322

Capítulo 12

El cambio climático en el páramo del Ecuador	324
La problemática general del cambio climático en el páramo	328
Escenarios de cambio climático en el páramo	329
El impacto del cambio climático en el páramo y sus funciones ecosistémicas ..	331
Adaptación al cambio climático	347
Mitigación del cambio climático	351
Conclusiones	352

Capítulo 13

Conclusión: lo bueno, lo malo y lo feo en los páramos del Ecuador	354
Una nueva fotografía del páramo	356
Lo bueno	356
Lo malo: amenazas a la integridad ecológica y social de los páramos	366
Lo feo: hay muchas buenas iniciativas y capacidades institucionales, pero falta su coordinación	369
Consideraciones finales: un futuro incierto, pero con esperanza	374

Editores	376
Autores, autoras	378
Referencias	397



— PRESENTACIÓN

El Ecuador es un país privilegiado. Un territorio pequeño que en el concierto mundial alberga una enorme cantidad de especies de plantas y animales. Con toda razón, está incluido en la lista de países megadiversos y, entre estos, somos el país con mayor biodiversidad por unidad de área. Esta diversidad no solo se manifiesta en las especies, pues en ecosistemas también tenemos un arcoíris que incluye, entre muchos, bosques húmedos tropicales en Esmeraldas y la Amazonía; zonas áridas en las Galápagos y en Manabí; bosques nublados a lo largo de los flancos de la cordillera; y, por supuesto, el objeto central de este libro: los páramos en las partes más altas de nuestras montañas.

Las razones de esta variedad casi infinita de seres vivos y ecosistemas están, entre otras cosas, en la posición ecuatorial del territorio patrio y en la existencia de corrientes marinas frías y cálidas frente a nuestras costas. Pero la razón más poderosa es que nuestro país está cruzado por los Andes, la cordillera más larga del globo. Precisamente son estas montañas las que, al elevarse poco a poco, fueron creando las condiciones ambientales para que se desarrollara este paisaje tan propio de nuestra geografía y nuestra cultura.

Los páramos no son únicos solamente por sus condiciones geográficas y su biodiversidad; también son un paisaje que ha coevolucionado con las culturas andinas. Gracias a sus dimensiones ambientales y culturales, los páramos son el socioecosistema por excelencia que brinda un espacio de vida armónica para flora, fauna y comunidades humanas.

El Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), como la autoridad ambiental del Ecuador, siempre ha visto en los páramos un elemento fundamental del quehacer institucional. Las razones para que sea así deben quedar claras al revisar el contenido de esta obra que presentamos. Esto se demuestra, por ejemplo, en que el Sistema Nacional de Áreas Protegidas —administrado por el MAATE— incluye un sinnúmero de parques y reservas que salvaguardan porciones importantes de páramos. Todas las grandes elevaciones del país, incluyendo sus páramos, corresponden a una de estas áreas protegidas, como en el caso de Cotacachi, Cayambe, Cotopaxi, Ilinizas, Sangay y Chimborazo. Otras,



Fotografía: Patricio Mena-Vásquez

como Podocarpus, El Ángel, Llanganates y Cajas, son sitios icónicos por derecho propio. En años recientes, el país ha promovido otras formas de conservación, como son las Áreas de Protección Hídrica, las Áreas de Conservación y Uso Sostenible y los predios protegidos como parte del Programa Socio Bosque. Esto es porque estas áreas propician la inclusión de la sociedad en su manejo y son ideales para la conservación de muchas zonas de páramo importantes por los servicios y beneficios que generan.

El MAATE ha puesto su interés profundo en el capítulo normativo inherente a estos ecosistemas tropicales de altura y, por ello, está elaborando el Plan de Acción Nacional para la Conservación, Restauración y Uso Sostenible de los Páramos. Aparte de su obvio valor intrínseco, esta obra es entendida como un insumo importante para el Plan de Acción, de modo que este se base en la información más completa y actualizada posible sobre el ecosistema.

Confiamos en que no solo la comunidad académica y científica —representada aquí por un conjunto sobresaliente de especialistas en los distintos temas tratados— sino todos quienes están interesados desde puntos de vista de conservación, manejo y uso sustentable del páramo, encuentren en este libro una fuente de información y un estímulo a la discusión, el debate y la toma de decisiones. Esto es particularmente cierto en tiempos tan desafiantes como los que vivimos en las primeras décadas del siglo XXII, cuando el cambio climático ha agravado la crisis socioambiental que ha ido desarrollándose desde hace siglos y frente a la cual la sociedad deberá adaptarse para que las generaciones venideras sigan disfrutando de beneficios tan diversos e importantes como los que nos entregan los páramos.

Invito a que analicen y disfruten de esta obra insignia del ecosistema páramo. Sin duda, es una muestra de que la conservación tiene rostro humano.

José Antonio Dávalos Hernández

Ministro del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador

A photograph of a sunset over a mountain range. The sun is a bright, glowing orb on the right side of the frame, partially obscured by the silhouette of a mountain peak. The sky is filled with soft, colorful clouds in shades of orange, red, and purple. The foreground shows the dark silhouettes of other mountain peaks and a small structure on the right.

— AGRADECIMIENTOS

Hacer un libro de esta naturaleza requiere de la colaboración desinteresada de un sinnúmero de personas e instituciones y, así, esta lista podría ser muy larga. Por ello, empezamos pidiendo disculpas si se nos escapa algún nombre.

Como editores, agradecemos infinitamente a todas las personas que escribieron los capítulos temáticos que componen el libro y participaron del proceso de revisión interna, y que en varios casos también colaboraron con fotografías y gráficos de elaboración propia. En todos los casos ha sido gente que aceptó sin compromisos y sin condiciones la invitación a que se incorporara a este mosaico tan diverso como los páramos mismos. Nos sentimos honrados y orgullosos de haber logrado integrar un equipo transdisciplinario de mujeres y hombres de varias latitudes, disciplinas y generaciones, con trayectorias sobresalientes y, más que nada, con un amor y una entrega al páramo que trascienden las palabras. La lista antes de las referencias al final del libro presenta sus datos biográficos y de contacto.

También reconocemos la valiosísima participación de Brigitte Baptiste (Universidad EAN, Colombia), Henrik Balslev (Universidad de Aarhus, Dinamarca) y Galo Medina (The Nature Conservancy, Ecuador), tres personas profundamente arraigadas en el páramo, quienes, también de manera desprendida, prestaron su tiempo y conocimiento para analizar el libro dentro del proceso de aprobación editorial. Leah Bremer y David Thomas fueron muy amables y eficientes en la revisión de las traducciones al inglés de los resúmenes, así como María Victoria Arbeláez en la organización de las referencias.

Muchas gracias a la Dirección de Información Ambiental y del Agua del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) por su sustancial aporte con datos geográficos del páramo y por la anuencia para usar las referencias de los mapas que se incluyen en los Capítulos 1, 8 y 13. Los editores también agradecen al MAATE por la posibilidad de conectar esta obra con el importante proceso de elaboración del Plan de Acción Nacional para la Conservación, Restauración y Uso Sostenible de los Páramos, que brinda un contexto estratégico y político altamente relevante para nuestro trabajo.



Fotografía: Patricio Mena-Vásconez

Agradecemos a las personas que han proporcionado fotografías para esta publicación y han autorizado su uso o han colaborado en su localización, con mención especial para Jorge Juan Anhalzer, Pablo Corral Vega, Marcela García, Gustavo Morejón, Cecilia Puertas, Andrés Vallejo, Javier Vázquez y Juan Carlos Veloz.

El programa *Conservando nuestras fuentes de agua: los páramos de Ecuador (Iniciativa Páramos)*, una alianza entre PRODUBANCO y Conservación Internacional Ecuador para impulsar la conservación del ecosistema andino, apoyó sustancialmente la publicación de este libro.

La Universidad San Francisco de Quito USFQ ha sido un aliado clave en la elaboración de esta obra. Su Instituto Biósfera apoyó con el espacio para las reuniones y financió parte de la publicación. La editorial de la Universidad (USFQ PRESS) produjo y financió parte del libro en sus versiones física y electrónica.

—CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN: ¿DE QUÉ HABLAMOS AL HABLAR DE PÁRAMOS?

Patricio Mena-Vásquez | Robert Hofstede | Esteban Suárez Robalino

Páramos de Quimsacocha, Azuay.
Fotografía: Gustavo Morejón



Para quienes habitamos en el norte de los Andes, los paisajes de páramo son una constante que —inclusive de manera inadvertida— condiciona y da forma a nuestra vida. Desde el clima que experimentamos y el carácter del paisaje que nos rodea, hasta el agua y los alimentos que consumimos, la vida en esta región está permanentemente influida por los páramos.

Pero estos han cambiado mucho en los últimos tiempos. De un lado, el paisaje mismo se ha transformado. Pero la modificación más llamativa se ha dado en la percepción que tanto la academia como la sociedad en general tienen del bioma. ¿Cómo, por qué y con qué consecuencias se han producido estas transformaciones?

Hace 22 años se publicó un libro que tenía como meta presentar la situación de los páramos en el Ecuador en ese momento. Era una época en que este ecosistema salía de pasar casi desapercibido a entrar al centro de la atención; ese libro (Mena-Vásquez et al., 2001) fue parte de esta explosión de interés. En esas épocas, el Proyecto Páramo¹ generó, entre otros productos, la publicación *Los páramos del Ecuador - Particularidades, problemas y perspectivas*, lanzada con la Editorial Abya Yala.

El subtítulo de aquel libro se refería precisamente a la intención de presentar las características biofísicas y sociales, analizar los conflictos históricos y contemporáneos, y discutir sobre el futuro de un ecosistema que había ido cobrando importancia. En efecto, había pasado de ser visto mayormente como algo frío y lejano —con cierto magnetismo solo para la ecología, la sociología y el turismo— a ser considerado fundamental para el desarrollo mismo del país, especialmente porque en esas tierras altas se recoge y distribuye el agua que sirve pendiente abajo a millones de personas para beber, regar y generar electricidad. La conflictiva historia humana y las asimétricas relaciones que se habían establecido entre quienes están en el páramo mismo y quienes lo usan indirectamente aguas abajo, también fue cobrando una importancia gravitante.

En las últimas dos décadas han existido varias iniciativas para su conservación y uso sostenible en todo el país (Capítulo 13). Esto incluye grandes proyectos regionales ejecutados entre varios países andinos, así como proyectos nacionales y locales en áreas específicas. También incluye el surgimiento de fondos de agua y el programa Socio Bosque que dan apoyo directo a la conservación de los páramos. Aumentó el conocimiento, generado por decenas de universidades y centros de investigación, lo que ha sido la base para la aplicación de mejores prácticas de uso de la tierra y manejo de los recursos naturales.

¹ Un proyecto en el Ecuador coordinado por la Universidad de Ámsterdam y ejecutado en conjunto con EcoCiencia y el Instituto de Montaña entre 1998 y 2002, con fondos del gobierno de los Países Bajos.

Pero el contexto político, institucional, económico y social ha cambiado también a un ritmo acelerado. La preocupación sobre los riesgos de cambio climático o sobre la disponibilidad de agua es generalizada y ha resultado en mayor atención pública a los temas ambientales. Tenemos una constitución que declara a los páramos como ecosistema frágil y brinda derechos a la naturaleza. A la vez, la economía rural está en constante cambio y vivimos diferentes olas de migración (temporal y permanente). En medio de todos estos cambios están y se mantienen el páramo y sus habitantes: flora, fauna y, por supuesto, las familias campesinas que viven en este entorno.

Tomando como punto de partida la información y el contexto que se describió en el libro de 2001, en el presente volumen ofrecemos un nuevo ejercicio de recopilación y análisis acerca de un ecosistema que no ha dejado de cambiar en estas dos décadas. Pero ¿desde qué puntos de vista se pueden analizar estas posibles evoluciones e involuciones? En los siguientes capítulos se encuentra una revisión de los elementos más relevantes sobre el páramo en el Ecuador. No necesariamente se hace en todos los casos una comparación estricta con la publicación señalada, que tiene su propia estructura y lógica, pero sí se presentan los datos más recientes y sobresalientes.

La selección de los tópicos para esta nueva publicación, más allá de las obvias categorías gruesas, ha sido un tanto compleja por varias razones. Una fundamental es que el páramo es un concepto polisémico que va más allá de la clásica diferencia entre la definición de diccionario (lugar yermo desprovisto de árboles, basado en ciertos paisajes castellanos) y la realidad mucho más compleja del ecosistema tropical andino (Suárez et al., 2022b). Para un campesino, una botánica, un manejador de áreas protegidas, una alcaldesa, un caminante de las montañas, una ingeniera agrónoma, un hidrólogo, una abogada, un antropólogo o una persona que jamás ha estado en un páramo, este representa cosas diferentes, a veces incluso opuestas. Si se encuentran datos o cifras, no se diga opiniones, no siempre iguales o concordantes a lo largo del libro, esto no debería verse como una falla en la información o una falta de coherencia, sino como una manifestación de la complejidad en el análisis de los páramos.

Citando la publicación de 2001, “el concepto ‘páramo’ es tan complejo que es difícil definirlo. El páramo es un ecosistema, un bioma, un paisaje, un área geográfica, una zona de vida, un espacio de producción e inclusive un estado del clima”. Incluimos ahora que el páramo es un territorio en disputa y un elemento fundamental de la cultura y la historia de mucha gente. Creemos que parte de la riqueza del libro estará precisamente en presentar no solo conocimientos, sino posiciones, todo lo cual enriquecerá las discusiones y las perspectivas.

Finalmente, ¿es posible generar un libro sobre algo tan aparentemente diverso en términos conceptuales y epistemológicos? La respuesta es sí. Para lograrlo, hemos comenzado aceptando esa diversidad y la hemos incorporado en los análisis de la manera más coherente posible. No pretendemos generar un retrato universal y axiomático de páramo que le calza a todo el mundo y, por lo tanto, se vuelve difuso y superficial. De hecho, en el desarrollo del libro y en otras iniciativas similares no han sido escasas las discusiones acerca de qué exactamente estamos analizando y, entre otras cosas, acerca de la necesidad de mantenernos científicamente ‘neutrales’ o, por el contrario, incorporar discusiones de índole política e ideológica. Creemos que esa dualidad, que podemos llamar positivista/constructivista, no es mutuamente excluyente; más bien, se pueden generar cosas coherentes, como pretende ser este libro, sin tomar partido por una u otra posición. Si bien esta publicación tiene como objetivo presentar los datos más relevantes y actualizados para fomentar una toma de decisiones informada y consensuada, también quiere alimentar un agudo debate transdisciplinario.

Otro objetivo de este libro es brindar un contexto de conocimiento actualizado para el desarrollo de la política pública sobre los páramos. En mayo del 2021, la Asamblea Nacional declaró el 23 de junio como Día Nacional de los Páramos. Esta resolución legislativa, entre otras cosas, invita al MAATE a que elabore el Plan de Acción Nacional para la Conservación, Restauración y Uso Sostenible de los Páramos. El presente libro ha sido generado en paralelo con el desarrollo de este plan y funciona como un diagnóstico del conocimiento actualizado y como una línea base sobre la cual se desarrollan las diferentes líneas de acción del plan.

Una conceptualización básica

Si bien consideramos que el páramo es diverso en términos conceptuales y epistemológicos, sí parece necesario contar con una base sólida que, sin pretender ser una camisa de fuerza, marque una cancha extensa y dinámica en la que se pueden desplegar las distintas informaciones, hipótesis, percepciones y posiciones. Ahora, tampoco es que no exista —de manera casi intuitiva— un núcleo que permita que se hable de ‘páramo’ entre gente muy diversa. Alrededor de ese núcleo es que hemos generado —de la manera más participativa y consensual posible— el enfoque y el temario de la obra.

Entonces, dentro de lo analizado en los párrafos anteriores, parece indispensable definir de entrada por lo menos algunas nociones fundamentales que aparecen en varios capítulos y que deben mantener la mayor coherencia posible, nuevamente, sin querer homogeneizar los conceptos de manera forzada. Más

bien, se trata de tener esta base incluso para, de ser necesario, contrastarla con otras definiciones o datos que se usen en los diferentes capítulos.

Los páramos en el mundo

La definición clásica del páramo como ecosistema planetario —un bioma— es que se encuentra solamente a grandes altitudes en las regiones cercanas a la línea ecuatorial en Sudamérica. Aceptando esas dos condiciones fundamentales (gran altitud en tierras ecuatoriales), los páramos se encuentran en Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú (Hofstede et al., 2003). En Venezuela están en la porción andina del país, es decir, en la región occidental, mientras que en el Perú solamente se hallan en la parte norte, aproximadamente hasta Cajamarca, donde también se llaman jalcas. Hacia el sur, en los Andes se desarrolla un ecosistema cercano, pero más seco y con mayor estacionalidad, la puna, compartido especialmente con Bolivia, Argentina y Chile. En los Andes de Colombia y Ecuador, el páramo está en todas las cordilleras; en Colombia se halla, además, en la aislada Sierra Nevada de Santa Marta y en el Ecuador en un volcán aislado en la Amazonía, el Sumaco. También hay pequeñas extensiones de páramo en la zona montañosa transfronteriza de Costa Rica y Panamá. Más al norte en Mesoamérica, el paisaje de páramo da lugar a los zacatonales. Estos son ecosistemas con paisajes montañosos parecidos a ciertos pajonales andinos, pero en tierras subtropicales ya bastante alejadas de la línea ecuatorial y, por lo tanto, con un régimen meteorológico diferente. Algo parecido sucede en algunos de los grandes volcanes de Hawái.

Fuera de este núcleo de páramos en el neotrópico, existen ecosistemas en otros sitios del globo donde también se encuentran esos dos factores básicos: gran altitud y situación ecuatorial. Aunque no se han llamado tradicionalmente 'páramos', se va desarrollando una aceptación a usar el término para todos estos ecosistemas a escala global. En el África oriental ecuatorial existen grandes montañas, como el Kilimanjaro, el Monte Kenia y los volcanes de Virunga, que claramente cumplen con estas características. Los países que tienen 'páramos' en el África (llamados técnicamente el cinturón afroalpino; Hedberg y Hedberg 1979; Mena-Vásquez y Balslev, 1986) son Tanzania, Kenia, Etiopía y Uganda. Otro lugar en el planeta con ecosistemas equivalentes es Papúa Nueva Guinea, donde también hay altas montañas cercanas a la línea ecuatorial (Figura 1.1). Sin embargo, como se muestra, es importante notar que, más allá de unas similitudes generales de la fisonomía de la flora, estos ambientes de alta montaña tropical en el mundo son estructuralmente complejos y han sido formados por diferentes historias evolutivas y biogeográficas. Las descripciones detalladas de

todos estos ecosistemas parameros se pueden encontrar en la publicación *Los páramos del mundo* (Hofstede et al., 2003).



Figura 1.1 Localización aproximada del bioma páramo en el mundo (en celeste): los páramos de los Andes tropicales de América, el cinturón afroalpino de las montañas tropicales del oriente de África y los ecosistemas alpinos de Papúa Nueva Guinea en Oceanía

Los páramos en el Ecuador



Figura 1.2 Ilustración en Juan y Ulloa (1748). Nótense los pajonales en las partes altas de las montañas y varios nombres de plantas y animales relacionados con el páramo como quinual (*Polylepis*), achupalla (*Puya*), palo de luz (*Chuquiraga*), llama (*Lama*) y danta (*Tapirus*), aparte de otros relacionados con los bosques y los valles andinos. Fuente: dominio público, disponible en <https://www.biodiversitylibrary.org/page/57777469#page/11/mode/lup>

A pesar de que está bastante claro a qué nos referimos con páramos y aquellos ecosistemas equivalentes a escala global, es bastante notorio el que no haya una definición de alguna manera oficial de lo que son los páramos en el Ecuador. Ni la Constitución, ni el Código Orgánico del Ambiente, ni la Política de Ecosistemas Andinos incluyen una enunciación clara, como se expone aquí en el Capítulo 7.

En términos de la mención de los páramos como ecosistemas, y de su inclusión en una clasificación ecosistémica, esto ha sucedido ya desde al menos los tiempos de los exploradores y científicos españoles Jorge Juan (1713-1773) y Antonio de Ulloa (1716-1795). El libro *Relacion historica del viage a la America Meridional* alude en numerosas ocasiones a los páramos (Juan y Ulloa, 1748). Allí se encuentra lo que podría ser la primera ilustración científica de los Andes ecuatorianos; en ella se incluyen los páramos (Figura 1.2).

El polímata prusiano Alexander von Humboldt (1769-1859) es otro pionero en la investigación paramera que caminó sobre las huellas de Jorge Juan y Antonio de Ulloa. Si bien su acepción de 'páramos' se refiere más al clima que a la vegetación, esto dice el sabio prusiano, en coautoría con el naturalista francés Aimé Bonpland (1773-1858), en su *Ensayo sobre la geografía de las plantas* (Humboldt y Bonpland 1805 (2009)):

El clima de estas regiones, frío pero constantemente húmedo, llamado páramos por los nativos, produce arbustos cuyos troncos cortos y cubiertos de carbón se dividen en multitud de ramas cubiertas de hojas verdes duras y brillantes. En estas elevaciones pueden crecer algunas quinquinas anaranjadas.

Aún más arriba, a 3500 metros (1796 toesas), los árboles dejan de crecer, como dije anteriormente. Solo en el volcán Pichincha, en un valle estrecho que baja del Guagua Pichincha, hemos descubierto un grupo de [*singenêses en arbre*], con troncos de 7 u 8 metros de altura (21 o 24 pies). De 2000 metros a 4100 metros (1026 a 2103 toesas), esta es la región de las plantas alpinas [...] Molina son arbustos más pequeños que encontramos a su mayor altitud en el volcán Puracé, cerca de Popayán, y en el volcán Antisana.

A los 4100 metros de altitud, las plantas alpinas dejan paso a las gramíneas, cuya región se extiende hasta los 4600 metros. *Jarava*, *Stipa*, una multitud de nuevas especies de *Panicum*, *Agrostis*, *Avena* y *Dactylis* cubren el suelo. Desde lejos parece una alfombra dorada, llamada por los habitantes de la región pajonal. De vez en cuando cae nieve en esta región.

En el siglo XX y primeros años del siglo XXI se desarrollaron los sistemas de clasificación ecosistémica de Acosta Solís (1968), Harling (1979), Cañadas (1983), Sierra (1999) y Josse et al. (2003, 2008), cada uno con mayor detalle y marcando avances tecnológicos notables; todos incluyen varias categorías que entran en la definición general de 'páramo', a veces con nombres técnicos que se alejan mucho del nombre vernáculo, pero que demuestran la diversidad interna dentro de las definiciones generales que se pueden hacer. Ya en este siglo, Beltrán et al. (2009) hicieron una descripción detallada de la distribución espacial, los sistemas ecológicos y la caracterización florística de los páramos en el Ecuador.

Aunque tradicionalmente el páramo ha sido considerado una unidad ecosistémica neotropical altoandina, en realidad se trata de un paisaje compuesto por varios ecosistemas que interactúan entre el límite superior de la línea de bosque hasta la cima de las montañas o el límite inferior de los glaciares, donde estos están presentes. Esta diversidad ecosistémica incluye a diferentes tipos de vegetación como pajonales, bosques de páramo y matorrales en el ecotono con el bosque andino, superpáramo en el límite superior, humedales y ecosistemas acuáticos (Hofstede et al., 2003; Buytaert et al., 2006a; Luteyn, 1999).

El sistema de clasificación ecológica más reciente es el del MAE (2014): *Sistema de clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental*. Este incluye la Región Andes, dentro de ella está la Provincia Andes del Norte, y allí se dice lo siguiente sobre el Sector Biogeográfico Páramo:

Se distribuye en un callejón casi ininterrumpido sobre la línea de bosque de las cordilleras Oriental y Occidental de los Andes sobre los 3700 y 3400 m s. n. m. respectivamente ubicándose originalmente en los pisos montano alto superior y subnival y excepcionalmente en el piso montano alto, es así como en el sur del país se encuentra desde los 2800 m s. n. m. Se estima que los ecosistemas de este sector ocupan un área total de 14876 km² (5,94 % del territorio nacional). En este sector predominan los ombrotipos húmedos a ultrahúmedos, termotipos orotropical y criotropical; y en base a la respuesta de flora se distinguen la vegetación zonal y azonal, esta última se encuentra relacionada a condiciones edáficas o microclimáticas locales como aquellas que se desarrollan en zonas anegadas (MAE 2014: 131).

El Sector Páramo incluye 11 grandes tipos de ecosistemas principalmente definidos por las características de sus asociaciones vegetales (Anexo 1.1 y Capítulo 4).

Aunque esta clasificación es valiosa desde el punto de vista de la descripción de la distribución y diversidad de formaciones vegetales, su aplicación para el manejo y monitoreo del paisaje del páramo es limitada porque la diferenciación tipológica no es fácil en el campo si las personas que la usan carecen de experiencia y conocimientos ecológicos avanzados.

Algunas peculiaridades de los páramos en el Ecuador

La clasificación de páramos según el MAE (2014) incluye dos tipos generales: aquellos que están en el norte y centro —que empiezan en la vertiente oriental a los 3700 m y en la occidental a los 3400 m—, y los páramos del sur, que empiezan a los 2800 m. Como se explica en el Capítulo 2, esta separación tiene que ver con la geología y la geomorfología; el límite generalmente se establece en el nudo del Azuay, que es el límite entre las cuencas del río Chanchán al norte y el río Cañar al sur.

El que se usen números redondos para estas altitudes referenciales ya nos hace pensar que son precisamente eso: indicaciones para poder definir de manera más o menos clara los límites entre ecosistemas y usos sobre el terreno, pero de ninguna manera son límites absolutos que se cumplen siempre y a rajatabla. Un ejemplo claro es la cordillera Oriental en donde los páramos empiezan, teóricamente, a los 3700 m, por la gran cantidad de humedad de la región amazónica, que permite la subida de bosque a altitudes mayores. Sin embargo, hay dos consideraciones: la primera es que, nuevamente, los 3700 es una referencia y si uno va al campo en el Cayambe, el Antisana, el Cotopaxi y el Sangay, por ejemplo, estas altitudes variarían. Segundo, no es lo mismo hacia la vertiente amazónica de la cordillera Oriental que hacia la vertiente interandina hacia el occidente.

Un caso representativo, pero no raro, es el que se evidencia en los páramos al oriente de Guamote en la provincia de Chimborazo. Al subir desde la carretera Panamericana en la parte baja del callejón hacia el oriente, el páramo (pajonal y arbustos, mayormente) aparece aproximadamente a los 3400 m, pero, si pasamos al otro lado, ya en la vertiente oriental, a esa misma altura se encuentra un bosque andino tupido y muy diferente al páramo del otro flanco de la montaña.

Esto hace pensar que las diferencias de humedad, y posiblemente las de otras variables biofísicas, ya se sienten sobre la misma cordillera. Sin embargo, también nos lleva a considerar que el uso humano ha sido diferente a uno y otro lado del paso, ya que en la vertiente interandina las actividades de pastoreo y agrícolas han sido tradicionalmente más intensas. En varias zonas ha

habido un proceso de paramización de los ecosistemas más boscosos de tierras más bajas: por desaparición del bosque, el área estaba expuesta al viento y las heladas, y empezó a ser colonizado por vegetación de páramo que es más adaptada a estas condiciones. Naturalmente, con el tiempo esa área volvería a regenerarse en un bosque, pero muchas veces no ocurría porque la gente solía quemar el pajonal, limitando así la regeneración de especies leñosas típicas de un bosque. De esta manera, en algunos sitios el ecosistema páramo efectivamente empieza en límites altitudinales inferiores a los teóricamente naturales. En pocas palabras, hay que considerar que el paisaje actual del páramo es un sistema de ecosistemas interconectados en un intrincado mosaico que ha sido cincelado por la naturaleza y la sociedad, y que las definiciones estrictas de las variables siempre van a ser más relacionales e hipotéticas que descriptivas y exactas (véase también el Capítulo 6).

Otra particularidad es que hay muchos tipos de páramos más allá de los que comúnmente se toman en cuenta (pajonal, turberas, parches de bosque, frailejonales y tal vez alguno más). Esta diversidad se manifiesta no solamente en términos biofísicos (meteorológicos, edafológicos, biogeográficos), sino también en aspectos funcionales. Las turberas de páramo y las zonas periglaciares, por ejemplo, tienen procesos ecológicos completamente diferentes a los de los páramos de pajonal, por las condiciones de inundación y anoxia del suelo, en el primer caso, y por el exiguo desarrollo edafológico, en el segundo. De igual manera, estas diferencias se manifiestan a lo largo de gradientes de precipitación desde los páramos superhúmedos de la vertiente amazónica de la cordillera Oriental, hasta los páramos áridos, comparables hasta cierto punto con las punas del sur, en sitios como los arenales del Chimborazo (Capítulo 6).

La fisionomía y diversidad de los páramos ecuatorianos también están moldeadas por los patrones biogeográficos. Por ejemplo, los frailejones (*Espeletia* spp.) son un grupo de plantas con una gran diversidad en Colombia y Venezuela, donde tienen su centro de radiación y desde donde han ido ocupando nuevos territorios hacia el sur (Mavarez 2019). Su distribución termina en el norte del Ecuador (Carchi, Sucumbíos e Imbabura), aunque existe una pequeña población disyunta en el Parque Llanganates en el centro del país, cuya presencia sigue buscando explicación (Vargas et al., 2000; Hofstede et al., 2014). Por el contrario, en el sur del país, en los altos Andes de la provincia de Loja, existen plantas como la cucharilla (*Oreocallis grandiflora*) y las del género *Bejaria* que han llegado precisamente desde tierras australes y no se han extendido más al norte. De esta manera, las localidades de páramo tienen una mezcla de elementos florísticos de origen austral o meridional, de

acuerdo con su posición en la cordillera y con la extensión y orientación de sus gradientes de elevación.

Una singularidad de los páramos, relacionada tanto con los patrones biogeográficos como con las condiciones ambientales extremas, son los altos niveles de endemismo que se han reportado en varios grupos taxonómicos. La estructura de la cordillera de los Andes en el Ecuador se asemeja a un sistema insular en el que las cumbres más altas de los macizos están aisladas unas de otras por una matriz de territorios comparativamente bajos. El resultado de esta configuración es un aislamiento geográfico que, afectando particularmente a las especies con capacidades limitadas de dispersión, ha dado lugar a la diferenciación de muchas especies en las cumbres aisladas de varias montañas. Asimismo, las condiciones de bajas temperaturas, alta irradiación y fuertes vientos han causado que las especies en el páramo estén altamente adaptadas a este ambiente y ya no puedan crecer en otra altitud. Como resultado de estos patrones, para algunos grupos taxonómicos se han reportado niveles de endemismo de hasta 60 %; es decir, seis de cada 10 especies solamente se encuentran en páramos y no en otro paisaje. Es importante notar que, en este punto, nos referimos al endemismo biogeográfico; es decir, se trata de especies cuya distribución está restringida únicamente a un área pequeña con características ambientales particulares, y no al endemismo definido a partir de límites políticos, que muchas veces se utiliza para destacar la excepcionalidad de la diversidad de un país o de una región (véase, por ejemplo, Noguera-Urbano, 2017).

Extensión y distribución de los páramos en el Ecuador

Según la última revisión del MAATE, la extensión de páramos en el Ecuador suma 1,52 millones de hectáreas (Tabla 1.1). Esta estimación es mayor en publicaciones anteriores. Por ejemplo, Hofstede et al. (2003) mencionan 1,29 millones y el MAE (2014) 1,48 millones de hectáreas. Si bien puede parecer que ha aumentado la superficie de los páramos, es más probable que sea cuestión de una nueva interpretación de imágenes satelitales, incluyendo decisiones acerca de qué se debe considerar páramo y qué no. En este sentido, es ilustrativo lo que pasa con los páramos en Colombia (Hofstede et al., 2003): antes se manejaba el dato de que las superficies de Colombia y Ecuador eran muy similares (1,14 millones y 1,29 millones respectivamente), pero después de una cartografía detallada, asociada al proceso de delimitación de páramos en Colombia, ahora se considera que hay 2,91 millones de hectáreas. Este notable crecimiento en la

extensión del páramo resulta de una interpretación más amplia del ecosistema, el cual incluye ahora extensiones de bosque altoandino y de áreas transformadas (Rivera y Rodríguez, 2011). Peyre et al. (2021) compararon, recientemente, entre las superficies de páramo, usando una sola metodología para los cuatro países andinos con páramos, y consideran que Ecuador es el país que más páramo tiene (1,13 millones de hectáreas) seguido por Colombia (1,05 millones). En resumen, se puede decir que no existe un dato exacto de la superficie total de páramo en Ecuador ni en Colombia, pues los resultados dependen de la metodología usada para el mapeo y de la definición exacta del ecosistema.

Los páramos están en la mayoría de las provincias ecuatorianas. Si bien se considera un ecosistema particularmente serrano (todas las provincias andinas contienen al menos un tipo de páramo), el hecho es que muchas provincias orientales tienen grandes extensiones. De hecho, Napo es la provincia que más páramo tiene, seguida de Azuay, Chimborazo, Pichincha y Morona Santiago (otra provincia oriental). También las provincias costeras de Esmeraldas y El Oro tienen páramos. Esto no debería sorprender: muchas provincias tradicionalmente consideradas amazónicas o pacíficas tienen considerables porciones de su territorio en las partes más altas de las vertientes andinas al oriente y al occidente. La Tabla 1.1 presenta las extensiones y porcentajes de páramo por provincia; la Figura 1.3 presenta un mapa con la localización de los páramos en el país con relación a las provincias.

Tabla 1.1 Extensión total de páramos y porcentaje en las provincias del Ecuador que lo contienen.

Provincia	Extensión (hectáreas)	Porcentaje de Páramo
Napo	249 697	16,42 %
Azuay	213 664	14,05 %
Chimborazo	196 327	12,91 %
Pichincha	146 807	9,65 %
Morona Santiago	126 751	8,33 %
Cotopaxi	111 085	7,30 %
Cañar	97 477	6,41 %
Tungurahua	95 346	6,27 %
Zamora Chinchipe	73 530	4,83 %
Imbabura	61 561	4,05 %
Carchi	48 878	3,21 %
Loja	37 687	2,48 %
Bolívar	34 264	2,25 %
El Oro	15 660	1,03 %
Sucumbíos	12 249	0,81 %
Esmeraldas	166	0,01 %
Total	1 521 148	100 %

Fuente: MAATE, Estadísticas de Páramo (en línea)²

² MAATE. (2023). Estadísticas del páramo. Dirección de Información Ambiental y del Agua. ibit.ly/Haez

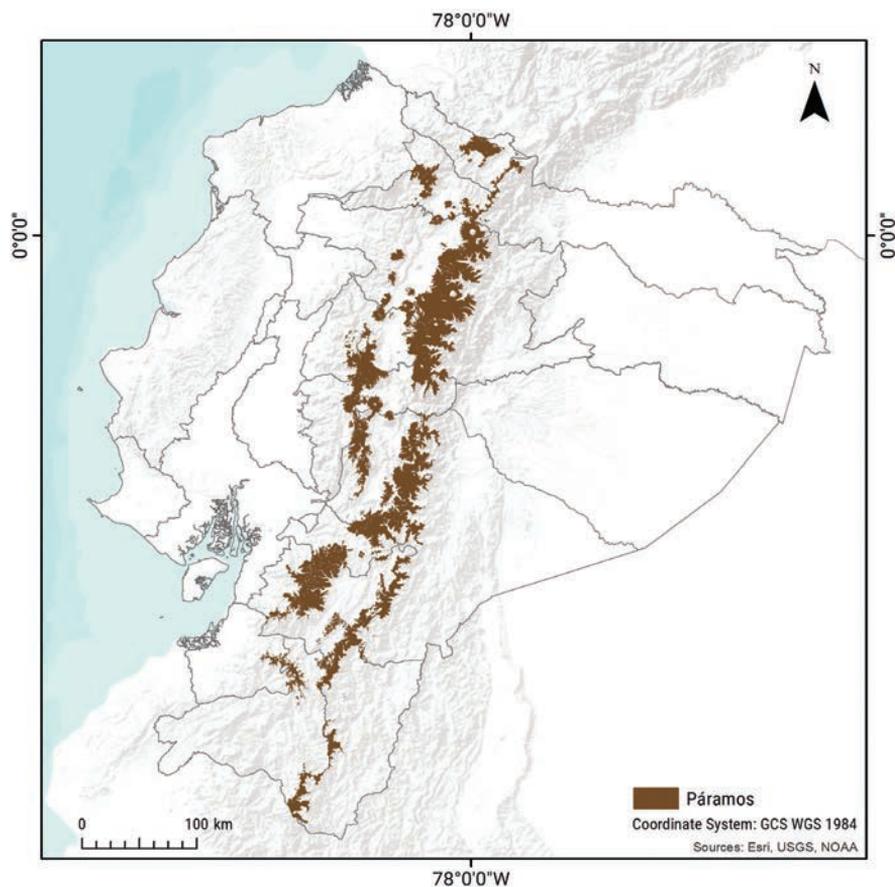


Figura 1.3 Los páramos y su localización en el Ecuador con relación a las provincias que los contienen. Fuente: Dirección de Información Ambiental y del Agua, MAATE

La Dirección de Información Ambiental y del Agua del MAATE monitorea cada dos años, desde 2014, la cobertura de páramo, utilizando una metodología constante. Por esto, se pueden calcular las tendencias de cambio (aumento y disminución) de páramo. Esto ha generado cifras relevantes que demuestra una tendencia de aumento de aproximadamente 5000 ha por año (Tabla 1.2). La mayoría del aumento (80–90 %), aparentemente se produce porque áreas agrícolas (cultivos, áreas sin cobertura, pastizales) o plantaciones forestales han sido abandonadas y luego ocupadas por pajonales, que es un cambio positivo. Otros aumentos de la superficie de páramo se dan porque áreas que fueron categorizadas antes por cuerpos de agua, glaciar o bosque, luego son categorizadas como páramo. Estos últimos cambios (Tabla 1.2) no son positivos porque son aparentemente producto de drenaje, desglaciación o deforestación.

La superficie de páramo que aumentó prácticamente se compensa por una misma superficie de disminución. Esta disminución presenta una tendencia decreciente: hubo mucho más cambio de páramo a otras coberturas de tierra entre 2014 y 2016 que en los años posteriores (Tabla 1.2 B). La disminución del páramo se da, principalmente, por cambio a áreas agrícolas (aproximadamente 70 %) y plantaciones forestales (4000 ha, solo en el periodo 2014-2016), lo que es considerado un cambio negativo. De otro lado, hay unos cambios a otras coberturas naturales de tierra (cuerpos de agua y bosques naturales, señalados en gris en la Tabla 1.2 B) que se pueden considerar positivos.

Si bien este ejercicio es ilustrativo, los autores de este capítulo recomiendan cuidado con su interpretación. El hecho de que diferentes personas hayan interpretado las imágenes, o de que las imágenes fueran de diferentes estaciones (húmedas o secas), puede causar errores. Tampoco se pueden sumar las áreas de cambio de cobertura de diferentes periodos porque los polígonos individuales no fueron monitoreados y es posible que un área que fue interpretada como 'bosque' en un periodo, fuera identificada como 'pajonal' en el segundo, y otra vez 'bosque' en el tercer periodo.

Tabla 1.2 Cambio (aumento o disminución de superficie, en hectáreas) de cobertura de páramo en tres periodos.

Aumento - De ... a páramo	2014-2016	2016-2018	2018-2020
Cuerpos de agua	1545	220	118
Glaciar	296	97	
Bosque natural			1113
Áreas agrícolas	6552	9192	8688
Plantaciones forestales	103	1439	41
Total aumento	8496	10 947	9959
Disminución - De páramo a...	2014-2016	2016-2018	2018-2020
Cuerpos de agua	283	107	716
Bosque natural			208
Áreas agrícolas	13 499	5925	2300
Plantaciones forestales	4006	2717	60
Áreas urbanas/infraestructura	138	61	8
Total disminución	17 926	8810	3292

Fuente: MAATE, DIAA

En términos de los diferentes tipos de páramo, como era de esperarse, el que está en más provincias es el que corresponde a la nomenclatura del MAE (2014) 'Herbazal del Páramo', el pajonal que generalmente se asocia con el páramo típico: está en 15 de las 16 provincias con páramo a lo largo de todo el país. Otros tipos son más restringidos, como los páramos arbustivos del sur, que están solo en dos provincias, y los frailejonales en el norte, también solo en dos provincias.

En términos de las provincias que más tipos de páramo tienen, hay varias en las que se encuentran ocho de los 11 tipos que presenta la clasificación del MAE (2014). Las provincias más diversas, en este sentido, son Napo, Bolívar, Pichincha y Tungurahua. Llama la atención que dos provincias pequeñas, y con una extensión relativamente reducida de páramos (Bolívar y Tungurahua), presentan este mosaico. Otras provincias diversas, con siete de los 11 tipos, son Chimborazo y Cotopaxi. Por otro lado, hay provincias que tienen pocos tipos de páramo, y en áreas muy restringidas, como en el caso de la provincia de Orellana y el especial páramo del volcán Sumaco, o las provincias australes de Loja y Zamora Chinchipe y sus particulares páramos arbustivos. La extensión de páramo en cada provincia de acuerdo con la última clasificación ecosistémica, se presenta en el Anexo 1.2. La Figura 1.4 muestra la extensión de los diferentes tipos de páramo de mayor a menor.

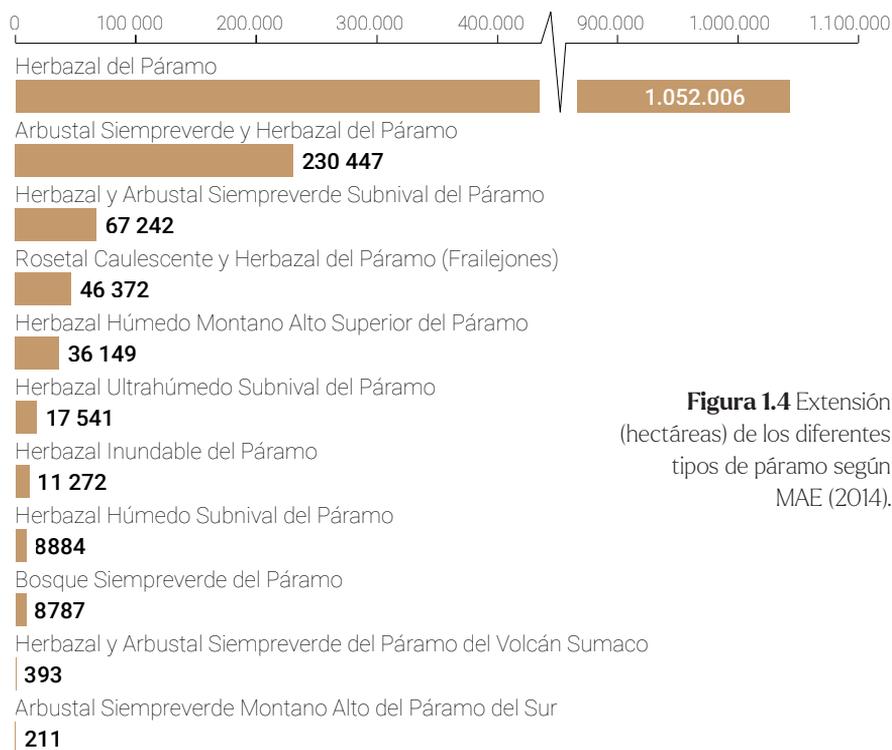


Figura 1.4 Extensión (hectáreas) de los diferentes tipos de páramo según MAE (2014).

Las provincias más parameras se pueden establecer comparando la extensión de los páramos con la extensión total de cada provincia (Figura 1.5). Cañar, Tungurahua y Chimborazo tienen el primer puesto con un tercio de sus territorios cubiertos por algún tipo de páramo. En los puestos finales, como se podría esperar, están Esmeraldas, El Oro y Orellana. La sorpresa puede estar en que provincias muy asociadas al páramo en el imaginario popular, como Bolívar, Imbabura y Carchi, no tienen porcentajes altos, pero esto se explica porque estas provincias tienen porciones considerables de su territorio en cotas de elevación inferiores. Nuevamente Napo, una provincia típicamente oriental y la que más páramo tiene en términos absolutos, presenta un quinto de su territorio cubierto por páramos.

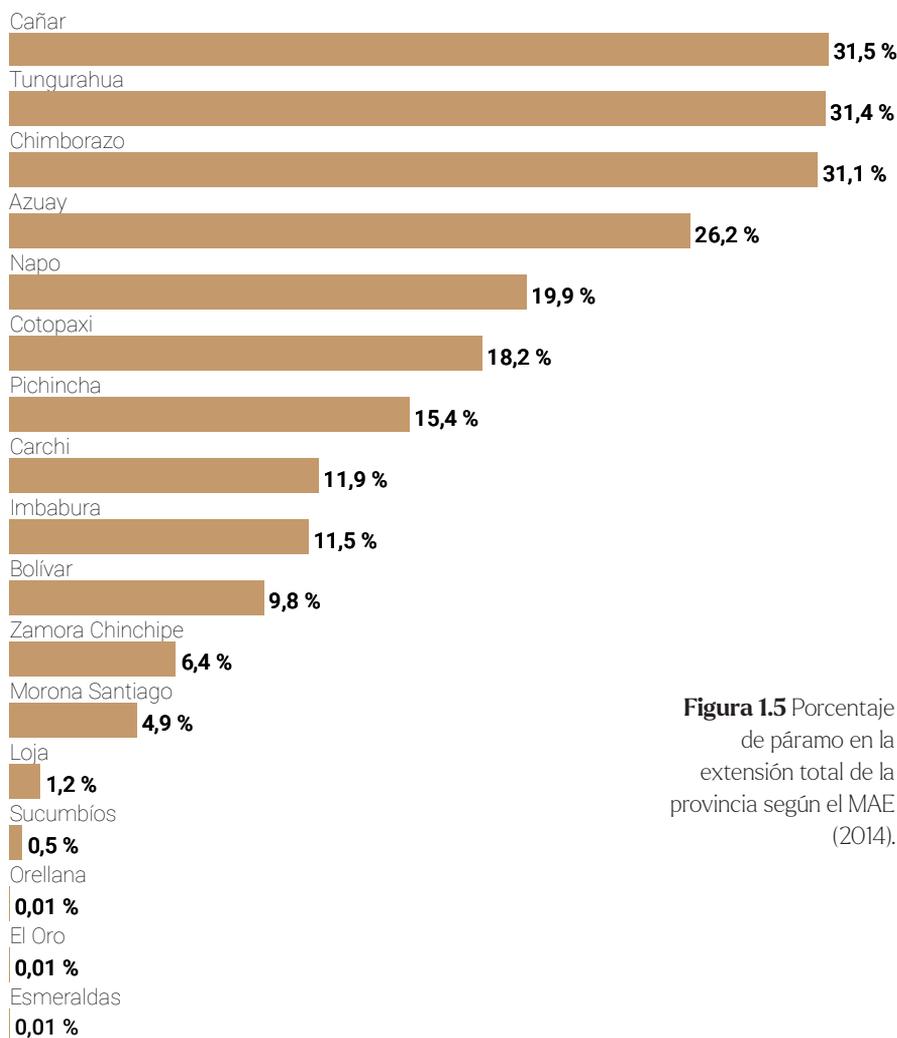


Figura 1.5 Porcentaje de páramo en la extensión total de la provincia según el MAE (2014).

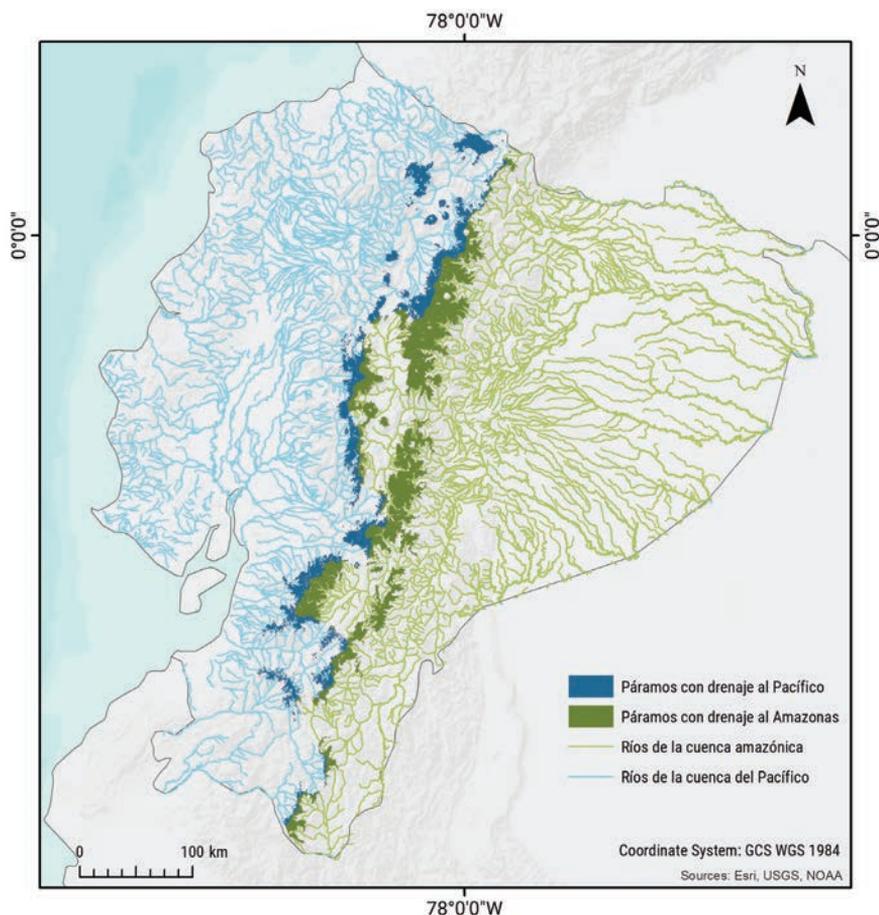


Figura 1.6 Cobertura nacional de páramos en relación con las cuencas hidrográficas mayores en el país. Fuente: Dirección de Información Ambiental y del Agua, MAATE

Los páramos son el origen de casi todo el sistema hídrico del Ecuador: las cuencas grandes del país nacen en el páramo y sus aguas se dirigen tanto al Pacífico (vía ríos como Esmeraldas, Mira, Guayas y Jubones) y a la Amazonía (vía ríos como Putumayo, Napo, Pastaza, Santiago y Chinchipe). En total, el 38 % de los páramos drenan al Pacífico y el 62 % a la Amazonía (Figura 1.6). Puede sorprender que no haya una correspondencia fuerte entre los páramos que están al occidente o al oriente y el destino principal de esas aguas. En general, las vertientes externas de las cordilleras (la vertiente oriental de la cordillera Oriental y la vertiente occidental de la cordillera Occidental) drenan hacia la cuenca amazónica y al Pacífico, respectivamente. Sin embargo, dependiendo de la configuración de las cuencas interandinas, los páramos de las vertientes interandinas de ambas cordilleras

drenan tanto al Pacífico como a la Amazonía. Así, por ejemplo, existen áreas de páramos de la cordillera Oriental, entre ellos el lado interandino del Cayambe y mucho del Cotopaxi, que drenan al Pacífico, mientras que varios páramos de la cordillera Occidental, incluyendo los páramos de El Cajas en Azuay y gran parte de los del Chimborazo, drenan sus aguas hacia el Atlántico a través de la cuenca amazónica (Figura 1.6).

La estructura del libro

El libro está dividido en 13 capítulos, incluida esta introducción, que van desde lo biofísico hacia lo social, legal y de manejo; continúa con un análisis holístico acerca de los actores e iniciativas, para terminar con una sección de conclusiones y recomendaciones. Para robustecer la calidad, la estrictez y la coherencia, se realizó un proceso de revisión por pares interno entre quienes escribieron los diferentes capítulos. Además, el contenido del libro en su totalidad fue examinado por tres personas expertas externas.

Como se puede ver, están los temas de alguna manera clásicos, pero se han integrado otros que han adquirido creciente importancia como el cambio climático, las obras de infraestructura y la minería. Desde esta perspectiva, ofrecemos este volumen no solo como una revisión de los avances que el conocimiento sobre los páramos ecuatorianos ha experimentado en las últimas dos décadas, sino también como una reflexión sobre las nuevas amenazas y factores que actualmente condicionan las relaciones que se dan entre el paisaje del páramo, sus habitantes y los demás actores que dependemos de él. En último término, esperamos que este libro sirva como base para una mejor comprensión de las particularidades ecológicas, socioeconómicas y culturales del páramo, y para guiar el manejo, la conservación y el uso de este bioma estratégico.

Anexo 1.1 Resumen de los 11 tipos de páramo presentados en MAE (2014). Los nombres en itálicas son versiones más cortas propuestas por los editores de este libro.

Nº	Nombre	Descripción	Géneros representativos
1	Arbustal siempreverde montano alto del Páramo del sur <i>Páramo arbustivo del Sur</i>	Entre 2800 y 3300 m Equivale al 'paramillo' en Loja, Zamora Chinchipe y El Oro; bosque enano de hasta 3 m de altura.	<i>Puya</i> , <i>Miconia</i> , <i>Neurolepis</i> , <i>Oreocallis</i> , <i>Weinmannia</i> y <i>Blechnum</i> .
2	Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo <i>Páramo arbustivo o subpáramo</i>	Entre 3300 y 3900 m en el norte-centro y 2800 y 3600 m en el sur. Se trata de parches arbustivos.	<i>Baccharis</i> , <i>Gynoxys</i> , <i>Brachyotum</i> , <i>Escallonia</i> , <i>Hesperomeles</i> , <i>Miconia</i> , <i>Buddleja</i> , <i>Monnina</i> , <i>Hypericum</i> y varias ericáceas mezclados con <i>Calamagrostis</i> .
3	Bosque siempreverde del Páramo <i>Bosque de páramo</i>	Entre los 3200 y los 4100 m Se trata de bosques con árboles de hasta 7 m de altura.	<i>Polytepis</i> , <i>Buddleja</i> , <i>Escallonia</i> y <i>Hesperomeles</i> , entre otros, sobre denso estrato de arbustos y hierbas.
4	Herbazal del Páramo <i>Páramo de pajonal</i>	Entre 3400-4300 m en el centro-norte y 2900-3900 m en el sur. Corresponde al típico páramo de pajonal.	<i>Calamagrostis intermedia</i> y otras gramíneas como <i>Agrostis</i> , <i>Festuca</i> , <i>Cortaderia</i> y <i>Stipa</i> . Hay parches de arbustos de los géneros <i>Diplostephium</i> , <i>Hypericum</i> y <i>Pentacalia</i> , y una abundante diversidad de hierbas en roseta, rastreras y diversas formas de vida.
5	Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo <i>Páramo seco</i>	Entre 3500 y 4200 m. Páramos relativamente secos, herbáceos y abiertos en el centro del país.	<i>Stipa</i> , <i>Senecio</i> y <i>Plantago</i> , con <i>Baccharis</i> , <i>Calamagrostis</i> , <i>Cerastium</i> , <i>Geranium</i> , <i>Hypochaeris</i> , <i>Perezia</i> y <i>Valeriana</i> .
6	Herbazal inundable del Páramo <i>Humedales y turberas</i>	Entre 3300 y 4500 m. En una matriz de otro tipo de ecosistema como el herbazal de páramo, en pantanos y ciénegas.	<i>Agrostis</i> , <i>Castilleja</i> , <i>Cortaderia</i> , <i>Eryngium</i> , <i>Geranium</i> , <i>Hydrocotyle</i> , <i>Hypericum</i> , <i>Hypochaeris</i> , <i>Hypsela</i> , <i>Lachemilla</i> , <i>Myrteola</i> , <i>Oreobolus</i> , <i>Oritrophium</i> , <i>Phlegmariurus</i> , <i>Schoenoplectus</i> y <i>Xyris</i> .

Nº	Nombre	Descripción	Géneros representativos
7	Herbazal ultrahúmedo subnival del Páramo <i>Superpáramo húmedo</i>	Entre 4400 y 4900 m hacia el oriente entre Carchi y Azuay, sitios agrestes, altos con alta humedad y en zonas particularmente agrestes. Muchas especies de distribución muy restringida.	<i>Calamagrostis, Draba, Festuca, Geranium, Lachemilla, Loricaria, Luzula, Nertera, Pentacalia, Phlegmariurus y Xenophyllum.</i>
8	Herbazal y Arbustal siempreverde del Páramo del volcán Sumaco <i>Páramo del Sumaco</i>	Entre 3250 y 3800 m en el volcán Sumaco. Sobre suelos volcánicos recientes.	<i>Nertera</i> , arbus-tos de <i>Monticalia</i> y <i>Vaccinium</i> , penachos dispersos de <i>Cortaderia</i> y helechos <i>Blechnum</i> y <i>Elaphoglossum</i> .
9	Herbazal y Arbustal siempreverde subnival del Páramo <i>Superpáramo arbustivo</i>	Entre 4100 y 4500 m a lo largo de las cordilleras en el norte-centro. Ecosistema no continuo en las partes más altas con condiciones climáticas extremas. Elementos postrados sobre matriz de suelo desnudo.	<i>Arcytophyllum, Chuquiraga, Diplostephium, Draba, Festuca, Gentiana, Loricaria, Luzula, Poa, Valeriana y Xenophyllum</i> , cojines de <i>Azorella</i> y <i>Plantago</i> .
10	Herbazal húmedo subnival del Páramo <i>Superpáramo</i>	Disperso, restringido a las partes generalmente sobre 4500 m. Variaciones notables según precipitación y humedad. Formas de vida predominantes: pastos de tallo corto, rosetas acaulescentes y hierbas en cojín. Suelos con muy poca materia orgánica y capacidad de retención de agua muy pobre. Ilinizas, Pichincha, Cotopaxi, Antisana y Chimborazo.	<i>Xenophyllum, Arenaria, Astragalus, Baccharis, Bidens, Calamagrostis, Cerastium, Conyza, Festuca, Plantago, Senecio y Silene.</i>
11	Rosetal caulescente y Herbazal del Páramo (frailejones) <i>Páramo de frailejones</i>	Entre 3350 y 4100 m en Carchi, Sucumbíos e Imbabura.	Dominado por <i>Espeletia</i> sobre matriz de <i>Calamagrostis</i> , con <i>Arcytophyllum, Ageratina, Berberis, Blechnum, Brachyotum, Diplostephium, Hypericum, Loricaria y Miconia.</i>

Anexo 1.2 Extensión por provincia y total en el territorio ecuatoriano de los diferentes tipos de páramo según la clasificación de MAE (2014).

Nº	Ecosistema	Provincia	Superficie en la provincia	Superficie total
1	Arbustal siempreverde montano alto del páramo del sur	Loja	0,1	210,5
		Zamora Chinchipe	210,4	
2	Arbustal siempreverde y herbazal del páramo	Azuay	12 367,2	230 446,6
		Bolívar	8969	
		Cañar	2381,4	
		Carchi	2713,5	
		Chimborazo	22 594,8	
		Cotopaxi	29 214,9	
		Imbabura	14 586,2	
		Loja	4029,7	
		Morona Santiago	31 506,7	
		Napo	29 118,3	
		Pichincha	5663,1	
		Sucumbíos	3320,9	
Tungurahua	21 876,4			
Zamora Chinchipe	42 104,7			
3	Bosque siempreverde del páramo	Bolívar	131,8	8786,5
		Cañar	6,5	
		Carchi	108,3	
		Chimborazo	2187,7	
		Cotopaxi	59,2	
		Imbabura	537,6	
		Napo	145,3	
		Pichincha	955,4	
		Sucumbíos	76,6	
		Tungurahua	4578,3	

Nº	Ecosistema	Provincia	Superficie en la provincia	Superficie total
4	Herbazal del páramo	Azuay	193 454,5	1 052 005,8
		Bolívar	885,5	
		Cañar	89 695,5	
		Chimborazo	147 918,6	
		Cotopaxi	65 580,6	
		El Oro	45,5	
		Esmeraldas	152	
		Imbabura	37 773,2	
		Loja	9353,3	
		Morona Santiago	86 084,9	
		Napo	212 836,6	
		Pichincha	130 135,7	
		Sucumbíos	43,6	
		Tungurahua	52 458,9	
Zamora Chinchipe	25 587,4			
5	Herbazal húmedo montano alto superior del páramo	Bolívar	21 012,9	36 148,6
		Chimborazo	2333,3	
		Morona Santiago	361,7	
		Pichincha	1618,1	
		Tungurahua	10 822,6	
6	Herbazal húmedo subnival del páramo	Bolívar	25,4	8883,5
		Chimborazo	1866,6	
		Cotopaxi	2327,5	
		Napo	5	
		Pichincha	2263,7	
		Tungurahua	2395,3	

Nº	Ecosistema	Provincia	Superficie en la provincia	Superficie total
7	Herbazal inundable del páramo	Azuay	665,8	11 271,5
		Bolívar	55,1	
		Cañar	139,7	
		Carchi	510,7	
		Chimborazo	70,3	
		Cotopaxi	3443,8	
		Imbabura	7,3	
		Napo	883,7	
		Pichincha	1329,3	
		Sucumbíos	0,4	
		Tungurahua	4012	
		Zamora Chinchipe	153,3	
8	Herbazal ultrahúmedo subnival del páramo	Bolívar	3201,8	17 540,82
		Chimborazo	2818	
		Cotopaxi	240,6	
		Morona Santiago	21,6	
		Napo	3709,6	
		Pichincha	2262,5	
		Tungurahua	5286,8	
9	Herbazal y arbustal siempreverde del páramo del volcán Sumaco	Napo	274,2	393
		Orellana	118,8	
10	Herbazal y arbustal siempreverde subnival del páramo	Azuay	11 572,9	67 241,5
		Bolívar	4196,2	
		Cañar	6891,7	
		Carchi	200,5	
		Chimborazo	24 347,6	
		Cotopaxi	10 409	
		Morona Santiago	296,1	
		Napo	1989,1	
		Pichincha	2321,9	
		Tungurahua	5016,5	

Nº	Ecosistema	Provincia	Superficie en la provincia	Superficie total
11	Rosetal caulescente y herbazal del páramo (frailejones)	Carchi	41 331,1	46 372,2
		Sucumbíos	5041	

—CAPÍTULO 2

LOS SUELOS DE LOS PÁRAMOS DEL ECUADOR

Marlon Calispa | Francisco J. Vasconez | Santiago Santamaría
| Pablo Samaniego

Corte que muestra el suelo del páramo en el Parque Nacional Cayambe.
Fotografía: Robert Hofstede



Resumen

En este capítulo se describen los suelos en los páramos ecuatorianos, desde su origen ligado principalmente a la historia volcánica, los procesos generales que gobiernan su formación condicionados por parámetros ambientales, hasta su distribución espacial. Además, se resaltan sus principales características físico-químicas, mineralógicas y capacidad de retener carbono, las cuales determinan en gran parte las propiedades únicas que caracterizan a los suelos de los páramos ecuatorianos.

En términos generales, existe una relación espaciotemporal entre la actividad volcánica y el tipo de suelos de páramo en el Ecuador. La zona centro-norte, entre las provincias de Carchi y Chimborazo, donde se ubica el arco volcánico activo aporta de manera semicontinua con material volcánico fresco (ceniza), rejuveneciendo el suelo y así preservando su carácter vítrico. Por el contrario, los suelos entre el sur de la provincia de Chimborazo y Loja, donde el aporte de material volcánico nuevo es mínimo, se han desarrollado hasta adquirir un carácter ándico pleno. Así como la formación de Andosoles depende de la actividad volcánica, la formación de Histosoles depende más bien de condiciones topográficas locales.

Para la sustentabilidad de estos ecosistemas, es necesario llenar algunos vacíos de información, particularmente sobre la respuesta de los suelos de los páramos en distintos escenarios, incluyendo el cambio climático. Esta información nueva, y la precedente, debe ser compilada en una base de datos georreferenciada, normada y de libre acceso que permita tener una visión integral del conocimiento adquirido y sus vacíos. A pesar de las características únicas de los suelos del páramo, estos no están exentos de riesgo, principalmente por actividades humanas que podrían alterar, de manera significativa, sus propiedades, algunas irreversibles dada la gran diversidad de condiciones en las que estos suelos se forman y a las que están expuestos.

Summary

This chapter describes the soils in the Ecuadorian páramo including their volcanic origin, the general processes that govern their formation conditioned by environmental parameters, and their spatial distribution. In addition, their main physico-chemical, mineralogical and carbon sequestration characteristics are described, which shape the unique properties that characterise the soils of the Ecuadorian páramos.

In general, there is a spatio-temporal relationship between volcanic activity and the type of páramo soils in Ecuador. The central-northern zone, between the provinces of Carchi and Chimborazo, where the active volcanic arc is located, provides a semi-continuous supply of fresh volcanic material (ash), rejuvenating the soil and thus preserving its vitric character. In contrast, the soils between the south of Chimborazo province and Loja, where the input of new volcanic material is minimal, have fully developed their Andic character. While the formation of Andosols depends on volcanic activity, the formation of Histosols depends more on local topographic conditions.

Sustainable management of páramo soils requires a better understanding of their response to environmental change, including climate change scenarios. Existing and new information on the response of páramo soils to environmental change should be compiled in a geo-referenced, standardised, and freely accessible database that allows for a comprehensive view of the knowledge acquired and its gaps. Despite the unique characteristics of the páramo soils, they are not exempt from risk, mainly due to human activities that could significantly alter their properties. Some of these alterations could be irreversible depending on the many ways the soils were formed and the varied conditions they have been exposed to.

Introducción

El páramo es un bioma montañoso neotropical de los Andes del norte y centro que cumple un rol esencial en los ciclos regionales y globales del agua, el carbono y los nutrientes. Los páramos actúan como reservas de agua, entregando agua y servicios ambientales a las comunidades y asentamientos en altitudes más bajas. Ciudades como Bogotá, Quito, Cuenca o Lima dependen, mayoritariamente, del agua relacionada con el páramo, para consumo humano, agricultura, usos industriales y generación de electricidad (Buytaert et al., 2006; Capítulo 3).

Estos ecosistemas son ampliamente conocidos por su biodiversidad y endemismo; al mismo tiempo, son continuamente amenazados por actividades humanas y cambios ambientales. A pesar de su importancia, hasta hace pocos años estos ecosistemas eran poco estudiados, pero al incrementarse la necesidad de conocimiento para su manejo sustentable, esta tendencia ha cambiado y, gradualmente, se ha investigado más en los últimos años (Correa et al., 2020).

Se reconoce que gran parte de los servicios ambientales de estos ecosistemas están relacionados con el tipo de suelos sobre los que se desarrollan. Los suelos en los Andes del Norte están intrínsecamente ligados a la actividad volcánica. En este capítulo se describen el proceso de formación y las características principales de los suelos de los páramos, empezando por la descripción de la fuente del material parental para el desarrollo del suelo (ceniza volcánica en la mayor parte de casos) para, posteriormente, describir cómo se forman estos suelos, sus características más importantes y las amenazas a las que se enfrentan.

Además, se hace énfasis en la fragilidad de estos ecosistemas y en la necesidad de estudiarlos de forma integral. Por ejemplo, existen vacíos con respecto a cómo estos ecosistemas reaccionarían ante un medio ambiente cambiante y con presiones antropogénicas cada vez más crecientes.

¿Cómo influye el volcanismo en la formación de los suelos en el páramo ecuatoriano?

Esta primera sección presenta una breve introducción del volcanismo en los Andes ecuatorianos para tener una primera aproximación a las relaciones espaciotemporales entre el volcanismo activo y la formación de los suelos del páramo. Para ello, los temas abordados en este capítulo permitirán tener una idea general de por qué existen volcanes en el Ecuador, cuál es su evolución espaciotemporal y cuál es el rol de los fenómenos volcánicos en la formación y evolución de los suelos del páramo ecuatoriano.

El volcanismo en el Ecuador

Los volcanes son ambientes geológicos que, a cualquier escala de tiempo y espacio, tienen tres elementos fundamentales: magma, erupciones y edificios volcánicos (Borgia et al., 2010; Szakács, 2010). El magma se forma en el manto terrestre y asciende a la superficie por medio de un sistema de fracturas en la corteza, formando conductos magmáticos. Las erupciones volcánicas se producen cuando el magma alcanza la superficie y es emitido en forma de flujos de lava o fragmentos de roca denominados piroclastos (*piro* 'fuego'; *clasto* 'fragmento'). La acumulación de estos materiales (lavas y piroclastos) forma los edificios volcánicos.

El volcanismo en los Andes se origina por la subducción de la corteza oceánica de las placas de Nazca y de la Antártida bajo la corteza continental de la placa Sudamericana. Este proceso de subducción ha sido continuo desde hace más de 200 millones de años (Coira et al., 1982; Rossel et al., 2013; Spikings et al., 2016). En el Ecuador, las evidencias de este volcanismo antiguo corresponden, por ejemplo, a las formaciones geológicas Misahuallí (Aspden y Litherland, 1992), Aláo (Litherland et al., 1994), Río Cala-San Lorenzo (Luzieux et al., 2006; Vallejo et al., 2019), Macuchi (Hughes y Pilatásig, 2002), Saraguro-San Juan Lanchas (Vallejo et al., 2020) y Zumbahua (Vallejo et al., 2009), entre otras; estas son interpretadas como los vestigios de actividad volcánica.

En esta sección nos enfocaremos en los arcos volcánicos de los periodos Neógeno y Cuaternario; es decir, el volcanismo de los últimos 23 millones de años, con el objetivo de determinar si su distribución espaciotemporal tiene una influencia en la formación de los suelos del páramo.

En el Ecuador, este volcanismo se origina por la subducción de la placa oceánica de Nazca bajo la placa continental Sudamericana (Gutscher et al., 1999; Harpp et al., 2005; Nocquet et al., 2014; Yepes et al., 2016).

Volcanismo del Neógeno (23 a 2,6 millones de años)

El arco volcánico ecuatoriano del Neógeno estuvo activo durante tres etapas principales. La primera, hace más de 19 millones de años, corresponde al periodo de formación de Loma Blanca y Saraguro, ubicadas en los Andes de la provincia de Loja, y la unidad San Juan de Lachas en las provincias de Pichincha, Imbabura y Carchi (Hungerbühler et al., 2002; Vallejo et al., 2019). Durante la segunda etapa, hace entre 17 y 14 millones de años, se desarrolló el volcanismo en los actuales cantones de Girón-Santa Isabel (provincia del Azuay) y Malacatos-Vilcabamba (provincia de Loja), al sur del Ecuador

(Hungerbühler et al., 2002), además de los depósitos volcanoclásticos de Zumbahua (provincia de Cotopaxi; Vallejo et al., 2019). Finalmente, la tercera etapa ocurrió hace entre 8 y 2,6 millones de años, durante la cual aparecieron las formaciones Tarqui, Cojitambo y Quimsacocha, ubicadas en Azuay y Cañar (Bristow, 1973; Steinmann et al., 1999; Hungerbühler et al., 2002; Schütte et al., 2010). Otras formaciones características de esta etapa son la formación Cisarán, en la provincia de Chimborazo, los volcánicos de Angochahua, Pugarán y Peñas Coloradas entre las provincias de Imbabura y Carchi (Barberi et al., 1988; Winkler et al., 2005) y la formación Pisayambo en Chimborazo, Cotopaxi, Tungurahua, Napo y Pichincha. En conclusión, durante las tres etapas del arco Neógeno, el volcanismo mostró una actividad casi continua a lo largo de todos los Andes ecuatorianos, es decir, entre las actuales provincias de Carchi, al norte, y Loja, al sur del país (Figura 2.1, línea café entrecortada). Hoy en día, los afloramientos que permiten evidenciar la actividad volcánica de este periodo son escasos, principalmente, porque los edificios volcánicos y sus depósitos han sido fuertemente erosionados o cubiertos por depósitos más jóvenes. Este es el caso, especialmente, de las formaciones del centro y norte del Ecuador, cubiertas por los depósitos asociados al arco volcánico Cuaternario, actualmente activo.

Volcanismo del Cuaternario (2,6 millones de años al presente)

El arco volcánico Cuaternario comprende más de 70 centros volcánicos (Hall, 1977; Hall y Wood, 1985; Barberi et al., 1988; Hall y Beate, 1991; Hall et al., 2008; Bernard y Andrade, 2011; Ramon et al., 2021; Santamaría, 2021) distribuidos entre los Andes de las provincias de Carchi y Chimborazo-Morona Santiago (Figura 2.1). Estos volcanes son comúnmente agrupados en cuatro lineamientos norte-sur, coincidentes con rasgos fisiográficos prominentes de los Andes ecuatorianos: volcanes de la cordillera Occidental, volcanes del valle interandino, volcanes de la cordillera Real y volcanes del Subandino (Hall et al., 2008). Otros estudios describen el arco volcánico Cuaternario en nudos este-oeste o en tres segmentos: norte, centro y sur (Hall y Wood, 1985; Barberi et al., 1988; Bablon et al., 2019; Bablon et al., 2020; Santamaría, 2021; Santamaría et al., 2022). De acuerdo con Santamaría (2021), el volcanismo del Cuaternario se desarrolló en tres fases principales.

Entre 2,4 y 1,4 millones de años, el volcanismo estuvo concentrado en el segmento central de la cordillera Real, al este de la actual ciudad de Quito, y en la parte sur de la zona Subandina, en torno a la actual ciudad de Puyo (Figura 2.1). En la segunda etapa (1,4-0,8 millones de años), aparecieron nuevos volcanes en

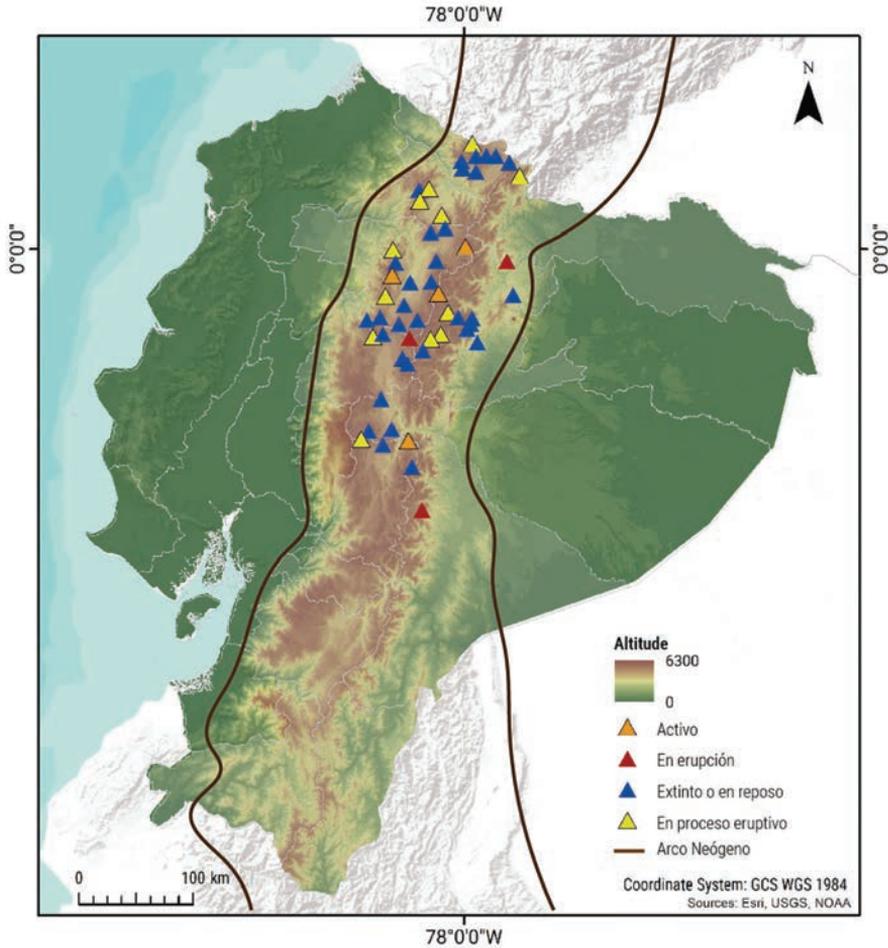


Figura 2.1 Distribución espaciotemporal del volcanismo durante el Neógeno (línea negra) y el Cuaternario (volcanes en color azul, amarillo, naranja y rojo). Los volcanes en azul son aquellos considerados extintos o dormidos; en amarillo los potencialmente activos; en naranja activos; y en rojo los en erupción. Se resalta la ubicación de las provincias atravesadas (norte-sur) por los Andes Fuente: Modificado de Bernard y Andrade (2011)

los alrededores de Quito, en la cordillera Occidental y en el Callejón Interandino, y se formaron los primeros volcanes cerca de la ciudad de Tulcán y entre las ciudades de Latacunga y Ambato (Figura 2.1). Finalmente, en la tercera etapa, iniciada hace ~0,6 millones de años, hubo un notable incremento en el número de volcanes activos en todos los segmentos del arco, con una aparentemente migración del volcanismo desde el segmento central hacia el sur (Bablon et al., 2019; Santamaría, 2021).

Además, los volcanes del arco Cuaternario fueron clasificados en cuatro grupos de acuerdo con la antigüedad de su último periodo eruptivo conocido (Hall et al., 2008; Bernard y Andrade, 2011). Es así que los volcanes son considerados como volcanes extintos o dormidos, cuando su última erupción ocurrió hace más de 12 mil años; volcanes potencialmente activos, cuando tuvieron actividad eruptiva entre 12 mil años y el inicio del periodo histórico en el Ecuador, es decir, antes de la llegada de los españoles (~1534 AD); volcanes activos, si han tenido erupciones dentro del periodo histórico, es decir, si existen registros escritos de sus erupciones; y volcanes en erupción, con periodos eruptivos en los últimos dos años (2021–2023; Figura 2.1).

En resumen, el arco volcánico Cuaternario está compuesto por un alto número de volcanes distribuidos entre los Andes que atraviesan las provincias del Carchi en el norte y Chimborazo en el sur (Figura 2.1). Muchos de ellos han mostrado actividad eruptiva de diversa intensidad en los últimos 12 mil años, siendo actualmente los volcanes Chiles-Cerro Negro (en proceso eruptivo) y Sangay (en erupción) sus límites geográficos (Figura 2.1). Además, los datos geocronológicos y estratigráficos revelaron variaciones espaciotemporales (norte-sur) en cuanto al apareamiento de estos, con un notable incremento en el número de volcanes a partir de los ~0,6 millones años (Santamaría, 2021).

Fenómenos volcánicos asociados a la formación de suelo en el páramo ecuatoriano

Aquí exploramos los principales fenómenos volcánicos que pueden tener un mayor aporte de material parental para la formación de los suelos del páramo. Dada la complejidad y la variabilidad de los dinamismos eruptivos y los múltiples fenómenos asociados a las erupciones volcánicas, en esta sección dividiremos los fenómenos volcánicos de acuerdo con el tamaño de grano predominante de sus depósitos y sus espesores más comunes. Escogimos esta aproximación asumiendo que aquellos depósitos con tamaño de grano fino (granos milimétricos) y de espesores de pocos centímetros tienen más posibilidades de evolucionar en periodos de tiempo menores en suelos de páramo, en comparación con aquellos depósitos brechosos con tamaño de grano grueso (granos centimétricos a bloques métricos) y de espesores métricos (Shoji et al., 1993). Además, nos enfocaremos en erupciones de tipo explosivo, que es el estilo eruptivo más común en los volcanes de los Andes ecuatorianos.

Durante las erupciones explosivas, el magma es fragmentado y expulsado de forma violenta hacia la atmósfera en forma de piroclastos. En función de la energía de la explosión, los fragmentos más ligeros y de menor tamaño (lapilli: 2-64 mm; ceniza: menor a 2 mm) son emitidos hacia la atmósfera en forma de columnas y nubes eruptivas, las cuales pueden recorrer grandes distancias en función de la altura de la columna (cientos a miles de metros) y la velocidad y dirección del viento (Bonadonna et al., 2015). Las nubes de ceniza pueden alcanzar varios cientos de kilómetros de distancia y cubrir cientos de kilómetros cuadrados (Cas y Wright, 1996). Por el contrario, los fragmentos más grandes (bloques o bombas > 64 mm) y densos caen alrededor del cráter pudiendo formar bloques balísticos o flujos piroclásticos (Cas y Wright, 1996; Dufek et al., 2015).

Fenómenos que generalmente forman depósitos de grano fino (milimétricos a centimétricos) y de espesores centimétricos

Las nubes eruptivas son transportadas por el viento. En el Ecuador, la dirección predominante del viento en los primeros 15 km es hacia el occidente, desde los 15 hasta los 20 km la dirección cambia hacia el oriente y, finalmente, por sobre los 20 km, la dirección predominante vuelve hacia el occidente (Parra et al., 2016; Vásconez, 2019). Dadas estas condiciones atmosféricas, es de esperarse que los depósitos de ceniza volcánica o tefra (Figura 2.2a) se encuentren predominantemente hacia el occidente del arco volcánico (Bernard et al., 2021) cubriendo, incluso, parte de la zona costera del Ecuador (Bernard et al., 2016; Parra et al., 2016; Mulas et al., 2019; Bernard et al., 2022; Vásconez et al., 2022).

Por otro lado, las oleadas piroclásticas o *surges* (Figura 2.2b) se forman cuando parte de la columna eruptiva colapsa (Druitt, 1998). Esto ocurre cuando dicha columna alcanza una densidad mucho más alta en comparación con la densidad de la atmósfera o la energía de dicha emisión no es suficiente para permitir el ascenso de la columna eruptiva hacia la atmósfera (Dufek et al., 2015). Dicho colapso genera que el material piroclástico, en este caso mayoritariamente de grano fino, descienda abruptamente y forme flujos gravitacionales con concentraciones bajas de partículas y altas de gases (Cas y Wright, 1996; Druitt, 1998; Douillet et al., 2013a, b; Dufek et al., 2015). Dichos flujos descienden de los edificios volcánicos con la suficiente energía como para sobrepasar los cauces de valles e incluso altos topográficos (colinas de varios cientos de metros). Generalmente, los *surges* tienen un alcance radial en el rango de unos pocos hasta decenas de kilómetros en los alrededores del cráter (Charbonnier et al., 2013; Dufek et al., 2015; Kelfoun et al., 2017).



Figura 2.2 a) Secuencia de depósitos de caída/tefra (ceniza+lapilli) del Chimborazo. b) Depósito de oleada piroclástica del volcán Cayambe; nótese en la base un suelo. Fotografías: Marlon Calispa

El espesor de los depósitos de caída de ceniza es inversamente proporcional a la distancia desde el cráter, es decir, mientras más lejos del volcán, menor es el espesor del depósito (Bonadonna et al., 2015). Por el contrario, el espesor de las oleadas piroclásticas es muy variable y depende, por ejemplo, de la topografía por la cual transitan y la energía cinética al momento de la deposición (Douillet et al., 2013a, b). Pese a la complejidad de los procesos de sedimentación y deposición de estos fenómenos volcánicos, en general se puede afirmar que el espesor de los depósitos es directamente proporcional al tamaño de la erupción; es decir, durante erupciones explosivas grandes, es mayor la cantidad de material emitido y, por tanto, mayores son el espesor y el alcance de los depósitos volcánicos (Druitt, 1998; Dufek et al., 2015).

Finalmente, es importante resaltar que las ignimbritas (depósitos de flujos gravitacionales) ricas en vidrio volcánico se transforman rápidamente en suelos debido a la meteorización (Delmelle et al., 2015). Esto se debe a que el vidrio volcánico libera fácilmente soluciones de sílice, aluminio y hierro en función de la cantidad de lluvia y el gradiente altitudinal al cual el depósito esté expuesto (Churchman y Lowe, 2012; Delmelle et al., 2015). Estas soluciones permiten la formación de mineraloides como alófano, gibbsita y halloysita, entre otros, que son constituyentes principales de los suelos (Delmelle et al., 2015).

Fenómenos que generalmente forman depósitos brechosos (granos centimétricos a bloques métricos) y de espesores métricos

En el grupo de depósitos brechosos destacan los depósitos de bloques balísticos (>64 mm), flujos y domos de lava (autobrechas de bloques métricos), flujos piroclásticos (brechas de granos centimétricos a bloques métricos) y flujos de lodo

y escombros (lahares). Todos estos fenómenos forman depósitos brechosos de varios metros de espesor y, generalmente, tienen alcances de pocos kilómetros desde el cráter (distribución espacial limitada). Bajo condiciones adecuadas y en el transcurso del tiempo (durante periodos mucho más largos que en el caso anterior), estos depósitos también pueden transformarse en suelos; no obstante, los procesos de meteorización física y química para formar suelos son más eficientes en depósitos de grano fino y de espesor centimétrico (Shoji et al., 1993b; Delmelle et al., 2015) por lo que no ahondaremos en mayores detalles sobre estos fenómenos volcánicos.

Implicaciones espacio-temporales del volcanismo ecuatoriano en la formación y evolución de los suelos del páramo

La actividad volcánica, como generadora del material parental, es clave para la formación, desarrollo y rejuvenecimiento de los suelos (Delmelle et al., 2015). Es así como la distribución espacial y temporal del volcanismo en el Ecuador tiene un rol importante en su desarrollo. Como se describió en las secciones anteriores, la diferencia espaciotemporal en la extensión de la actividad volcánica, principalmente durante los periodos Neógeno y Cuaternario, y por tanto en la edad del material parental que los volcanes proveen para la formación de los suelos, es posiblemente el factor más importante en las diferencias fisicoquímicas que se registran hoy en día en los suelos del páramo de estas dos regiones. De manera general, los páramos del sur ecuatoriano (provincias de Cañar, Azuay y Loja) son más maduros o desarrollados que los del norte (entre las provincias de Carchi y Chimborazo), siendo la actividad volcánica del arco Cuaternario la que mantiene en continuo rejuvenecimiento a los suelos del páramo del centro-norte. Además, las nubes de ceniza, por tener una mayor distribución, constituyen el fenómeno con mayor aportación de material parental en la formación de suelos del páramo (Shoji et al., 1993b). Nótese que esta ceniza preferentemente se deposita hacia el occidente de los Andes ecuatorianos por la predominancia de la dirección de los vientos (Bernard et al., 2021), sin que por ello se deba descartar su deposición hacia el sur (Parra et al., 2016) u otras regiones del Ecuador.

Los suelos de los páramos

El suelo es la porción más superficial de la corteza terrestre. En general, los suelos se forman por la meteorización (alteración fisicoquímica) del material parental (material sin consolidar o menos alterado) con el paso del tiempo. Este proceso es altamente influenciado por las variables climáticas, principalmente

temperatura y precipitación, que determinan la humedad del suelo y el tiempo transcurrido desde el inicio de la alteración del material parental. La interacción de estos factores condiciona la progresión de los procesos que forman los suelos (Delmelle et al., 2015).

En el Ecuador, la formación de suelos en los páramos está estrechamente relacionada con la actividad volcánica. En función de esta, la cordillera de los Andes del Ecuador puede dividirse en tres zonas. Una primera zona se extiende entre las provincias de Carchi e Imbabura (zona norte), caracterizada por una actividad volcánica menor, y cuyos materiales para la formación del suelo comprenden erupciones del periodo entre inicios del Holoceno (12 mil años) hasta antes del periodo histórico (volcanes en color amarillo en la Figura 2.1). Una segunda región es la comprendida entre las provincias de Pichincha y Chimborazo (zona centro) que se caracteriza por el rejuvenecimiento continuo de los suelos por la adición de materiales volcánicos nuevos, producto de erupciones más recientes (volcanes en colores anaranjado y rojo en la Figura 2.1). Y una tercera región (zona sur), entre el sur de la provincia de Chimborazo y la provincia de Loja, en donde los depósitos volcánicos Cuaternarios están ausentes y el material parental para la formación del suelo corresponde a materiales de edad anterior a 2,6 millones de años (Winckell et al., 1997). Esta regionalización está asociada en términos macro con los tipos de suelo dominantes en los páramos del Ecuador.

Varios tipos de suelo pueden encontrarse en los páramos ecuatorianos; sin embargo, la mayor parte de los suelos se han desarrollado sobre depósitos volcánicos de diversa edad y composición química (Figura 2.3). Los suelos más frecuentes son los Andosoles, en la base de referencia mundial para recursos suelo (WRB, 2015) o Andisoles en referencia al sistema *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff - NRCS/USDA, 2014).

Los Andosoles tienen su origen en las palabras japonesas *An* y *Do* que significan 'oscuro' y 'suelos', respectivamente. El nombre hace alusión a una de las características más sobresalientes de este grupo de suelos, que es precisamente su color oscuro debido a una concentración relativamente alta de materia orgánica. Estos suelos son comunes en zonas con actividad volcánica, pero si las condiciones ambientales son favorables, también se pueden formar en ambientes no volcánicos (García-Rodeja et al., 1987). Los Andosoles presentan un conjunto de características únicas que los distinguen de cualquier otro suelo (características ándicas), incluyendo alta capacidad de retención de agua, baja densidad aparente, formación de agregados estables, entre otras (Nanzyo et al., 2002). El material parental más común para la formación de estos suelos es la ceniza volcánica, que es un término que agrupa a materiales aéreos de origen volcánico, sin importar su morfología, composición y que

tiene un tamaño de partícula inferior a 2 mm. Debido a su distribución espacial determinada por la velocidad y dirección del viento durante una erupción, la ceniza constituye la mayor fuente de material parental en la formación de suelos de páramo (Shoji et al., 1993a). Dependiendo del grado de desarrollo de estos suelos y de las condiciones en las cuales se desarrollan es común agruparlos en tres subgrupos: Andosoles vítricos, Andosoles alofánicos y Andosoles no alofánicos (Dahlgren et al., 2004).

El primer subgrupo de suelos, los Andosoles vítricos, es común en zonas donde los depósitos de material volcánico tienen edades inferiores a 2000 años, la alteración del material parental (ceniza) es baja, el contenido de minerales secundarios es bajo y las características únicas de los Andosoles apenas se está desarrollando (Zehetner et al., 2003). Estos suelos, normalmente, presentan texturas arenosas y su fracción fina se forma de minerales primarios y abundante vidrio volcánico (mayor al 5 %). Su capacidad de retención de fósforo es mayor al 25 % y su densidad aparente varía entre 0,9 y 1,2 g/cm³ (WRB, 2015). Estos suelos se pueden encontrar en las áreas de influencia de volcanes activos y en erupción como Cayambe, Guagua Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua y Sangay (Figura 2.1). Son suelos normalmente fértiles, pero su capacidad de retención de agua es baja debido al poco desarrollo de su estructura y su textura gruesa (Podwojewski, 2000). Al estar estos suelos en un estado inicial de la formación, no se debe confundir la ausencia de minerales secundarios (alófano/imogolita) como indicador de un suelo no alofánico. Si transcurre suficiente tiempo, estos suelos eventualmente desarrollarán el carácter ándico, al igual que minerales secundarios específicos en función de las condiciones ambientales, particularmente disponibilidad de agua. Sin embargo, debido a la actividad volcánica semicontinua, es posible que el desarrollo del carácter ándico no sea posible debido al rejuvenecimiento constante del suelo por el aporte de material volcánico fresco.

El segundo subgrupo corresponde a los Andosoles alofánicos, que se han desarrollado por más tiempo y presentan el carácter ándico. En esta categoría, la fracción coloidal de estos suelos está dominada por los minerales secundarios alófano o imogolita, y se presenta un pH superior a 5. Son suelos normalmente fértiles, aunque no es raro que tengan deficiencia de fósforo y azufre. Se han desarrollado en depósitos de ceniza más antiguos y ambientes con poca o nula aportación de material volcánico nuevo (Podwojewski, 2000). Los Andosoles alofánicos se pueden encontrar en zonas húmedas, en donde se han producido depósitos de materiales volcánicos. En el Ecuador se han reportado y descrito suelos alofánicos en las pendientes oriental (provincia de Pastaza, el Puyo) y occidental de la cordillera de los Andes (en la región comprendida entre La Concordia y Quevedo) (Colmet-Daage et al., 1973; Kaufhold et al., 2009;

Kaufhold et al., 2010). No se han encontrado suelos alofánicos en los páramos ecuatorianos, aunque su formación no se descarta, en particular en las provincias del Carchi e Imbabura.

El tercer subgrupo mayoritario de suelos corresponde a los Andosoles no alofánicos, en los cuales la fracción coloidal está dominada por complejos organometálicos y también han alcanzado el carácter ándico. Estos suelos son más ácidos, tienden a ser más oscuros y con una mayor capacidad de retención de agua. Se considera que estos suelos han tenido una evolución más larga y, usualmente, presentan deficiencia de fósforo y azufre, lo que es un limitante para actividades agrícolas. Son comunes en sitios donde el desarrollo de los suelos ha tenido suficiente tiempo sin la adición de materiales volcánicos frescos; un ejemplo está en las provincias de Cañar y Azuay, donde la influencia del volcanismo reciente ha sido limitada (Buytaert, et al., 2006a).

Un tipo de suelo importante en los páramos, y que ha ganado protagonismo en investigaciones recientes, son los Histosoles. Se trata de suelos formados mayoritariamente por componentes orgánicos de origen vegetal o animal. La distribución de estos suelos no se rige por el tipo de material parental, sino por la presencia de depresiones o áreas en las que se facilita la acumulación de materia orgánica y agua. Estos humedales de montaña se denominan turberas (norte de los Andes) o bofedales (Andes centrales y sur) (Hribljan et al., 2016). Los estudios para este tipo de suelos en los páramos son aún escasas, por tal razón, esta sección pone énfasis en los procesos relacionados con la formación de suelos de origen volcánico.

Finalmente, en el extremo sur del Ecuador (provincias de Loja-Zamora), existen suelos de páramo desarrollados sobre depósitos no volcánicos y más antiguos. Algunos de estos suelos presentan características similares a los Andosoles no alofánicos debido a procesos de pedogénesis convergente. Otros suelos presentes en estas regiones son Ultisoles y Spodosoles (Podwojewski y Poulénard, 2000) que se caracterizan por tener un alto contenido de argilita y óxidos, respectivamente. Finalmente, es necesario mencionar que los estudios de suelos de páramo en la región sur del Ecuador son escasos y la información disponible respecto a las características de estos suelos es incipiente.

¿Por qué son tan especiales los suelos de los páramos?

Los páramos son reconocidos por sus invaluable servicios ambientales: se ha resaltado su importancia en la regulación y provisión de agua para muchas poblaciones humanas, así como también su importancia en el ciclo global del carbono. Muchos de estos servicios ambientales están estrechamente relacionados

con los suelos en los que los páramos se desarrollan, en el caso del Ecuador, mayoritariamente Andosoles. Estos tienen un conjunto de características físicas, químicas y mineralógicas que se consideran únicas y les distinguen de otros órdenes de suelo. Estas propiedades están relacionadas con la litología del material parental en los cuales estos suelos se forman, particularmente, la abundante presencia de vidrio volcánico rico en sílice, el cual es clave para los procesos de formación de suelo.

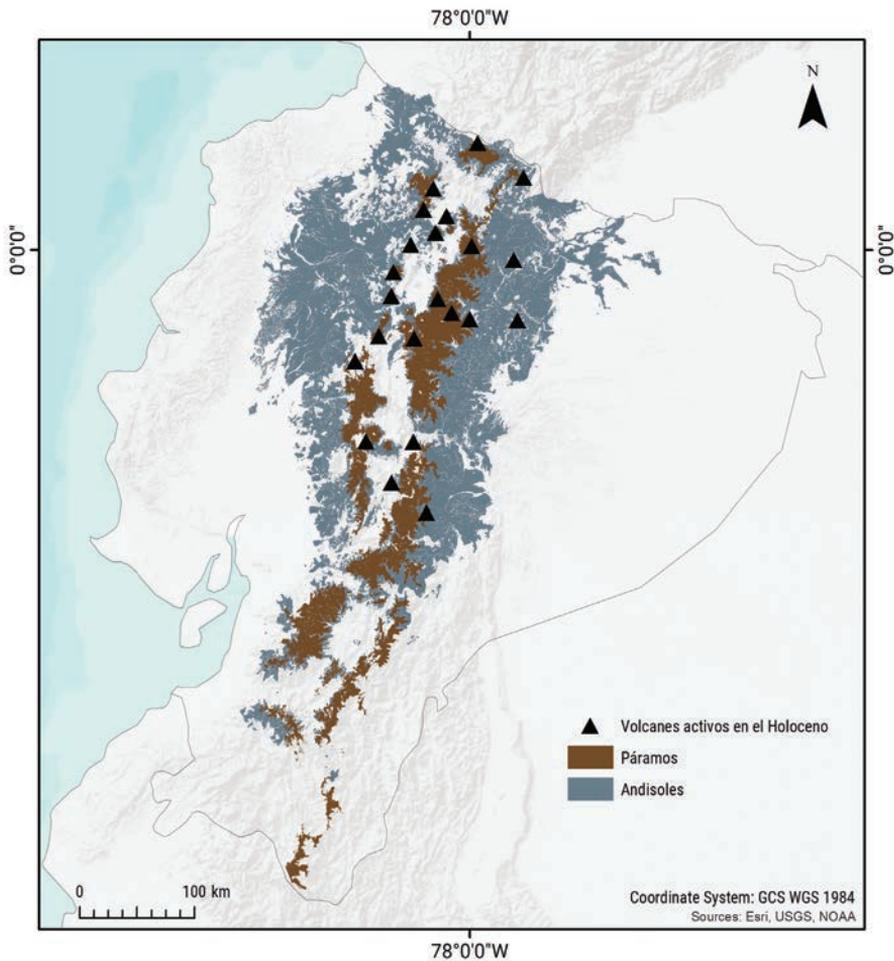


Figura 2.3. Distribución de los Andosoles en el Ecuador continental. Se han superpuesto los límites del páramo para el año 2018 así como los centros volcánicos activos durante el Holoceno. Fuentes: SIGTIERRAS (2017), MAE (2018) y GVP (2023)

En términos de extensión, a nivel global los Andosoles cubren menos del 2 % de la superficie total de la tierra libre de hielo. Sin embargo, dan soporte a alrededor del 10 % de la población mundial, incluyendo algunos de los centros poblados con más densidad poblacional a nivel mundial, como ciudad de México y Tokio. Esto se atribuye a su alta fertilidad natural, la que es el resultado de la conjunción de propiedades químicas y físicas, que rara vez se observan en suelos derivados de otros materiales (Dahlgren et al., 2008; Neall, 2009; Delmelle et al., 2015). En el Ecuador, los Andosoles cubren alrededor del 19 % del área total del país (SIGTIERRAS, 2017). En la Figura 2.3 se muestra la distribución de los Andosoles para el Ecuador continental en relación con la distribución espacial de los páramos para el año 2018 (MAE et al., 2018). Es notorio que virtualmente la totalidad de los páramos de las zonas norte y centro se asientan sobre suelos definidos como Andosoles. La distribución espacial de los Andosoles está estrechamente ligada a la historia volcánica de los Andes ecuatorianos y se han desarrollado en zonas donde la actividad volcánica ha tenido actividad reciente (zona central) o más antigua (zonas norte y sur).

Los suelos volcánicos tienen también un rol importante en términos de almacenamiento de carbono, dado que almacenan al menos el 5 % del carbono orgánico del suelo total a nivel global (hasta un metro de profundidad). De entre los suelos minerales, los suelos volcánicos son uno de los órdenes que mayor cantidad de carbono acumulan (Eswaran et al., 1993; McDaniel et al., 2012). Los suelos volcánicos, en general, cumplen funciones ambientales importantes; para el caso de los Andes, actúan como vastos reservorios de agua que regulan el ciclo hidrológico, almacenando y liberando agua (Buytaert y de Bièvre et al., 2012; Buytaert et al., 2004). En las subsecciones siguientes se describen las principales propiedades que hacen que los suelos de los páramos, particularmente los Andosoles, sean tan característicos.

Propiedades mineralógicas de los Andosoles

En suelos volcánicos se puede encontrar una alta gama de arcillas, entre ellas gibbsita, caolinita, vermiculita, esmectita y óxidos cristalinos de hierro (goetita, cristobalita). Sin embargo, las arcillas de mayor importancia y que confieren a los suelos volcánicos sus características ándicas son alófano, imogolita, halloysita, ferrihidrita y complejos húmicos con hierro (Fe) y aluminio (Al) (Zehetner et al., 2003; Theng y Yuan, 2008; Parfitt, 2009; Delmelle et al., 2015).

Estas arcillas son pobremente cristalinas, es decir, no tienen una estructura ordenada en grandes escalas y se forman por la precipitación acelerada de silicio, hierro y aluminio que se liberan en la solución del suelo, producto de la alteración

rápida del vidrio volcánico debido a la meteorización (Dahlgren et al., 2004; Neall, 2009). El vidrio volcánico es muy abundante en depósitos volcánicos y es un material muy sensible a la meteorización por el alto grado de desorden en sus componentes. Se ha demostrado en laboratorio que el vidrio volcánico se disuelve mucho más rápido que su contraparte cristalina con la misma composición química (Delmelle et al., 2015). La alteración del vidrio volcánico se produce por la rápida disolución e hidrólisis por el ácido carbónico presente en el agua, normalmente en condiciones moderadamente ácidas y húmedas. La formación preferencial de estos minerales (imogolita/alófono) se debe a que la precipitación de sustancias poco cristalinas es cinéticamente más favorable que la formación de minerales cristalinos ordenados (Ugolini y Dahlgren, 2002; Theng y Yuan, 2008; Delmelle et al., 2015).

En suelos volcánicos entre débil y medianamente meteorizados, tres ensambles de minerales tienden a dominar. El primero, formado exclusivamente por complejos organometálicos, frecuentemente asociados con silicatos 2:1 intercalados con grupos hidroxil-Al y sílice opalino; el segundo ensamble está dominado por alófono e imogolita; y el tercer ensamble está dominado por halloysita.

El ensamble de minerales en el suelo que se forma en materiales volcánicos varía ampliamente y depende de múltiples factores como la composición del material parental, el grado de meteorización, el pH, la temperatura del suelo, el régimen de humedad y la acumulación de materia orgánica (Lowe et al., 1986, Shoji et al., 1993b). Se sabe que el silicio juega un papel determinante en el tipo de mineral que se forma en función de su concentración en la solución del suelo (Joussein et al., 2005, Singleton et al., 1989). Así, en sitios con abundante precipitación y buen drenaje, se promueve la baja concentración de silicio en solución, favoreciendo la formación de alófono. Por otra parte, en sitios con menor disponibilidad de agua o mal drenaje, se favorece la formación de Halloysita al incrementarse la concentración de silicio en la solución de suelo. Los complejos organometálicos tienden a dominar en sitios con abundante precipitación cuando las bajas concentraciones de silicio impiden la formación de alófono.

Alófono es un nombre grupal que se da a una serie de aluminosilicatos hidratados no cristalinos, que ocurren naturalmente en suelos de origen volcánico. Se denominan aluminio-silicatos al estar formados por aluminio y silicio en diferentes proporciones. Este es un mineral que consiste en pequeñas esférulas huecas, con diámetros que varían entre 3,5 a 5 nm con paredes de grosor variable entre 0,7 y 1 nm. Este mineral poco cristalino se caracteriza por su tamaño pequeño, alta superficie específica y su carga eléctrica variable (Harsh et al., 2002).

La imogolita, por su parte, es un mineral pobremente cristalino que se presenta en forma de hilos o filamentos huecos, con diámetros externos que varían entre

0,7 y 2 nm. La ocurrencia de los dos minerales mencionados (alófano e imogolita) es, en la mayoría de los casos, simultánea (Nanzyo, 2002; McDaniel et al., 2012).

Los minerales amorfos (alófano/imogolita) son relativamente inestables y se los considera un producto intermedio entre el vidrio volcánico y minerales de arcilla más estables como caolinita o gibbsita. Esta sucesión es evidente en suelos desarrollados, donde la presencia de alófano se reduce a la par que la presencia de otros minerales, como la gibbsita, se incrementa (Neall, 2009). El alófano y la imogolita tienen superficies específicas muy altas (700 a 1500 m²g⁻¹) lo que, sumado a su carga eléctrica variable, explica la fuerte afinidad de estos materiales por agua, cationes metálicos, moléculas orgánicas y otras partículas minerales (Harsh et al., 2002; Theng y Yuan, 2008). Algunas de las propiedades claves de los Andosoles (alofánicos) están estrechamente relacionadas con el contenido y las características de estos materiales.

La diferencia en la mineralogía dominante de los suelos volcánicos permite clasificarlos en Andosoles alofánicos, en los cuales la fracción coloidal está dominada por alófano/imogolita, y Andosoles no alofánicos, en los cuales la especie dominante son los complejos organometálicos. Los suelos vítricos corresponden a suelos que no han desarrollado el carácter alofánico o no alofánico, porque se encuentran en etapas muy tempranas de desarrollo; normalmente son suelos jóvenes, con edades menores a 2000 años. En estos suelos jóvenes, el contenido de minerales secundarios es bajo, el cual paulatinamente incrementa en función de las características ambientales, el tiempo y la naturaleza del material parental.

Propiedades físicas de los Andosoles

Como se ha manifestado, los suelos volcánicos se caracterizan por su alta capacidad de retención de agua, alta porosidad, alta permeabilidad, alta friabilidad, baja densidad aparente y la estabilidad de los agregados del suelo. Estas características se asocian a la abundancia de materiales poco cristalinos y a la alta concentración de materia orgánica (Nanzyo, 2002; Dahlgren et al., 2004; McDaniel et al., 2012).

Los suelos volcánicos son usualmente livianos y fáciles de excavar a causa de su baja densidad aparente (menor a 0,9 g/cm³), y la ausencia de arcillas cohesivas. Su alta porosidad permite que las raíces penetren fácilmente, constituyéndose en excelentes medios de enraizamiento. Sin embargo, esta misma peculiaridad les hace susceptibles a la erosión hídrica y eólica cuando se retira la cobertura vegetal que les protege (Nanzyo, 2002; Dahlgren et al., 2004). Los horizontes superficiales A de estos suelos frecuentemente presentan estructura granular, mientras que los horizontes más profundos presentan estructuras débiles de bloques subangulares (Parfitt, 2009; McDaniel et al., 2012).

Una de las características físicas más importantes de los suelos volcánicos es su alta capacidad de retención de agua (Nanzyo, 2002; Dahlgren et al., 2004; Dahlgren, 2008). Esta propiedad es el resultado de una alta porosidad y un rango amplio de distribuciones de tamaño de poro. Los microporos en los materiales no cristalinos y complejos húmicos-metal retienen agua higroscópica, mientras que los meso y macro poros retienen agua capilar y gravitacional, respectivamente. El contenido de humedad de muchos Andosoles puede exceder en 100 % en peso. La capacidad de retención de agua se incrementa con el contenido de minerales de tamaño de arcilla, por lo que aumenta conforme los suelos se desarrollan en el tiempo; así, los suelos vítricos suelen tener retenciones menores que los suelos más desarrollados alofánicos o no alofánicos (Dahlgren et al., 2004; McDaniel et al., 2012). El efecto que tienen sobre esta propiedad, el alófono, la imogolita y la ferrihidrita es importante; sin embargo, es mucho menor que el efecto de los complejos húmicos con metales en suelos no alofánicos (Dahlgren et al., 2008). Los suelos volcánicos tienen una larga proporción de poros grandes e intermedios, lo cual facilita el transporte de agua. La infiltración y las conductividades hidráulicas saturada y no saturada son rápidas comparadas con la mayoría de otros suelos.

Otra característica típica de los Andosoles es la tixotropía, que es una transformación reversible gel-suelo. La mayor parte de los suelos volcánicos presentan una textura grasa al tacto. Estos suelos pueden contener grandes cantidades de agua y parecer relativamente secos. Una vez más esta propiedad se relaciona con la presencia de minerales amorfos, particularmente el alófono y, en suelos no alofánicos, microporos que se forman en los agregados. Cuando estos suelos son perturbados por presión, el agua es liberada pudiendo alcanzar el límite líquido y comportarse como tal, fluyendo (Dahlgren et al., 2008; Neall, 2009; McDaniel et al., 2012; Delmelle et al., 2015). Esta característica hace que estos suelos sean susceptibles a causar flujos de lodo y escombros cuando se ubican en pendientes, particularmente en el caso de los suelos alofánicos (Basile et al., 2003, Vásconez et al., 2022).

Con estas características únicas, los Andosoles son, a la vez, suelos sensibles ante cambios ambientales; por ejemplo, muchos Andosoles presentan cambios irreversibles cuando se secan, particularmente aquellos con contenidos de alófono elevados. Al secarse, las nanoesferas de alófono colapsan y forman agregados los cuales no se fragmentan al rehidratarse, por lo que se puede decir que son 'esponjas de un solo uso'. Este fenómeno puede causar la formación de costras, cambios en la densidad aparente (incremento), reducción de la capacidad de almacenamiento de agua, e incremento en las

fuerzas cohesivas variando sus propiedades físicas únicas (McDaniel et al., 2012; Delmelle et al., 2015).

Propiedades químicas de los Andosoles

La mayor parte de los Andosoles son ácidos con valores de pH (medido en agua) que varían entre 4,8 y 6,0 (Shoji et al., 1993a). Los suelos no alofánicos tienden a ser ligeramente más ácidos (pH menor a 5) que los suelos alofánicos (pH entre 5,5 a 6,5). La acidez del suelo tiende a aumentar en suelos más maduros, bien desarrollados, como los del sur del Ecuador. En etapas tempranas del desarrollo de estos suelos, es posible encontrar suelos con pH mayores a 6,5 debido a la recarga de cationes básicos presentes en los materiales parentales básicos. En condiciones de pH menores a 5, los Andosoles pueden presentar toxicidad por aluminio, particularmente los suelos no alofánicos. En condiciones ácidas, se puede dar lugar al aumento de la concentración de Al en solución, lo cual afecta negativamente a las raíces de las plantas, evitando su proliferación y, consecuentemente, inhibiendo su crecimiento. Los suelos alofánicos son menos susceptibles a presentar toxicidad por aluminio (Dahlgren et al., 2004; Delmelle et al., 2015)

Una de las características más distintivas de los Andosoles es su carga eléctrica variable, dependiente del pH. El alofano, la imogolita, la ferrihidrita y los complejos húmicos con metal poseen superficies reactivas muy grandes. La carga eléctrica en la superficie de estos materiales puede ser positiva o negativa y cambia en función del pH. Las superficies tienen cargas positivas a pH bajos y retienen aniones, mientras que a pH altos las superficies tienen carga negativa y retienen cationes. Esta interacción es particularmente importante con el fósforo, un macronutriente clave requerido por las plantas, disponible en forma de fosfato (anión). Al ser el pH usualmente ácido en Andosoles, estos tienen una gran afinidad por el fosfato, reteniéndolo irreversiblemente dentro de las estructuras minerales, lo que lo hace inaccesible para las raíces de las plantas. Como consecuencia de esta propiedad, en Andosoles agrícolas existe un déficit de fósforo, el cual debe ser suplido externamente. Esta deficiencia, relacionada con la carga variable de los andosoles, también puede ser asociada con deficiencia de azufre (McDaniel et al., 2012; Delmelle et al., 2015).

Los suelos volcánicos normalmente son apetecidos por sus excelentes características para la agricultura y usualmente son suelos fértiles. Sin embargo, se han reportado suelos con deficiencias de nutrientes, particularmente aquellos que se desarrollan en materiales parentales ricos en sílice.

En resumen, las características únicas de estos suelos están fuertemente relacionadas con la presencia de minerales secundarios muy particulares. Los

suelos de los páramos son especiales por presentar una combinación única de propiedades químicas, físicas y mineralógicas, las cuales en conjunto proveen a estos suelos de sus cualidades.

Algunas propiedades de los Histosoles

Los Histosoles se caracterizan por estar formados de materiales orgánicos de origen animal o vegetal. Las propiedades de los Histosoles resultan de la naturaleza de sus materiales parentales orgánicos. Estos suelos se forman cuando la acumulación de materia orgánica supera las tasas de descomposición. En la mayor parte de suelos naturales existe cierto equilibrio entre los dos procesos, manteniendo el carbono orgánico en los horizontes superficiales entre 0,5 y 10 %. En los Histosoles, las tasas de descomposición son ralentizadas y la materia orgánica se acumula al punto de alcanzar espesores considerables. Por ejemplo, en un humedal del Parque Nacional Cayambe Coca, Comas et al. (2017) reportaron espesores de cerca de 7 m. En la mayoría de los casos, este proceso de ralentización de la descomposición se debe a la formación de condiciones anaeróbicas (por saturación de agua), lo que hace que la descomposición de materia orgánica sea poco eficiente. La formación de Histosoles se ve favorecida en climas húmedos y fríos. En este sentido, el páramo ofrece las condiciones adecuadas para su formación (Kolka et al., 2012).

Si bien el clima controla la ocurrencia de los Histosoles a nivel regional, a nivel de paisaje este control lo ejerce la topografía. Los Histosoles ocurren en sitios donde la configuración del paisaje favorece la concentración del escurrimiento, la descarga de agua subterránea o la retención de lluvia. Estas condiciones comúnmente se facilitan en depresiones topográficas o en áreas muy planas, con sustratos poco permeables, como flujos de lava en el caso de los páramos (Kolka et al., 2012). En los páramos ecuatorianos es común que los Histosoles reciban contribuciones minerales debido a la actividad volcánica, las cuales, al ser mucho menores que las entradas de materia orgánica, pasan a formar parte de estos suelos, manifestándose como discontinuidades en los perfiles (capas con diferentes propiedades) (Hribljan et al., 2016; Comas et al., 2017).

Se podría decir que en el Ecuador la mayor parte de páramos presentan condiciones climáticas y topográficas para la formación local de Histosoles. Se han reportado Histosoles para la mayor parte de regiones de páramo del Ecuador, independientemente de su litología, edad o actividad volcánica. En áreas de la zona norte de los páramos, la presencia de Histosoles ha sido reportada en la provincia del Carchi (Tonnejck et al., 2010; Jansen et al., 2011); Napo, Pichincha (Hribljan et al., 2016; Comas et al., 2017); y Azuay (Quichimbo et al., 2012; Mosquera et al., 2015; Borja et al., 2018; Lazo et al., 2019).

Las propiedades físicas de los Histosoles difieren bastante de los suelos minerales. Generalmente presentan densidades aparentes muy bajas de entre 0,02 hasta 0,8 g.cm⁻³. La densidad aparente de estos suelos se correlaciona con el grado de alteración de la materia orgánica; así, mientras más descompuestos se presentan los materiales orgánicos que componen estos suelos, mayor es la densidad aparente que presentan. Los Histosoles manifiestan altos niveles de porosidad, lo que, sumado a su baja densidad aparente, produce que tengan elevadas conductividades hidráulicas, las cuales decrecen conforme se descomponen los materiales que los conforman. Así, también dada su alta porosidad, estos suelos tienen altas capacidades de retención de agua (Kolka et al., 2012).

Una de las características más sobresalientes de los Histosoles es su capacidad de almacenar carbono. A nivel global, aunque ocupan aproximadamente el 4 % de la superficie total, almacenan cerca del 30 % del carbono del suelo a nivel global (Eswaran et al., 1993). A modo de comparación, mientras típicamente los suelos agrícolas almacenan entre 2 a 10 kg C.m⁻², los Histosoles pueden presentar valores mayores a 200 kg C.m⁻² (en los dos primeros metros de profundidad) (Batjes, 1996). Para algunos humedales en la región del volcán Antisana y Cayambe Coca se reportaron cantidades de carbono almacenado de alrededor de 128,2 kg C.m⁻² (Hribljan et al., 2016).

Contenido de carbono de los Andosoles

La acumulación de materia orgánica en el suelo es una característica principal de los Andosoles. El proceso de andosolización es la acumulación de sustancias húmicas estables en condiciones subácidas (Takahashi et al., 2010; Takahashi y Dahlgren, 2016). Los Andosoles están entre los órdenes de suelo que mayor cantidad de carbono almacenan por unidad de área, tan solo superados por los Histosoles. El carbono almacenado en los Andosoles es altamente estable ante la descomposición, como se ha mencionado en secciones anteriores. El carbono orgánico en los Andosoles es relativamente estable y puede serlo por entre 1000 y 5000 años, el tiempo de residencia medio del carbono orgánico en suelos (COS) en Andosoles es mucho más grande que otros tipos de suelo minerales (Takahashi et al., 2010; Takahashi y Dahlgren, 2016).

Los ecosistemas de páramo almacenan carbono principalmente en el suelo con *stocks* de hasta 200 t.ha, en los primeros decímetros de suelo y hasta 1700 t en los dos primeros metros de suelo (Calderón-Loor et al., 2013). A modo de comparación, los bosques amazónicos almacenan entre 125 y 175 t.ha⁻¹ en el suelo. Los suelos volcánicos no solo almacenan grandes cantidades de carbono, sino que tienen altas tasas de acumulación, particularmente al inicio de su formación;

así, para Andosoles menores de 1000 años (vitrícos), la tasa de acumulación de carbono varía entre 0,03 y 0,06 kg C/m²/año, mientras que la tasa media de acumulación en suelos en general, considerando prácticas regenerativas, varía entre 0,01 y 0,05 kg C.m⁻².año⁻¹ (Zehetner, 2010; Arnalds, 2013).

Los suelos del páramo almacenan grandes cantidades de carbono, excediendo el promedio global para Andosoles. Algunos valores de referencia para los páramos ecuatorianos se muestran en la Tabla 2.1. Únicamente se han considerado valores publicados para Andosoles en referencias bibliográficas; se sabe que los Histosoles almacenan cantidades más altas de carbono.

Tabla 2.1 Valores de carbono orgánico almacenado en el suelo de páramos seleccionados, hasta 30 cm de profundidad.

Autor	C almacenado (kg C.m ⁻²)	Altitud (m)	Sitio
Tonneijck et al. (2010)	22±5	3300-3900	Páramo de El Ángel
Calispa et al. (2021)	20±2,7	4000-4100	Antisana (Jatunhuaico)
Minaya et al. (2016)	17,5	4000-4750	Antisana (Cuenca Humboldt)
Podwojewski et al. (2002)	16	3800-4200	Chimborazo
Calderón et al. (2020)	11,58	3900-4100	Pichincha
Echeverría et al. (2018)	13,2	4100	Chimborazo (Iguualata)
Farley et al. (2013)	13,5±0,2	3650	Imbabura
FAO (2017)	10,2	-	Promedio global Andosoles

La mayor parte de los suelos de los páramos ecuatorianos almacenan una mayor cantidad de carbono que el promedio global para Andosoles (véase la Tabla 2.1). Sin embargo, existen variaciones importantes entre diferentes tipos de páramo, e incluso a escalas menores, por la interacción de variables locales como la topografía, el microclima y el manejo de los páramos. Pese a que es evidente que los suelos de páramo retienen grandes cantidades de carbono, aún existen vacíos de investigación en este campo.

Desafortunadamente, de la misma manera en que los suelos del páramo pueden constituirse en sumideros de carbono, en casos de perturbación el carbono almacenado puede ser liberado a la atmósfera, contribuyendo al incremento de la concentración de CO₂ y, por tanto, al efecto invernadero (Shoji y Takahashi, 2002, Tonneijck et al., 2010), de forma similar a lo que ocurre con la pérdida del permafrost. Se ha observado que en aquellos páramos donde los pajonales han sido reemplazados por almohadillas, debido principalmente a actividades ganaderas,

la cantidad de carbono almacenada en estos suelos decrece significativamente (Farley et al., 2013; Calispa et al., 2021) y se producen perturbaciones en su estabilidad, haciéndolo posiblemente más sensible a procesos biológicos de degradación de materia orgánica del suelo (Curiel-Yuste et al., 2017). Sin embargo, otros estudios en zonas de páramo reemplazadas por actividades forestales sugieren que estos hallazgos no son generalizables (Marín et al., 2019).

A pesar de que los páramos almacenan naturalmente grandes cantidades de carbono en el suelo, existe una preocupación de que esta capacidad se vea afectada en escenarios de cambio climático y el incremento de las actividades antrópicas sobre estos ecosistemas.

El proceso de formación de los suelos volcánicos

En los Andosoles, los procesos de formación del suelo (pedogénesis) predominantes son la formación de materiales poco cristalinos (compuestos activos de aluminio y hierro) principalmente alófano, ferrihidrita, imogolita y complejos organometálicos, y la acumulación de materia orgánica (Shoji et al., 1993a, b, 1996; McDaniel et al., 2012). La formación de materiales poco cristalinos está relacionada directamente con las propiedades del material parental, en este caso materiales de origen volcánico con contenidos elevados de aluminio, silicio y hierro.

El tipo de minerales que precipitan de esta solución formada por la liberación de elementos del material parental está condicionado por la lixiviación, que depende de las condiciones ambientales, particularmente de la cantidad de lluvia y el drenaje. En zonas con altas tasas de precipitación y buenas condiciones de drenaje se favorece la lixiviación de elementos; en consecuencia, las concentraciones de silicio en la solución del suelo son bajas, lo que facilita la formación de minerales poco cristalinos como alófano e imogolita (enriquecidos en aluminio). Por el contrario, en sitios con menor disponibilidad de agua, ya sea por tasas menores de precipitación o drenaje reducido, la concentración de elementos en la solución incrementa, lo que favorece la precipitación de halloysita, enriquecida en silicio (Parfitt et al., 1983, 1984; Singleton et al., 1989; Churchman y Lowe., 2012).

El alófano y la imogolita son estables a pH entre 5 y 7 y bajo contenido de materiales orgánicos. Por el contrario, en ambientes donde el pH es menor a 5 (ácidos) y con disponibilidad de materia orgánica, se favorece la formación de complejos organometálicos en lugar de alófano/imogolita. En suelos volcánicos es típico que el contenido de alófano sea menor en horizontes superficiales debido a la constante adición de materia orgánica que compite por aluminio. A este

proceso se le conoce como ‘efecto antialofánico’ y describe la incorporación preferencial de aluminio en moléculas de materia orgánica para formar complejos organometálicos, evitando o reduciendo la formación de alófano (Ugolini y Dahlgren, 2002; Dahlgren et al., 2008; Delmelle et al., 2015).

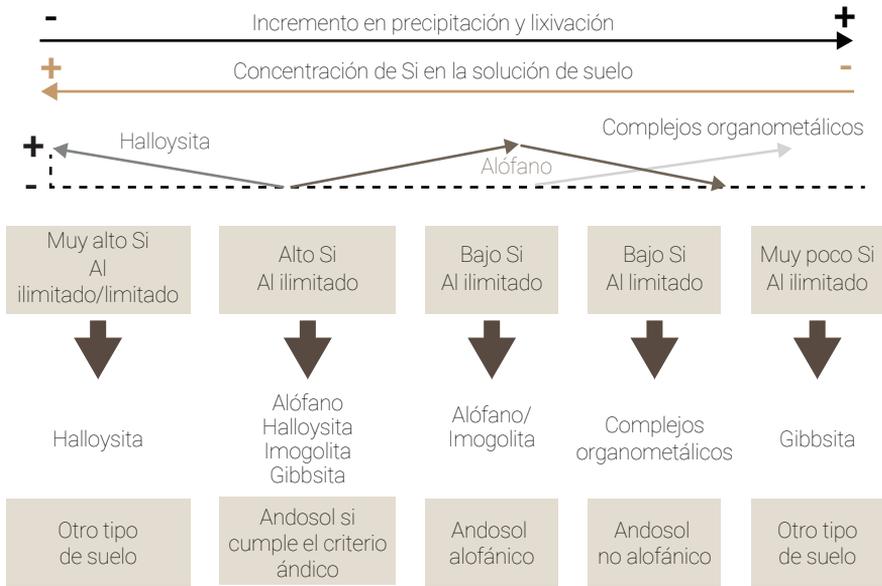


Figura 2.4 Esquema simplificado de la meteorización de depósitos volcánicos recientes y del efecto de las condiciones de drenaje del suelo y la formación de minerales secundarios en depósitos volcánicos recientes. Si=silicio, Al=aluminio. Fuente: Adaptado de Parfitt et al., (1983), Churchman et al. (2012; McDaniel et al. (2012), Arnalds (2013) y Delmelle et al. (2015)

Con el paso del tiempo y la alteración del material parental, los suelos volcánicos desarrollan el carácter ándico que es el criterio base para definir un Andosol. El carácter ándico incluye baja densidad aparente, alta capacidad de retención de agua y alto contenido de materia orgánica (WRB, 2015). Estas propiedades pueden desarrollarse relativamente rápido (200 a 300 años) en zonas húmedas, mientras que en zonas frías y secas este proceso puede tardar más de 10 000 años (Arnalds, 2004; McDaniel et al., 2012). El carácter de Andosol puede mantenerse relativamente estable en el tiempo si hay pequeñas adiciones de material volcánico, lo que rejuvenece el suelo. Cuando los suelos no son rejuvenecidos, los Andosoles no son estables en periodos largos de tiempo (>10 000-20 000 años) y la meteorización continúa hacia otros tipos de suelo más desarrollados, como los Mollisoles (Shoji et al., 1990). Esta transformación incluye la transición gradual de

minerales poco cristalinos a minerales más estables como caolinita y vermiculita, dependiendo de las condiciones ambientales (Arnalds, 2013; Delmelle et al., 2015).

El segundo proceso característico de la formación de Andosoles es la acumulación de materia orgánica del suelo (MOS). Esta acumulación se debe a la suma de varios procesos que ocurren en el proceso de meteorización del material volcánico. Los Andosoles presentan una alta fertilidad natural, lo que se traduce en muchos casos en una alta entrada de residuos orgánicos debido al crecimiento de la vegetación. Sin embargo, la característica más importante de la materia orgánica incorporada en el suelo es su estabilidad contra la descomposición. Esto se debe a la formación de complejos organometálicos, principalmente Al-humus, y la absorción de la materia orgánica en alófano, imogolita y ferrihidrita. Además de: 1) la baja actividad de microorganismos en el suelo debido a bajos pH y altos niveles de aluminio tóxico; 2) la protección física de la MOS debido a la alta porosidad de los suelos con abundantes microagregados; y 3) la presencia de carbón en suelos melánicos (Percival et al., 2000; Ugolini y Dahlgren, 2002; Nishimura et al., 2008; Takahashi et al., 2010).

Adicionalmente, en los páramos la temperatura fría hace que la actividad biológica se ralentice, favoreciendo la acumulación de materia orgánica en el suelo. Los páramos presentan un clima típico tropical de montaña, frío y húmedo, con intensidades de precipitación bajas, variaciones diurnas de temperatura amplias de hasta 20 °C y radiación solar intensa. La temperatura media ronda los 10 °C en los límites inferiores del páramo (~3500 m) hasta cerca de 0 °C en su límite superior (~5000 m). La precipitación en los páramos es muy variable. En las estribaciones de los Andes orientales puede exceder los 3000 mm/año, mientras que en algunas regiones de páramo seco se han reportado valores de precipitación inferiores a 500 mm/año (provincia del Chimborazo) (Buytaert et al., 2005; Correa et al., 2020).

En conclusión, la formación de suelos volcánicos está gobernada por dos procesos principales: 1) la formación de materiales poco cristalinos debido a la precipitación acelerada de especies de aluminio, silicio y hierro, los cuales son abundantes en el vidrio volcánico proveniente de la ceniza; y, 2) la acumulación/estabilización de la materia orgánica. Las especies minerales formadas en el proceso de andosolización dependen del tipo de material parental y de las condiciones climáticas.

Distribución espacial de los suelos volcánicos en los páramos ecuatorianos

La cordillera de los Andes en el Ecuador se puede dividir en tres regiones con base en la actividad volcánica (véase el apartado Fenómenos volcánicos asociados a

la formación de suelo en el páramo ecuatoriano). Los suelos de los páramos se relacionan con esta distribución espaciotemporal de la actividad volcánica y es posible encontrar una gama de suelos volcánicos, con diferente grado de desarrollo, así como propiedades, función del clima, la disponibilidad y tipo del material parental, además de la edad de estos depósitos.

Zonas norte y centro

Los suelos en las regiones norte y centro de la cordillera de los Andes del Ecuador son generalmente profundos, con múltiples capas y horizontes enterrados, producto de erupciones volcánicas sucesivas recientes (Holoceno-presente). Por ejemplo, en los volcanes Antisana y Chimborazo se han descrito columnas estratigráficas con múltiples capas y suelos enterrados de más de 10 m de espesor (Barba et al., 2008; Hall et al., 2017; Samaniego et al., 2012). En general, en estas regiones los suelos son relativamente jóvenes y con entre poco y medio desarrollo (Andosoles vítricos a suelos ándicos). En la zona norte, provincia del Carchi, se ha observado que los suelos están al borde entre un suelo vítrico y un suelo ándico pleno (Tonneijck et al., 2010). En esta zona, los depósitos volcánicos son más antiguos que en la zona central y se remontan a los principios del Holoceno. Sin el rejuvenecimiento frecuente de la zona central, los suelos de la zona norte han alcanzado un grado de desarrollo mayor.

En la Figura 2.5 se muestra un perfil de suelo en los páramos del volcán Antisana (zona centro), aproximadamente a 4000 m, hasta una profundidad de un metro. La vegetación dominante sobre el perfil de suelo es almohadilla (*Azorella pedunculata*) y corresponde a una zona en donde hubo actividades ganaderas por décadas. Este suelo se ha clasificado como un Andosol vítrico, con un alto contenido de vidrio volcánico y bajo contenido de minerales secundarios. En el perfil se observa la estratificación con horizontes fácilmente distinguibles, no solo por las diferencias de color, sino también por sus propiedades físicas; resaltan en color oscuro los horizontes enterrados 4Ab y 4Ab. La primera secuencia de formación de suelo comprende a los horizontes A1 y A2, siendo esta la más reciente, la cual se desarrolló a partir de la adición de ceniza de la erupción del volcán Quilotoa hace ~800 años AP (Hall y Mothes, 2008). Esta erupción cubrió con una capa de ceniza fina una gran parte de los Andes del centro y norte del Ecuador. Dicha adición de ceniza detuvo los procesos de formación del suelo que en ese entonces se desarrollaban en el horizonte 2Ab.

El horizonte enterrado 2Ab tuvo su origen en una erupción anterior, posiblemente de los volcanes Guagua Pichincha o Pululahua. El suelo en esta región ha sido clasificado como un Andosol vítrico (WRB, 2015) debido a su alto contenido

de vidrio volcánico, baja densidad aparente y por tener un contenido muy bajo de materiales amorfos; en consecuencia, sus características ándicas están en desarrollo (Ligot, 2018; Calispa et al., 2021). Con el transcurso del tiempo, y si no hay nuevas adiciones de materiales volcánicos, eventualmente se desarrollarán en carácter ándico.

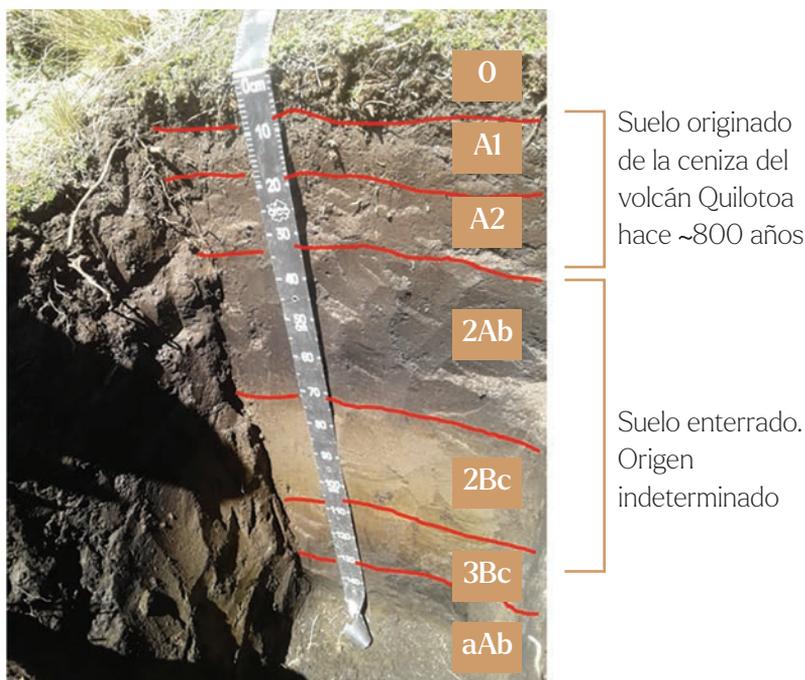


Figura 2.5 Perfil de suelo en el volcán Antisana, zona norte de la cordillera de los Andes en el Ecuador. El suelo en esta región es poligenético, con al menos dos paleosuelos o suelos enterrados que se desarrollaron antes de ser cubiertos por nuevo material volcánico que detuvo los procesos pedogénicos (Calispa et al., 2021). Fotografía: Marlon Calispa

Zona sur

En la región sur de la cordillera de los Andes ecuatorianos, los suelos se han desarrollado sobre depósitos volcánicos más antiguos y no volcánicos, expuestos en la última glaciación y minoritariamente sobre depósitos recientes de ceniza volcánica (Buytaert et al., 2007). Los suelos en esta región suelen ser poco profundos y más desarrollados que sus contrapartes en la región centro-norte. Adicionalmente, presentan mayores contenidos de carbono orgánico en el suelo, menores valores de pH y contenidos de arcilla más elevados (Tonnejck et al., 2010; Poulenard,

2000; Calispa et al., 2021; Ligot, 2018; Podwojewski et al., 2002; Buytaert et al., 2005, 2006b, 2007; Molina et al., 2019; van de Walle, 2020).

En la Figura 2.6 se puede observar un perfil de suelo típico de la región austral, con menos profundidad que los de la zona centro y con una estructura, en términos de horizontes, más sencilla. El perfil corresponde a un suelo de páramo ubicado en la cuenca del río Machángara aproximadamente a 4000 m en una zona dominada por pajonales relativamente conservados, en la provincia de Azuay. El suelo corresponde a un Andosol aluándico (no alofánico) (WRB, 2015) que se desarrolló sobre depósitos volcánicos removidos y expuestos en la última glaciación, con posibles pequeñas adiciones de ceniza durante el Holoceno (van de Walle, 2020). La diferenciación entre horizontes es mínima en contraste con el suelo de la Figura 2.5 en la zona centro.

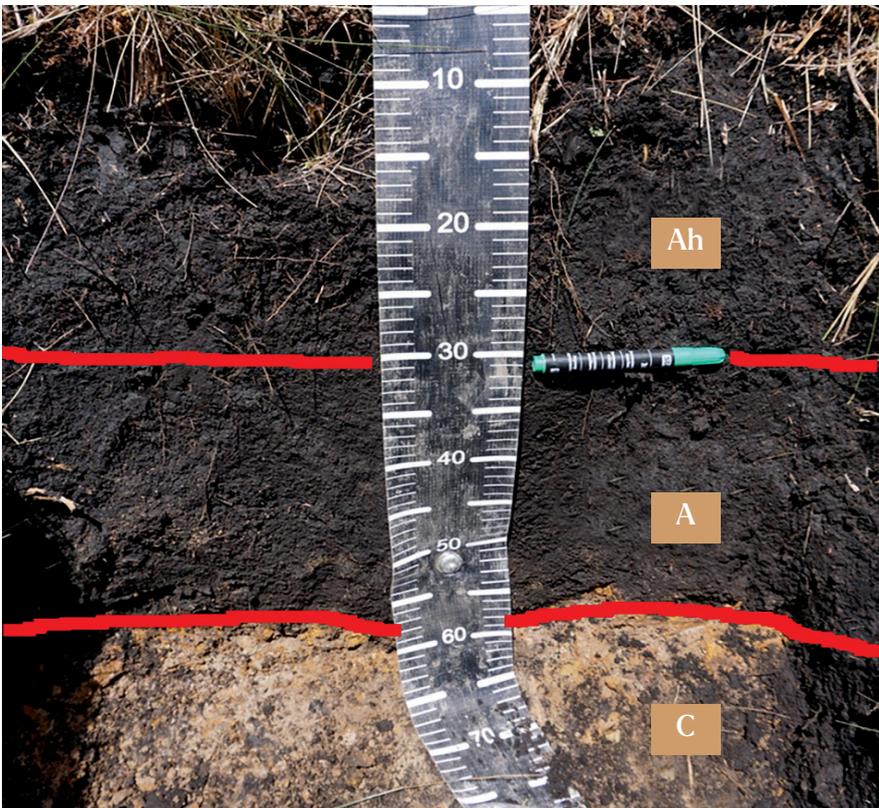


Figura 2.6 Perfil de suelo en los páramos de la provincia del Azuay (cuenca del río Machángara) (van de Walle, 2020). Los suelos son menos profundos y más desarrollados que en la zona centro. Fotografía: Marlon Calispa

Extremo sur: páramos desarrollados sobre depósitos no volcánicos

En el extremo sur del Ecuador (provincias de Loja y Zamora, hasta la frontera con Perú) se pueden encontrar páramos que se desarrollan en suelos que tienen un origen no volcánico. Esta región se caracteriza por la ausencia de materiales volcánicos y una menor altitud (Winckell et al., 1997). El principal material parental para la formación de suelo son rocas metamórficas o sedimentarias. El número de estudios de estos suelos es menor que sus contrapartes en las anteriores zonas.

En esta región, los suelos son delgados (menos de 50 cm), con alto contenido de materia orgánica y sobre paleosuelos de tipo ferralítico. Los horizontes profundos normalmente tienen un color anaranjado-rojizo y es usual encontrar cuarzo grueso entre las capas de suelo. En estos horizontes se encuentran arcillas cristalinas y la densidad aparente es mayor a $1,5 \text{ g/cm}^3$. La parte orgánica de estos suelos tiene baja densidad aparente. Estos suelos comparten algunas características con los Andosoles no alofánicos, a pesar de haberse desarrollado en otra clase de material parental. Debido a las características de drenaje que promueve una rápida lixiviación y consecuente pérdida de cationes, son suelos muy pobres. En las zonas altas de esta región se pueden encontrar suelos pertenecientes a los órdenes Inceptisol, Ferralsol, Umbrisol y Ultisol (Podwojewski y Poulénard, 2000; Moreno et al., 2022, Hofstede et al., 2014). En la Figura 2.7, se muestra un perfil de suelo de la zona de Saraguro, provincia de Loja, clasificado como Ferralsol Úmbrico (Podwojewski et al., 2022)

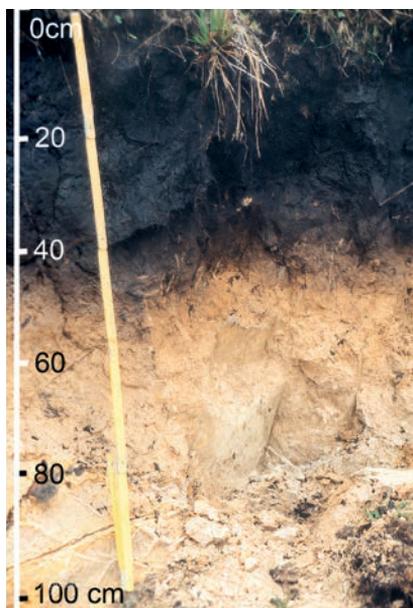


Figura 2.7 Perfil de suelo de páramo en la zona de Saraguro, provincia de Loja
Fotografía: Marlon Calispa

La distribución espacial de los Histosoles de los páramos está, de manera general, controlada por factores topográficos y el clima. Dadas las condiciones ambientales del páramo, los Histosoles pueden formarse en depresiones locales, en donde se puede acumular agua o en zonas planas de gran extensión. La distribución de los Histosoles en este sentido es difícil de predecir y han sido identificados, en mayor o menor abundancia, en la mayoría de los páramos ecuatorianos. En la Figura 2.8 se muestra un perfil de suelo calificado como Histosol en los páramos de la provincia del Azuay.

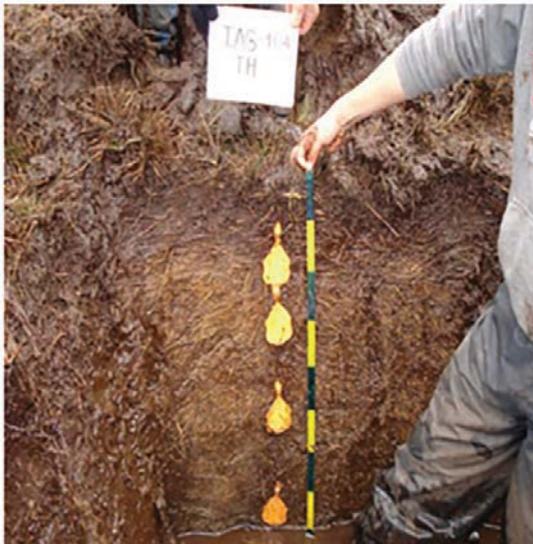


Figura 2.8 Perfil de suelo de un Histosol en los páramos de la provincia del Azuay. Fotografía: Marlon Calispa

En conclusión, la distribución de los suelos volcánicos en el Ecuador, particularmente los Andosoles está ligada a la actividad volcánica. En este sentido, en la zona centro la actividad volcánica condiciona el desarrollo de los suelos, preservando el carácter vítrico de los Andosoles debido al frecuente rejuvenecimiento de los suelos con nuevo material volcánico. Por otra parte, los suelos en la zona norte se han desarrollado por periodos de tiempo más extensos debido a una menor influencia de la actividad volcánica reciente, alcanzando una madurez mayor que se observa en sus características físicas y químicas. Sin embargo, los suelos de las zonas norte y centro no han tenido tanto desarrollo como los suelos de la zona sur, en donde la influencia volcánica reciente ha sido más restringida, permitiéndoles desarrollar el carácter ándico plenamente.

En general, el control de la formación de los Andosoles depende de la actividad volcánica, pudiendo hasta cierto punto zonificarla, pero para el caso de los Histosoles el control es más local y varía incluso a nivel de paisaje. Los estudios

relacionados con este último tipo de suelos son escasos y esto constituye un vacío de investigación significativo, dada la importancia que poseen para la dinámica del páramo, particularmente desde el punto de vista del funcionamiento hidrológico y del almacenamiento de carbono.

Factores que amenazan a los suelos de los páramos

Los páramos son ecosistemas vulnerables a los cambios ambientales cuyas funciones ecosistémicas, que han sido descritas en secciones anteriores, están en riesgo. Entre las principales amenazas páramo se pueden mencionar el cambio de uso del suelo, principalmente por agricultura y ganadería, el cambio climático y las actividades mineras (Bradley et al., 2006; Buytaert, et al., 2006c; Buytaert y de Bièvre, 2012).

La reducción de la extensión de los páramos ha sido notoria en la mayor parte del Ecuador; por ejemplo, en el norte del Ecuador, en los páramos alrededor de los volcanes Antisana y Cotopaxi, se ha observado un aumento de 838 % del área cultivada en desmedro de las zonas de páramo en el periodo 1991 a 2017. Esta tendencia seguramente es seguida por la mayor parte de páramos en el Ecuador, pero no existe un seguimiento detallado. Debido a la expansión de los asentamientos humanos, no se espera que esta tendencia disminuya en los años venideros, sino que se vea agravada por la acción del cambio climático (Thompson et al., 2021). Se ha verificado que el cambio de uso del suelo tiene impactos negativos en los ecosistemas de páramo, por ejemplo, en términos de la reducción del contenido de carbono en el suelo (Farley et al., 2013), alteraciones en los flujos de CO₂ (McKnight et al., 2017) y alteraciones en las propiedades físicas y químicas de los suelos (Calispa et al., 2021; Páez-Bimos et al., 2022, 2022a; Podwojewski et al., 2002). También se han observado cambios en la estructura y composición florística (Verweij, 1995; Ramsay y Oxley, 2001) y alteraciones en las funciones hidrológicas (Farley y Kelly, 2004; Buytaert et al., 2006a; Buytaert et al., 2011; Ochoa-Tocachi et al., 2016).

La ganadería intensiva provoca daños a la estructura vegetal nativa del páramo, alterando su composición natural y favoreciendo la distribución de especies más adaptadas al pisoteo, por ejemplo, almohadillas. Se ha observado esta tendencia en algunos páramos intervenidos, donde la vegetación nativa (pajonal) ha sido progresivamente reemplazada por almohadillas y, en casos extremos, cuando la vegetación es totalmente removida, se desencadenan procesos erosivos (Verweij, 1995; Ramsay y Oxley, 2001; Podwojewski et al., 2002). Se

puede mencionar el caso del páramo del volcán Antisana, donde las actividades ganaderas intensivas de caballos, vacas y ovejas tuvieron lugar por décadas (hasta 2011); adicionalmente, los incendios en estas áreas no eran escasos. Se presume que grandes extensiones de pajonales fueron gradualmente reemplazadas por praderas y zonas cubiertas con almohadillas (Grubb et al., 2020).

En recientes investigaciones, en la zona del volcán Antisana se han evidenciado diferencias a nivel químico y físico entre los suelos cubiertos por almohadillas y aquellos cubiertos por pajonales a la misma altitud. Con respecto a los parámetros físicos, los suelos bajo almohadillas presentan una disminución de la densidad aparente, mayor conductividad hidráulica (4 a 12 veces mayor que en suelos bajo pajonal), mayor capacidad de retención de agua en saturación y una estructura de poros diferente a la de los pajonales, lo que podría alterar su funcionamiento hidrológico (Páez-Bimos et al., 2022a). En cuanto a las propiedades químicas, los suelos bajo almohadillas poseen una mayor concentración de carbono orgánico en el suelo; sin embargo, almacenan una menor cantidad debido a una marcada disminución de la densidad aparente (Calispa et al., 2021). Adicionalmente, se ha verificado que, en suelos bajo almohadillas, la solución de suelo es mucho más concentrada con respecto a carbono orgánico disuelto (hasta 10 veces mayor en horizontes superficiales) y se ha evidenciado la movilización de hierro y aluminio posiblemente ligada a la alta concentración de materia orgánica disuelta, lo que podría tener implicaciones en la calidad del agua (Páez-Bimos et al., 2022).

Poco se conoce con respecto a la estabilidad del carbono que los suelos de los páramos almacenan. Este tema es crucial dado que de este depende el comportamiento del páramo como fuente o sumidero de carbono. Ensayos de incubación en suelos volcánicos en páramos colombianos evidencian que el carbono almacenado en el suelo es susceptible a los cambios de temperatura y que este cambio podría eventualmente alterar la capacidad de estos suelos de secuestrar carbono, incrementando potencialmente las emisiones a la atmósfera (Curiel-Yuste et al., 2017). Sin embargo, la evidencia en este sentido es aún escasa y se recomienda no hacer generalizaciones.

Los Andosoles son susceptibles a cambios irreversibles cuando se secan; estos cambios pueden comprometer sus propiedades físicas (Poulenard et al., 2003). Este fenómeno puede causar la formación de costras, incremento en la densidad aparente, reducción de la capacidad de almacenamiento de agua e incremento en las fuerzas cohesivas, haciendo que varíen sus propiedades físicas únicas (McDaniel et al., 2012; Delmelle et al., 2015). Ciertas prácticas agrícolas exponen al suelo del páramo a desecamiento, lo que podría provocar la alteración de sus características de forma irreversible.

El Capítulo 12 detalla cómo el cambio climático puede afectar también las funciones de los suelos. La mayor parte de las propiedades de los suelos se pueden ver afectadas por cambios en la temperatura y precipitación. Entre estas se incluyen los procesos de transformación del carbono y reciclaje de nutrientes, así como la erosión. Los procesos erosivos podrían verse acelerados por los eventos climáticos extremos como precipitaciones intensas, sequías y tormentas. Se espera que los efectos del cambio climático en el suelo sean variables. Procesos como la formación y desarrollo de los suelos pueden verse afectados dada su dependencia en factores ambientales, principalmente temperatura y humedad del suelo (Girija Veni et al., 2020). Existe un consenso general de que la temperatura experimentará un aumento en los Andes, con mayores anomalías sobre los Andes centrales (hasta 5 °C), particularmente en la transición entre las épocas seca a húmeda (Pabón-Caicedo et al., 2020). Con respecto a la variación de la precipitación, las señales son diversas. Estos cambios, particularmente en temperatura, podrían ejercer un efecto negativo en la estabilidad del carbono almacenado en los suelos del páramo, incrementando sus tasas de descomposición y liberándolo a la atmósfera, convirtiendo a los páramos en fuentes de CO₂ en lugar de sumideros (McKnight et al., 2017; Cresso et al., 2020).

Las conclusiones de los estudios respecto a los efectos del cambio climático en el carbono orgánico del suelo no son enteramente claras y más información es necesaria (Kowalska y Grobelak, 2020). Algunos estudios apuntan al aumento de las tasas de descomposición de las fracciones lábiles del carbono orgánico en el suelo (COS), mientras que, para la fracción recalcitrante, los hallazgos no son concluyentes (Davidson y Janssens, 2006). Sin embargo, otros estudios concluyen que la sensibilidad de las fracciones lábil/recalcitrante son igualmente sensibles ante cambios de temperatura (Fang et al., 2005).

Perspectivas y vacíos de investigación

Pese a la gran importancia de los suelos de los páramos, existen aún grandes vacíos en el conocimiento que urgen ser resueltos para garantizar el manejo sustentable de uno de los pilares en el funcionamiento del páramo. Históricamente, la mayoría de los estudios se han enfocado de forma dominante en las propiedades hidrológicas de estos suelos y en menor medida en sus procesos de formación. Además, dada la predominancia espacial de los suelos volcánicos, particularmente Andosoles, casi la totalidad de estudios se han enfocado en este tipo de suelos.

Recientemente, varias investigaciones han resaltado la importancia de otros tipos de suelos en los páramos ecuatorianos, principalmente los Histosoles. Estos son importantes para el funcionamiento del páramo en términos de regulación

hidrológica, calidad del agua y almacenamiento de carbono. Sin embargo, y pese a su importancia, el conocimiento respecto a estos suelos es aún muy limitado. Por ejemplo, no existen caracterizaciones geoquímicas detalladas de estos suelos y el rango espacial de los estudios existentes es muy limitado.

Dadas las condiciones climáticas, geológicas y biológicas del Ecuador, la variedad de suelos que se pueden desarrollar, así como sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas, son muy amplias. Existen vacíos de investigación respecto al estudio profundo de las propiedades de estos suelos en diferentes condiciones climáticas, en las zonas norte, centro, estribaciones orientales y occidentales de las cordilleras, y en el extremo sur del país. Para el caso de las estribaciones, existen descripciones generales de las propiedades fisicoquímicas y mineralógicas de estos suelos, que se remontan a los años sesenta, pero poco se sabe de la distribución espacial de sus propiedades. En el caso del extremo sur, la situación es aún más crítica y prácticamente no hay descripciones detalladas de sus páramos.

Se sabe que muchos de los servicios ambientales del páramo dependen del suelo y de su compleja y relativamente poco entendida red de procesos interconectados e interdependientes. En este sentido, es necesario trabajar desde ópticas holísticas que permitan un estudio integral de las interacciones de los diferentes componentes del páramo. Por ahora, la mayoría de los estudios relacionados a los suelos del páramo se han enfocado en temas puntuales, casi como elementos aislados de este complejo de ecosistemas.

Además, no hay bases de datos georreferenciadas normadas, centralizadas, organizadas, públicas y de fácil acceso referentes a la caracterización de los suelos del páramo (parámetros fisicoquímicos, mineralógicos, etc.). La mayor parte de información producida respecto a los suelos de páramos proviene de esfuerzos puntuales de origen académico a nivel nacional e internacional en cooperación, con poca o nula participación de instituciones gubernamentales. Esto limita la integración de la información generada en procesos nacionales para la protección de estos recursos. Esta realidad no se limita únicamente a los suelos de los páramos, sino también a otras áreas de investigación.

Finalmente, el estudio de los efectos del cambio climático en los suelos de los páramos es otra gran deuda pendiente. En la actualidad, la información referente a los efectos del cambio climático sobre las propiedades de los suelos de los páramos es virtualmente inexistente para los páramos del Ecuador. Es imperioso un mejor entendimiento de los efectos a corto, mediano y largo plazo del cambio de uso del suelo en los páramos y de los potenciales efectos que el cambio climático tendrá sobre estos ecosistemas. Además, es necesario que estas predicciones sean incluidas en los procesos de toma de decisión y planificación de territorio para, de alguna manera, reducir el impacto que estas tendrán sobre los páramos y la población que depende de ellos.

— CAPÍTULO 3

HIDROLOGÍA DE LOS PÁRAMOS EN EL ECUADOR

Giovanny M. Mosquera | Ana E. Ochoa-Sánchez |
Juan Pesántez | Patricio Crespo | Rolando Céleri

Riachuelo de páramo.
Fotografía: cortesía de Pablo Corral Vega ©



Resumen

Los páramos brindan servicios hidrológicos esenciales que incluyen la generación y regulación de caudal, el control de la erosión y el abastecimiento de agua para consumo humano. Dichos servicios ayudan a sostener el desarrollo socioeconómico de zonas rurales y urbanas a lo largo del Ecuador. Debido a esto, el número de estudios científicos sobre la hidrología del páramo ha aumentado considerablemente en las últimas dos décadas. Sin embargo, la información existente se encuentra dispersa, lo que limita su disponibilidad para mejorar el manejo y la gestión de los recursos hídricos del ecosistema. En este capítulo presentamos una síntesis de la literatura científica sobre estudios relacionados a la cantidad y calidad de agua en el páramo ecuatoriano.

La mayor parte de la investigación hidrológica se ha desarrollado en los páramos húmedos del sur del Ecuador. Las mediciones en campo indican que, aunque la precipitación en el páramo está principalmente compuesta por llovizna de baja intensidad ($<1 \text{ mm hr}^{-1}$), existe una alta variabilidad espacial de la lluvia anual a lo largo del Ecuador. A pesar de que la neblina aumenta la humedad atmosférica hasta en un 20 %; esta no aumenta el contenido de agua en el suelo de páramo cubierto por vegetación de baja estatura tal como el pajonal, y por lo tanto no influencia el rendimiento hídrico a escala de cuenca. En pajonales de páramo conservados en el sur del Ecuador alrededor del 50 % de la precipitación que entra al sistema regresa a la atmósfera a través de la evapotranspiración. La presencia de vegetación nativa de páramo facilita la infiltración de agua en el suelo, lo que a su vez reduce los procesos erosivos.

Los procesos y mecanismos relacionados a la generación de caudal han sido investigados en detalle en el páramo del sur del Ecuador que presenta condiciones características tales como suelos de origen volcánico (Andosoles) de poca profundidad (1-2 m), suelos formados por la acumulación de materia orgánica (Histosoles) que forman humedales generalmente poco profundos ($<10 \text{ m}$) y una roca madre con una muy baja permeabilidad (casi compacta). En dicha región, se ha determinado que los humedales de páramo que cubren una extensión superficial relativamente pequeña (entre el 5 y 20 % del área de las cuencas hidrográficas) y que principalmente se ubican en zonas planas alrededor de ríos y arroyos, son la principal zona de almacenamiento de agua y fuente de generación de caudal.

Los Andosoles que cubren el resto del terreno (80-95 % de la superficie de las cuencas) por otro lado ayudan a regular el caudal por medio de la recarga de agua a los humedales durante periodos de sequía. En relación con los impactos del cambio de uso de la tierra en la hidrología del páramo, la forestación con pinos reduce el almacenamiento de agua en el suelo, así como la

generación y regulación de caudal. Los impactos del pastoreo y la agricultura en la función hidrológica de los pajonales de páramo no son generalizables ya que dependen en gran medida del manejo histórico y las prácticas actuales de uso de la tierra. Finalmente, identificamos vacíos de conocimiento que deben ser abordados en futuras investigaciones para mejorar el manejo de los recursos hídricos del páramo en el Ecuador.

Summary

The páramo provides essential hydrological services, flow generation and regulation, and erosion control and water supply for human consumption. These services help sustain the socio-economic development of rural and urban areas throughout Ecuador. As a result, the number of scientific studies on páramo hydrology has increased considerably in the last two decades. However, the existing information is scattered, which limits its availability for improving the management and administration of the ecosystem's water resources. In this chapter we present a synthesis of the scientific literature on studies related to water quantity and quality in the Ecuadorian páramo.

In general, most of the hydrological research has been carried out in the humid páramos of southern Ecuador. Field measurements indicate that although precipitation in the páramo is mainly composed of low intensity drizzle ($<1 \text{ mm hr}^{-1}$), there is a high spatial variability of annual rainfall across Ecuador. Although fog increases atmospheric humidity by up to 20%, it does not increase the water content of the páramo soil covered by low-height vegetation such as grasslands, and therefore does not influence water yield at the catchment scale. In conserved páramo grasslands in southern Ecuador about 50% of the precipitation entering the system returns to the atmosphere through evapotranspiration. The presence of native páramo vegetation facilitates water infiltration into the soil, which in turn reduces erosion processes.

The processes and mechanisms related to flow generation have been investigated in detail in the páramo of southern Ecuador, which presents characteristic conditions such as the presence of shallow (1-2 m) soils of volcanic origin (Andosols), soils formed by the accumulation of organic matter (Histosols) that form generally shallow wetlands ($<10 \text{ m}$) and a bedrock with a very low permeability (almost compact). In this region, páramo wetlands covering a relatively small surface area (between 5 and 20% of the watershed area) and mainly located in flat areas around rivers and streams have been identified as the main water storage area and source of water flow generation.

The Andosols that cover the rest of the land (80-95% of the catchment area) on the other hand help to regulate flow by recharging water to wetlands

during periods of drought. In relation to the impacts of land use change on páramo hydrology, pine afforestation reduces water storage in the soil, as well as flow generation and regulation. The impacts of grazing and agriculture on the hydrological function of páramo grasslands are many and varied as they are highly dependent on historical management and current land use practices. Finally, we identify knowledge gaps that need to be addressed in future research to improve the management of páramo water resources in Ecuador.

Figura 3.1 Un riachuelo formándose en el páramo del Antisana con los glaciares del volcán al fondo. La hidrología de los páramos comprende fenómenos complejos debidos a las condiciones geográficas, biofísicas e hidrometeorológicas del paisaje. Fotografía: Patricio Mena-Vásconez



Introducción

El páramo posee una alta capacidad de regulación hídrica debido a su ubicación geográfica —por encima de la línea de los árboles y debajo de los glaciares (donde estos están presentes)— y sus características biofísicas (por ejemplo, la topografía, la vegetación, el suelo y la geología) e hidrometeorológicas (Buytaert et al., 2006a; Figura 3.1). Dicha regulación suplende las necesidades de agua para consumo doméstico, industrial, agrícola, ganadero y recreativo, así como las demandas de energía hidroeléctrica de millones de personas que habitan en los Andes tropicales y sus alrededores (Céleri y Feyen, 2009; Correa et al., 2020). Si bien estos servicios ecosistémicos hidrológicos han creado una gran base social para la conservación, restauración y el manejo sostenible del páramo en el Ecuador, otros usos que incluyen la extracción de minerales, la forestación con especies exóticas, el pastoreo intensivo y la agricultura a gran escala, pueden afectar su capacidad de proporcionar beneficios hidrológicos para la sociedad (Mosquera et al., 2022). Por ello, es fundamental comprender los elementos y procesos que influyen en la provisión de servicios hidrológicos de forma que dicho conocimiento sea la base para informar estrategias y políticas destinadas a asegurar la gestión sostenible de los recursos hídricos del páramo.



Aunque la diversidad, fisionomía y ecología de la vegetación del páramo han sido estudiadas en detalle desde el siglo XIX (por ejemplo, Humboldt y Bonpland en 1807) y con mayor énfasis a lo largo del siglo XX (por ejemplo, Cuatrecasas, 1958; Monasterio, 1980; Acosta-Solís, 1984; van der Hammen y Cleef, 1986), la investigación sobre sus recursos hídricos comenzó hace apenas tres décadas. En 2006, Buytaert et al. (2006a) sintetizaron sobre el estado de la investigación hidrológica en el páramo en la que se proporcionó una descripción inicial de sus principales características biofísicas (por ejemplo, vegetación, suelos, topografía) e hidrometeorológicas (clima, precipitación y caudal). Sin embargo, los autores identificaron varias brechas de conocimiento, principalmente como consecuencia de la falta de mediciones de componentes esenciales del ciclo hidrológico, de los cortos periodos de monitoreo o la mala calidad de los datos hidrológicos disponibles. Adicionalmente, dicho documento evidencia una falta de investigación sobre la hidrología de los humedales y bosques altoandinos.

Durante la última década se han llevado a cabo numerosas investigaciones para llenar estos vacíos de conocimiento. Las investigaciones incluyen la dinámica de la lluvia y la niebla (por ejemplo, Padrón et al., 2015; Cárdenas et al., 2017; Esquivel-Hernández et al., 2019; Berrones et al., 2021, 2022); la evapotranspiración (por ejemplo, Carrillo-Rojas et al., 2019; Ochoa-Sánchez et al., 2019, 2020); el movimiento de agua en el suelo (por ejemplo, Mosquera et al., 2020b, 2020a); los procesos de generación de escorrentía (por ejemplo, Mosquera et al., 2015, 2016a; Correa et al., 2017; Lazo et al., 2019; Ramón et al., 2021); y el almacenamiento de agua en la subsuperficie (por ejemplo, Lazo et al., 2019). Asimismo, el conocimiento sobre las características químicas del agua generada por los arroyos y ríos del páramo ha incrementado (Pesántez et al., 2018, 2021; Arízaga-Ildrovo et al., 2022).

Aunque la comprensión de la hidrología de los recursos hídricos del páramo en el Ecuador ha aumentado sustancialmente en las dos últimas décadas, esta información aún se encuentra dispersa y desconectada de las políticas dirigidas a mejorar la gestión de los recursos naturales. Esta situación limita el uso de la información disponible para guiar la toma de decisiones y desarrollar políticas basadas en evidencia científica. Por lo tanto, este capítulo se enfoca en la síntesis y evaluación del estado actual del conocimiento científico sobre los procesos hidrológicos del páramo ecuatoriano y su vínculo con la calidad del agua. Adicionalmente, identificamos brechas de conocimiento fundamentales que dificultan el manejo sostenible de los recursos hídricos del páramo en el Ecuador.

Procesos y variables hidrológicas

La generación y regulación de caudal son dos de los servicios ecosistémicos más importantes que brinda el páramo (Buytaert et al., 2006a; Mosquera et al., 2015; Correa et al., 2020). Dado que estos servicios dependen, en gran medida, del balance hídrico de las cuencas hidrográficas, la cuantificación de las entradas, el almacenamiento y las salidas de agua son fundamentales para obtener una comprensión de los procesos que dominan su hidrología. Esta sección sintetiza el conocimiento disponible sobre los procesos hidrológicos y las variables que influyen en el balance hídrico de las cuencas del páramo en el Ecuador (Figura 3.2).



Figura 3.2 Generación de caudal en una cuenca de páramo ubicada al sur del Ecuador dentro del Parque Nacional Cajas. Fotografía: Giovanni Mosquera

Precipitación

Algunas caracterizaciones detalladas de la lluvia en el páramo del sur del Ecuador han reportado medias anuales entre 1000 y 1300 mm (Buytaert et al., 2006b; Celleri et al., 2007; Padrón et al., 2020). A través de mediciones de campo, la lluvia media anual cerca del volcán Antisana, en los páramos del norte de Ecuador, se estimó en 779 mm durante el periodo 2014 a 2020 (Lahuatte et al., 2022). La lluvia en el páramo del Ecuador presenta una alta variabilidad espacial (Buytaert et al., 2006a; Ochoa et al., 2014; Correa et al., 2020). En un sitio de estudio del páramo central del Ecuador, cerca al volcán Chimborazo, se registró un importante gradiente de precipitación media anual de 900 mm al este del volcán y 145 mm al lado oeste durante el periodo 1974-1996 (Sklenář y Lægaard, 2003).

La lluvia en los Andes del Ecuador está influenciada principalmente por la Zona de Convergencia Intertropical y por el fenómeno de El Niño y La Niña (Vuille et al., 2000), las anomalías de temperatura en la superficie del océano Atlántico y, en menor grado, en la superficie del océano Pacífico, a pesar de la cercanía de este último a la cordillera de los Andes. En efecto, en los páramos del sur del Ecuador, la lluvia está formada principalmente por humedad atmosférica reciclada proveniente de la selva amazónica (Esquivel-Hernández et al., 2019; Zhiña et al., 2022).

La ocurrencia de llovizna en el páramo es frecuente, tal como se demostró en los páramos del sur del Ecuador donde esta representó hasta un 30 % de la precipitación anual total durante el periodo 2011-2014 (Padrón et al., 2015). Hasta el momento, solo un estudio en la misma región ha evaluado la influencia de la niebla en la precipitación del páramo. Berrones et al. (2021) encontraron que la niebla ocurre principalmente temprano en la mañana y en la noche, y estimaron que el contenido combinado de llovizna y de la niebla podría aumentar, potencialmente, la precipitación anual hasta en un 22 % (es decir, 340 mm en un periodo de 12 meses durante 2017-2018). Sin embargo, un estudio sobre la captura de niebla en el mismo sitio, dominado por pajonales de pequeña altura (<0,5 m), sugiere que la precipitación por niebla se condensa en el pajonal, pero no llega al suelo; es decir, las gotas se quedan en la vegetación y no llegan a escurrir al suelo, por lo que la humedad del suelo no se incrementa y, por lo tanto, no contribuye al caudal (Berrones et al., 2022). La niebla, sin embargo, tiene importancia ecohidrológica dado que mantiene una alta humedad relativa del aire y disminuye el efecto incidente de la radiación solar, lo que a su vez limita las pérdidas de agua por evapotranspiración (Berrones et al., 2022). A pesar de ello, aún se desconoce el papel de la niebla en paisajes de páramo con vegetación de mayor altura (por ejemplo, bosques de *Polylepis* y rosetas gigantes).

Aunque las técnicas de teledetección y modelos climáticos globales se han utilizado comúnmente para caracterizar la variabilidad espacial de la lluvia en el páramo debido a la limitada disponibilidad de estaciones de monitoreo en tierra (por ejemplo, Vuille et al., 2000; Correa et al., 2020), dichas técnicas han mostrado diferencias notables en comparación con las mediciones terrestres debido principalmente a la compleja topografía de la cordillera de los Andes (Ochoa et al., 2016; González-Zeas et al., 2019). A pesar de esto, recientemente se han obtenido representaciones precisas de la precipitación espacial en el páramo mediante el uso de radares de lluvia con datos ajustados para condiciones locales (por ejemplo, Orellana-Alvear et al., 2019) o densas redes de estaciones pluviométricas (por ejemplo, Sucozhañay et al., 2018) para llegar a cuantificar la cantidad de lluvia y comprender su dinámica temporal, que son esenciales para mejorar la comprensión del funcionamiento hidrológico del páramo.

Evapotranspiración

La evaporación desde la superficie terrestre (sin incluir los cuerpos de agua), la evaporación del agua lluvia interceptada por el dosel vegetal y la transpiración desde los tejidos vegetales, que combinados forman el término de evapotranspiración del balance hídrico, representan una gran proporción del ciclo hidrológico global (Good et al., 2015). A pesar del importante rol que puede jugar la evapotranspiración en el páramo ecuatoriano, este componente del balance hídrico permaneció poco estudiado hasta hace media década.

La evapotranspiración actual o real (es decir, la cantidad de agua que es efectivamente evaporada desde la superficie del suelo y transpirada por la cubierta vegetal) de los pajonales de páramo (*Calamagrostis intermedia*) se midió directamente por primera vez en un sitio de páramo al sur de Ecuador (3765 m). El promedio diario de este flujo de agua en esa zona es de 1,7 mm día⁻¹, variando entre 1,6 mm día⁻¹ durante los meses húmedos y 2,0 mm día⁻¹ durante los meses relativamente secos para el periodo 2016-2019. Este flujo representa hasta el 50 % de la precipitación total anual (Carrillo-Rojas et al., 2019; Ochoa-Sánchez et al., 2019, 2020). Otro estudio reciente de un sitio de páramo al norte del Ecuador, en el área de conservación del volcán Antisana, reporta la evapotranspiración actual medida durante el periodo 2018-2021 (Páez-Bimos et al., 2022). Estos autores encontraron que la evapotranspiración actual representó el 42,5 % de la precipitación total para pajonales (*Calamagrostis intermedia*), asemejándose a los valores reportados para pajonales en el sur del país. Por otro lado, la evapotranspiración actual de la cobertura vegetal de almohadilla (*Azorella pedunculata*) representó el 76 % de la precipitación media anual, y las mayores diferencias se encontraron durante los meses secos en el área de estudio (enero, marzo y julio a septiembre).

Los componentes de la evapotranspiración actual no han sido cuantificados directamente en el páramo ecuatoriano. En el sur del Ecuador se midió indirectamente la pérdida por interceptación en pajonal durante eventos de lluvia en el periodo 2014-2018, encontrando altos porcentajes de interceptación (80-100 %) durante eventos de precipitación de hasta 2 mm de lluvia acumulada. Esto indica que la máxima capacidad de almacenamiento de agua en las acículas del pajonal es de 2 mm. En la misma región, la evapotranspiración actual de los pajonales está principalmente controlada por la radiación neta (Ochoa-Sánchez et al., 2020) y limitada por la neblina (Berrones, 2022).

Considerando las dificultades de realizar mediciones de evapotranspiración actual en zonas montañosas, varios estudios en regiones de páramo en el Ecuador han reportado valores de evapotranspiración potencial (es decir, la

demanda o cantidad máxima de agua que se evaporaría si hubiera suficiente agua disponible de la precipitación y la humedad del suelo). Dichos valores se pueden estimar con relativa facilidad mediante el uso de mediciones de variables climáticas tradicionales (por ejemplo, temperatura y humedad del aire, velocidad del viento y radiación solar) y su transformación a evapotranspiración actual mediante el uso de un coeficiente de cultivo (es decir, la relación que existe entre la evapotranspiración actual para un cultivo específico y la evapotranspiración de referencia en esas mismas condiciones y en ese mismo microclima).

En el Ecuador existen varios estudios que reportan la evapotranspiración potencial de la vegetación, principalmente de los pajonales. Al norte del país, en la reserva del volcán Antisana, se calcularon valores promedio de evapotranspiración potencial del pajonal entre 1,4 y 2,1 mm día⁻¹ en cuatro estaciones meteorológicas durante el periodo 2007–2010 (Sklenář et al., 2015). En dicho estudio, los menores valores de evapotranspiración potencial se encontraron en los sitios de menor elevación (4120 y 4280 m) y donde la vegetación tenía mayor densidad, mientras que los mayores valores fueron reportados en sitios ubicados a mayor elevación (4430 y 4460 m) y con vegetación escasa. En un sitio de páramo situado al sur del Ecuador, donde la vegetación es principalmente dominada por pajonal y arbustos pequeños, se calcularon valores promedio de evapotranspiración potencial de 2,4 mm día⁻¹, con un rango de variación entre 0,8 y 4,2 mm día⁻¹ durante el periodo 2010–2012 (Iñiguez et al., 2016).

Estos valores coinciden con estudios en otros dos sitios en el Sur del Ecuador, en zonas principalmente cubiertas por pajonal, donde se calcularon valores promedio de evapotranspiración potencial entre 1,9 y 2,0 mm día⁻¹ durante el periodo 2011–2013 (Córdova et al., 2015). Cabe resaltar que todos estos estudios aplicaron la ampliamente utilizada ecuación de Penman-Monteith sugerida por la FAO (FAO 56 PM; Allen et al., 1998) para el cálculo de la evapotranspiración potencial. Además, es importante señalar que, aunque el número de estudios sobre evapotranspiración potencial ha incrementado en los últimos años, solamente existe una investigación en la que se ha estimado el coeficiente de cultivo para transformar la evapotranspiración potencial en evapotranspiración actual. Carrillo-Rojas et al. (2019) reportaron un coeficiente de cultivo de 0,9 para los pajonales del sur del Ecuador mediante el uso de la ecuación FAO 56 PM.

Infiltración

Una vez que la precipitación llega a la superficie del suelo, la capacidad de infiltración de los suelos permite la redistribución del agua a través de caminos de flujo sobre (superficiales) y debajo (subsuperficiales) de la superficie (Hillel, 2004). Los

suelos de páramo originados por la acumulación de ceniza volcánica (Andosoles, véase el Capítulo 2) y cubiertos por pajonales en el norte del Ecuador poseen una alta capacidad de infiltración de agua en condiciones conservadas (Poulenard et al., 2001). Dicha tasa de infiltración normalmente varía entre 20 y 80 mm hr⁻¹, siendo mayor que la habitualmente baja intensidad de la precipitación (generalmente <10 mm hr⁻¹; Padrón et al., 2020). Por ejemplo, en 10 años de monitoreo en la estación La Toreadora (4000 m) ubicada dentro del Parque Nacional El Cajas al sur del Ecuador se encontró que en el 85 % de las horas que registraron precipitación se tuvo una intensidad igual o menor a 1 mm h⁻¹, y solamente ocho veces se alcanzaron intensidades entre 10 y 20 mm h⁻¹. Los suelos de sitios donde existe vegetación arbustiva y bosques de *Polylepis* presentan mayores tasas de infiltración en comparación con sitios donde hay pajonales (Suárez et al., 2013). La alta capacidad de infiltración de los suelos de páramo cubiertos por vegetación nativa reduce la ocurrencia de escorrentía superficial y facilita la entrada de agua en el suelo, favoreciendo la generación de flujo subsuperficial en las cuencas de páramo (Mosquera et al., 2016a; Correa et al., 2017; Páez-Bimos et al., 2022). La limitada ocurrencia de flujo superficial, a su vez, reduce procesos erosivos (Harden, 1993; Poulenard et al., 2001; Mosquera et al., 2022).

Los cambios en el uso de la tierra producen efectos perjudiciales sobre la infiltración. Las quemas frecuentes (cada 1 a 3 años), la labranza, el pastoreo intensivo de ganado en pastos no nativos (kikuyo, *Pennisetum clandestinum*) y la remoción completa de la vegetación reducen sustancialmente las tasas de infiltración (hasta 10 veces) en relación con la cobertura vegetal nativa (Poulenard et al., 2001; Suárez et al., 2013). Estos efectos demuestran las consecuencias desfavorables de ciertos usos de la tierra o del cambio de la cobertura vegetal sobre la infiltración de los suelos del páramo (Mosquera et al., 2022).

Movimiento y almacenamiento de agua en el suelo

El agua que se almacena y moviliza a través de los suelos es un componente esencial del balance hídrico del páramo ya que ayuda a regular la cantidad de caudal generado durante los periodos de estiaje (Buytaert et al., 2006a; Mosquera et al., 2016a). A pesar de esto, existen pocos estudios sobre la dinámica espacial y temporal del movimiento del agua en suelos de páramo no perturbados. Un estudio realizado en una ladera experimental cubierta por vegetación de pajonal (*Calamagrostis intermedia*; Figura 3.3) investigó cómo el agua se moviliza a través de suelo Andosol poco profundo (<1 m de profundidad) en el páramo del sur de Ecuador (Mosquera et al., 2020a). El estudio demostró que, a pesar de que los Andosoles tienen un alto contenido de agua durante todo el año debido a su

alto contenido de materia orgánica y textura fina o franco-arcillosa (Buytaert et al., 2006a; Mosquera et al., 2020b), el movimiento vertical del agua es la ruta de flujo dominante en estos suelos. Esto se observó a pesar de la formación de una capa saturada de agua en el horizonte orgánico del suelo debajo de la zona de raíces, lo que ejemplifica el comportamiento de esponja de los suelos de ceniza volcánica en el páramo. El predominio de las trayectorias de flujo vertical se explica por la estructura porosa y la alta conductividad hidráulica saturada de los Andosoles (Buytaert et al., 2006c).



Figura 3.3 Pajonales (dominados por *Calamagrostis intermedia*) que cubren un suelo originado de ceniza volcánica (Andosol) en la cabecera de la cuenca del río Quinuas en la provincia de Azuay.
Fotografía: Giovanny M. Mosquera

Cabe recalcar que, a pesar del flujo vertical dominante, durante eventos de lluvia de alta intensidad o volumen, el agua tiende a movilizarse lateralmente en la zona de raíces del suelo, lo que explica la rápida respuesta del caudal a escala de cuenca durante eventos de lluvia. Aún falta conocimiento sobre el movimiento del agua en suelos de cenizas volcánicas más gruesas que presentan profundidades de hasta varias decenas de metros y en suelos no volcánicos (incluidos los Histosoles que forman los humedales andinos o bofedales), aunque lo más probable es que el movimiento principal del agua también sea vertical.

Otra investigación reportó que los Andosoles no perturbados del páramo andino se humedecen hasta la saturación más rápido (dos a tres meses) que los suelos minerales encontrados a menor elevación (ocho meses) después de largos periodos de sequía (Iñiguez et al., 2016). Este comportamiento hidrológico resulta del efecto combinado del alto contenido de materia orgánica del suelo y el bajo consumo de agua de los pajonales de páramo (Ochoa-Sánchez et al., 2020), en relación con especies de pastos exóticos que dominan a menor elevación.

Varias investigaciones se han centrado en evaluar los impactos de los cambios en la cobertura vegetal y el uso de la tierra sobre el contenido y almacenamiento de agua en el suelo, particularmente en los páramos del sur del Ecuador. Varios estudios han demostrado consistentemente que la forestación con plantaciones de pinos reduce significativamente el contenido de agua del suelo (hasta un 50-60 %) en relación con la vegetación nativa (es decir, pajonales, arbustos, bosques de *Polylepis*; Hofstede et al., 2002; Farley et al., 2004; Harden et al., 2013; Marín et al., 2018; Patiño et al., 2021; Mosquera et al., 2022). Estas observaciones indican que se debe restringir la forestación con pinos en áreas de páramo conservadas para asegurar su capacidad de proveer los servicios de generación y regulación de caudales (Mosquera et al., 2022).

El cultivo —principalmente de papa— y el pastoreo intensivo de ovinos y bovinos han mostrado efectos contrastantes sobre el contenido y almacenamiento de agua del suelo que van desde fuertes reducciones (por ejemplo, Podwojewski et al., 2002; Daza Torres et al., 2014; Marín et al., 2018; Patiño et al., 2021) a ningún cambio o incluso aumentos leves (p. ej., Buytaert et al., 2005; Harden et al., 2013; Marín et al., 2018). Estas diferencias probablemente estén relacionadas con el manejo histórico y reciente de la tierra, incluidas las actividades de quema, labranza y pisoteo, así como con la cantidad de animales que pastan las áreas de páramo (Podwojewski et al., 2002; Marín et al., 2018). Con base en la notable variabilidad de los impactos de estas actividades, investigaciones pasadas recomiendan que se evite generalizar los impactos del cultivo y el pastoreo entre sitios de estudio, y se consideren los factores antes mencionados

al planificar estrategias de manejo de la tierra y agua en el páramo (Marín et al., 2018; Mosquera et al., 2022).

Con el objetivo de simular el efecto del pastoreo extensivo (es decir, una baja densidad de animales por unidad de área) en la humedad del suelo, también se evaluó el impacto de la eliminación del pajonal en el contenido de agua de los Andosoles no perturbados (Montenegro-Díaz et al., 2019). Si bien se observó un ligero cambio en la variación temporal del contenido de agua en el suelo debido a la reducción de la interceptación y transpiración en la parcela intervenida, no se encontraron cambios significativos en el contenido promedio de agua en el suelo. Estas observaciones sugieren que las propiedades hidrofísicas del suelo no se ven afectadas cuando solamente se elimina la vegetación, siempre que la estructura del suelo no se vea afectada por intervenciones humanas tales como la compactación del suelo debido al pastoreo intensivo (es decir, una alta densidad de animales por unidad de área).

El efecto de la cobertura vegetal en el movimiento de agua en el suelo ha sido investigado recientemente en el páramo del Antisana en el norte del Ecuador (Páez-Bimos et al., 2023). Estos autores reportaron que el suelo de ceniza volcánica cubierto por almohadillas (*Azorella pedunculata*) presenta una estructura de dos capas, en la cual el horizonte superficial (hasta 20 cm de profundidad) almacena agua que se encuentra disponible para la evapotranspiración, con un movimiento de agua restringido a capas de suelo más profundas. Por otro lado, el suelo cubierto por pajonales (*Calamagrostis intermedia*) presenta un movimiento de agua vertical homogéneo, que facilita la recarga casi constante de agua a todo el perfil del suelo. Estas observaciones fueron atribuidas a diferencias en la distribución de raíces en el horizonte superficial del suelo entre las dos coberturas vegetales, enfatizando la importancia del rol que juega la vegetación en la hidrología del páramo.

Generación de caudal

Dinámica del caudal

Las primeras evaluaciones hidrológicas en cuencas de páramo estuvieron enfocadas en definir la dinámica del caudal en respuesta a la variación temporal de la lluvia, particularmente, en el sur del Ecuador. En dicha región, el alto rendimiento hídrico de las cuencas de páramo no perturbadas que poseen una delgada capa de suelo Andosol (<1 m de profundidad) establecida sobre un lecho rocoso con muy baja permeabilidad se evidenció por su alto coeficiente de escorrentía (la

relación entre el caudal y la lluvia) que oscila frecuentemente entre 50 y 70 % a escala anual (Buytaert et al., 2007; Crespo et al., 2010, 2011; Guzmán et al., 2015; Mosquera et al., 2015; Ochoa-Tocachi et al., 2016) y llega hasta un 90 % durante eventos de lluvia (Correa et al., 2016). Este alto rendimiento hídrico se debe, principalmente, al efecto combinado del aporte sostenido de lluvia y la alta humedad del aire que reduce la evapotranspiración a lo largo del año (Córdova et al., 2015; Padrón et al., 2015), junto con la alta capacidad de infiltración en relación con la intensidad de lluvia y retención de agua de los suelos debido a su estructura porosa, alto contenido de materia orgánica y textura fina (Buytaert et al., 2005, 2006a; Mosquera et al., 2020a).

Por el contrario, un menor rendimiento hídrico ha sido observado en cuencas de páramo ubicadas alrededor del volcán Antisana en el norte del Ecuador que presentan menores coeficientes de escorrentía, que varían entre 28 y 37 % (Ochoa-Tocachi et al., 2016; Lahuatte et al., 2022). Estas diferencias en la generación de flujo se atribuyen principalmente a dos factores. El primer factor es el de las condiciones climatológicas relativamente más secas y estacionales en algunas zonas de los Andes del norte y centro del Ecuador (Torres y Proaño, 2018), en comparación con las condiciones húmedas durante todo el año que se encuentran en el sur del país.

En cuanto al otro factor, se pueden mencionar las características edafológicas y geológicas de las cuencas (Ochoa-Tocachi et al., 2016; Rodríguez-Morales et al., 2019). Por un lado, los suelos más profundos resultado de un desarrollo poligenético debido a la acumulación de material volcánico de diferentes edades y propiedades físicas generalmente presentan textura gruesa y bajo contenido de materia orgánica en comparación con la región del sur del Ecuador (Páez-Bimos et al., 2022), favoreciendo el movimiento vertical del agua a través de las capas de suelo (Lahuatte et al., 2022). Por otro lado, la roca subyacente altamente fracturada y permeable o la presencia de piroclastos poco o no consolidados facilitan una percolación profunda del agua. Debido a la dificultad de cuantificar los componentes de flujo subsuperficial profundo o subterráneo en dichas cuencas, el cierre de su balance hídrico no se ha podido realizar hasta el momento.

Otros análisis de caudal mostraron que las cuencas de páramo no perturbadas en el sur del Ecuador poseen una alta capacidad de regulación hídrica, como lo indica un caudal base alto y sostenido durante la mayor parte del año (Buytaert et al., 2007; Crespo et al., 2011; Mosquera et al., 2015; Ochoa-Tocachi et al., 2016). Dicha capacidad también se ve favorecida por las condiciones climáticas, edáficas y geológicas locales antes mencionadas. Aunque no existe información sobre este tema para cuencas de páramo en otras regiones con diferentes condiciones climatológicas (por ejemplo, estacionalmente secas),

pedológicas (por ejemplo, suelos de textura gruesa de varios metros de profundidad o suelos no volcánicos) y geológicas (por ejemplo, lecho rocoso fracturado altamente permeable), se puede esperar una capacidad de regulación de caudal diferente. Por ejemplo, otras cuencas de captación dominadas por pastizales y humedales en ambientes estacionalmente secos y lecho rocoso altamente fracturado a lo largo de los Andes tropicales presentan una capacidad de regulación de flujo sustancialmente menor que los páramos húmedos del sur de Ecuador (Ochoa-Tocachi et al., 2016).

A pesar de que con frecuencia se asume que las cuencas de páramo en los Andes tropicales generalmente presentan un alto rendimiento hídrico y una alta capacidad de regulación (por ejemplo, Buytaert et al., 2006a; Correa et al., 2020), las diferencias identificadas a lo largo de la región indican que el clima, el tipo de suelo y las características geológicas deben ser consideradas para lograr una mejor gestión de los recursos hídricos en el páramo ecuatoriano. Esto debe ser tomado en cuenta en el diseño de sistemas de monitoreo de caudales.

También se han evaluado los impactos del uso del suelo y el cambio de cobertura vegetal en la dinámica del caudal en cuencas de páramo en el Ecuador. Algunas investigaciones en el sur del país han demostrado que la forestación con pinos (Figura 3.4) afecta negativamente la generación de caudal al reducir todo el rango de caudales: altos, medios y bajos (Buytaert et al., 2007; Crespo et al., 2010, 2011; Ochoa-Tocachi et al., 2016; Cabrera-Balarezo et al., 2022). Este comportamiento responde a una mayor pérdida de agua hacia la atmósfera por medio de la interceptación y la transpiración de los árboles en relación con la vegetación de pajonal que domina en el páramo no degradado. El aumento de la evapotranspiración, a su vez, causa una disminución en el rendimiento hídrico hasta en un 50 %. Aunque no se ha encontrado que el cultivo de papas reduzca sustancialmente el rendimiento hídrico en cuencas de páramo (el coeficiente de escorrentía disminuye en ~10-20 %); esta práctica tiende a producir flujos máximos más altos y rápidos, así como a disminuir el flujo base, lo que causa una disminución en la capacidad de regulación del caudal (por ejemplo, Buytaert et al., 2004, 2006d, 2007; Crespo et al., 2010, 2011; Ochoa-Tocachi et al., 2016). Estos efectos pueden atribuirse a la formación de surcos y zanjas en los cultivos, lo que a su vez provoca un drenaje más rápido del agua del suelo a los arroyos (Buytaert et al., 2007; Crespo et al., 2010). Asimismo, dichos efectos se ven exacerbados cuando el terreno tiene un arado siguiendo la pendiente del terreno, lo cual favorece el drenaje rápido del agua fuera de la cuenca y la subsecuente reducción de caudales base, lo que adicionalmente puede provocar un incremento acelerado de la erosión del suelo.



Figura 3.4 Plantación de pino (*Pinus patula*) en la cuenca del río Quinuas en el sur del Ecuador. Fotografía: Giovanni M. Mosquera.

Los impactos del pastoreo en la generación y regulación del caudal son menos evidentes. Mientras que la dirección del impacto depende principalmente de la densidad animal que puede causar una disminución de la cobertura vegetal y compactación del suelo, la magnitud del cambio se relaciona con las características biofísicas de la cuenca y las propiedades del suelo (Ochoa-Tocachi et al., 2016). Los hallazgos en los Andes del sur del Ecuador indican que el pastoreo con una densidad de ganado de entre 0,5 y 3 cabezas por hectárea, no provoca cambios significativos ni en el rendimiento hídrico ni en la regulación del caudal (Crespo et al., 2010, 2011). Por otro lado, aunque los efectos del pastoreo intensivo (incluyendo una alta densidad de ganado que pastorea libremente en el terreno y no se encuentra estabulado) no han sido estudiados en el páramo; observaciones en campo sugieren que dicho impacto puede causar una fuerte reducción de la cobertura vegetal y compactación del suelo, lo que a su vez puede producir un aumento en la rapidez de la generación de escorrentía luego de una lluvia (es decir, aumentar el rendimiento hídrico), y reducir la cantidad de agua que es almacenada en la cuenca (es decir, disminuir la regulación de caudales) (Ochoa-Tocachi et al., 2016). Sin embargo, todavía hace falta definir la densidad de ganado que causa dichos efectos en el páramo ecuatoriano.

Procesos de generación de caudal

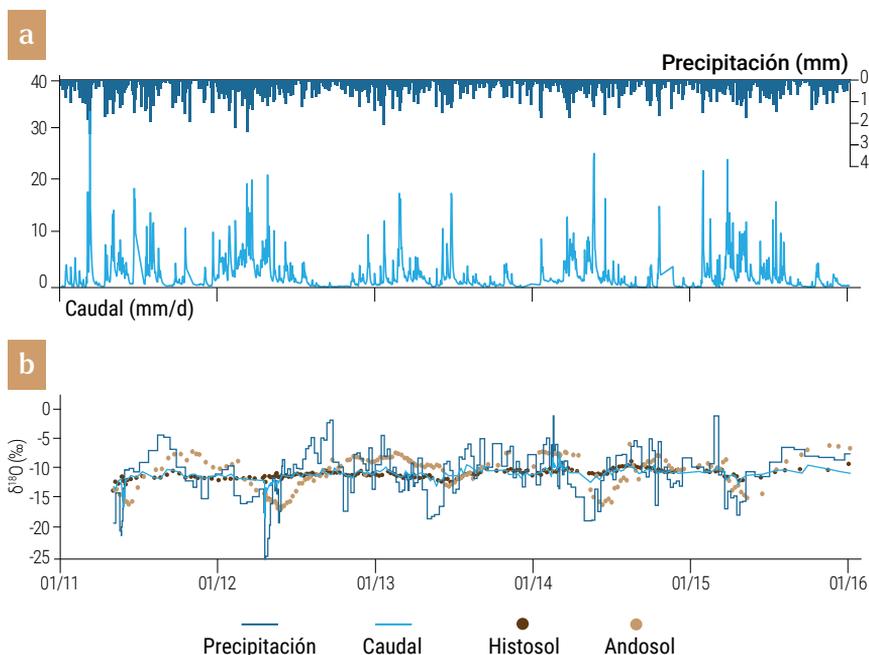


Figura 3.5 Observaciones hidrológicas e isotópicas y hallazgos clave sobre los mecanismos generación de escorrentía en una cuenca experimental de páramo (7,52 km²) situada dentro del Observatorio Ecohidrológico de Zhuruca y en el sur del Ecuador (3400-3900 m s.n.m.; Mosquera et al., 2016) durante el periodo mayo de 2011 a diciembre de 2016. a) La precipitación diaria (P) y el flujo de agua por unidad de área (Q) representan la dinámica de lluvia y escorrentía del sistema. b) La composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ en P, Q, suelos de ladera (Andosol) y ribereños (Histosol) muestra cualitativamente que el Histosol de ribera es la principal fuente de generación de caudal durante el periodo de monitoreo.

Dado que la generación y la regulación del caudal dependen del transporte y la mezcla de agua en las cuencas hidrográficas, en la última década ha aumentado el interés en definir las trayectorias del flujo de agua sobre (flujo superficial) y debajo (flujo subsuperficial) de la superficie en el páramo. La mayor parte de la comprensión de los procesos que dominan la generación de caudal en el páramo, hasta la fecha, se ha desarrollado en un sistema de monitoreo anidado de ocho cuencas de cabecera experimentales fuertemente instrumentadas y monitoreadas (0,2-7,5 km²) situadas en el sur de Ecuador dentro del Observatorio Ecohidrológico de Zhuruca y en el sur del Ecuador dentro del Observatorio Ecohidrológico de Zhuruca (Mosquera et al., 2016b). En dicha región, los suelos de origen volcánico son poco profundos (hasta 1-2 m de profundidad) y el lecho rocoso subyacente es prácticamente impermeable. Un resumen de las observaciones hidrológicas e

hidrogeoquímicas y los hallazgos clave desarrollados en el observatorio se muestran en la Figura 3.5 como referencia. En Zhurucay, las primeras investigaciones trataron de identificar cómo las características biofísicas del páramo (por ejemplo, vegetación, topografía, tipo y distribución espacial de suelo y geología) influyen en la generación y regulación del caudal (Mosquera et al., 2015). Estos autores encontraron que mientras el rendimiento hídrico representado por el coeficiente de escorrentía y la generación de caudales medios y altos están controlados por la extensión superficial de los humedales andinos (la combinación de suelos ricos en materia orgánica tipo turba —Histosoles— y vegetación de almohadillas), la regulación hídrica representada por la generación de los flujos bajos (considerados como flujo base) se encuentran principalmente influenciados por la topografía (pendiente promedio de las cuencas) que tiene un efecto gravitacional en el agua almacenada en la cuenca y en los humedales.

El uso de trazadores ambientales (isotópicos y geoquímicos) ha permitido caracterizar las rutas de flujo superficial y subsuperficial, el tiempo promedio de tránsito o edad del agua (es decir, el tiempo promedio transcurrido desde que las moléculas de agua ingresan a una cuenca en forma de precipitación hasta que salen de la cuenca en forma de caudal; McGuire y McDonnell, 2006), de suelos, arroyos y ríos, y la capacidad de almacenamiento de agua en las cuencas del observatorio de Zhurucay. La caracterización de las señales de isótopos estables del agua indicó que, aunque los humedales andinos cubren solamente el 20 % del área de Zhurucay, estos son la principal fuente de agua que contribuye a la generación de caudal durante todo el año (Mosquera et al., 2012; 2016a). Por otro lado, las laderas que cubren el 80 % restante del área juegan un papel clave en la recarga de agua hacia los humedales andinos durante los periodos secos y por ello contribuyen a la regulación hídrica (Mosquera et al., 2016a). La información geoquímica (nutrientes y metales disueltos) ha permitido cuantificar la contribución de diferentes fuentes de agua (por ejemplo, lluvia, suelos de ladera, humedales ribereños y manantiales) a la generación de caudal en diferentes condiciones de flujo (Correa et al., 2017; 2019). Estas investigaciones confirmaron que los Histosoles son la principal fuente de agua de los arroyos y ríos durante flujo base y fuertes eventos de lluvia al contribuir con entre el 50 y 60 % del caudal total. También se demostró que en Zhurucay las laderas se conectan hidrológicamente a la red de drenaje durante eventos de lluvia fuertes, contribuyendo hasta en un 40 % al caudal total (Correa et al., 2019).

El agua de manantial, como representación de agua subterránea poco profunda almacenada en las fracturas del lecho rocoso cerca de la superficie del suelo (< 30 m de profundidad), contribuye entre 10 a 25 % al flujo de la corriente, particularmente durante caudales bajos. Estos hallazgos están respaldados por

las edades relativamente jóvenes de agua en el suelo y arroyos, que son menores a un año y generalmente varían entre 2 y 9 meses (Mosquera et al., 2016c; Lazo et al., 2019; Larco et al., 2023), en comparación con edades del agua mucho mayores reportadas en otros ecosistemas donde el caudal se genera principalmente por el agua subterránea de acuíferos profundos donde la edad es del orden de varios años a décadas (por ejemplo, Cartwright y Morgenstern, 2015; Ma y Yamanaka, 2016). La capacidad de almacenamiento de agua de las cuencas de Zhurucay varía entre 300 y 600 mm, lo que representa entre un tercio y la mitad de la precipitación anual (Lazo et al., 2019). Los humedales proporcionan la mayor parte de este almacenamiento de agua y, por lo tanto, son el reservorio de agua más importante de las cuencas. Estos hallazgos se encuentran sustentados por la dominancia de la fracción de agua de preevento (o agua antigua almacenada en las cuencas previo a eventos de lluvia; Klaus y McDonnell, 2013) que generalmente representa más del 75 % del caudal total durante eventos de lluvia en Zhurucay (Lazo et al., 2023). En conjunto, estos hallazgos en el páramo del sur del Ecuador enfatizan: 1) la relevancia de los humedales andinos para la generación y regulación de caudal, a pesar de su pequeña extensión de área a lo largo del observatorio; 2) que la mezcla y el transporte del agua subsuperficial a través de los suelos poco profundos son mecanismos dominantes de generación de caudales; 3) que el aporte de aguas subterráneas profundas es bajo y se limita a aportes de aguas poco profundas a través de las grietas de la roca subyacente alterada (Figura 3.6).



Figura 3.6 Humedal de páramo que cubre suelo originado por la acumulación de materia orgánica (Histosol) en el Observatorio Ecohidrológico de Zhurucay ubicado en la provincia del Azuay. Fotografía: Giovanny M. Mosquera.

El modelo hidrológico conceptual mencionado antes se evaluó recientemente en otra cuenca experimental (cuenca alta del río Tomebamba) en el sur del Ecuador con características de vegetación, suelos y geologías similares a las de Zhurucay, pero con un área de drenaje mayor (21,7 km²) e influenciada por la presencia de lagunas (Ramón et al., 2021). Curiosamente, se descubrió que los humedales aportan una proporción aún mayor de agua al caudal a pesar de su menor extensión superficial (solo el 8 % del área de drenaje) en comparación con Zhurucay (20 %). Por el contrario, los lagos que cubren el 5 % de la cuenca no representaron una fuente principal de agua para la generación de caudal como lo creían hasta ahora actores locales y administradores del agua en la región (por ejemplo, Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca ETAPA-EP, comunicación personal). Aunque la capacidad de regulación del caudal de los lagos puede ser importante en pequeñas cuencas de cabecera en el páramo, estos hallazgos sugieren que las fluctuaciones en su nivel del agua (debido a las constantes entradas de precipitación) y su capacidad de almacenamiento de agua no son suficientes para influir en la producción de caudal en cuencas de mayor extensión superficial. Estos hallazgos enfatizan la importancia de obtener una mejor comprensión basada en monitoreo de los procesos hidrológicos para definir correctamente hacia dónde deben dirigirse los esfuerzos de gestión y conservación. En el caso del páramo andino del sur del Ecuador esto es claro: se deben conservar los humedales andinos para mantener la disponibilidad de agua para los usuarios aguas abajo.

Aunque la comprensión de los principales procesos hidrológicos relacionados a la generación de caudal en otras regiones del páramo ecuatoriano aún es escasa, los pocos estudios disponibles han mostrado diferencias marcadas en relación con la hidrología bien entendida en los páramos del sur del Ecuador. En el norte del Ecuador recientemente se ha demostrado que las trayectorias de flujo de agua verticales son un importante mecanismo de transporte de agua en una pequeña cuenca de cabecera (0,68 km²) influenciada por vulcanismo reciente; es decir, que posee suelos volcánicos profundos (que alcanzan hasta 27 m de profundidad alrededor de la zona de estudio (Hall et al., 2017), y roca madre fracturada con alta permeabilidad (Lahuate et al., 2022). La combinación de baja precipitación anual (< 800 mm año⁻¹), con una marcada estacionalidad climática y una alta permeabilidad del suelo y del lecho rocoso que permiten que el agua se infiltre verticalmente a través del subsuelo (Lahuate et al., 2022) probablemente explican el bajo rendimiento hídrico reportado en los páramos del volcán Antisana en el norte del Ecuador (Ochoa-Tocachi et al., 2016; Lahuate et al., 2022). Estos hallazgos se alinean con la relevancia del flujo de agua subterránea en la generación de caudales reportada para

cuencas que poseen un lecho rocoso volcánico fracturado en el norte y centro del Ecuador (Favier et al., 2010; Saberi et al., 2019).

Dos investigaciones en cuencas de páramo que aún poseen cobertura de glaciar en el norte y centro de Ecuador han demostrado la importancia de las contribuciones del derretimiento de los glaciares a la generación de caudales. En una cuenca de 15,2 km² con un 15 % de área glaciar en el volcán Antisana, dichos aportes representaron el 20 % del caudal durante un evento de lluvia monitoreado durante la estación seca (Minaya et al., 2021). Asimismo, representaron entre 20 y 60 % a escala horaria durante el día en una cuenca de 7,5 km² con una cobertura glaciar de 34 % en el volcán Chimborazo (Saberi et al., 2019). En conjunto, estos hallazgos no solo resaltan el papel clave que están jugando las áreas de páramo en regiones sin glaciares o donde los glaciares han desaparecido recientemente como resultado del calentamiento global en los Andes tropicales (por ejemplo, Thompson et al., 2011; Mark et al., 2017), sino también la diversidad de caminos que el agua puede tomar para llegar hacia arroyos y ríos, dependiendo de las condiciones climatológicas, geomorfológicas, edafológicas y geológicas locales.

Calidad química del agua

La disponibilidad de suficiente cantidad de agua que cumpla con estándares de calidad para consumo humano es un objetivo clave para lograr el desarrollo sostenible de las naciones (Alcamo, 2019; Germann y Langergrabe, 2022). A la fecha, existe una creencia generalizada tanto por parte de la comunidad científica¹ como del público en general² de que las cuencas de páramo conservadas ofrecen agua de calidad química suficientemente alta para satisfacer las necesidades de la población urbana y rural. Sin embargo, sorpresivamente, esta característica de los recursos hídricos del ecosistema no ha sido evaluada en estudios de síntesis anteriores sobre la hidrología del páramo. Esta sección tiene como objetivo sintetizar el conocimiento disponible sobre la calidad química —aquí referida específicamente a sustancias disueltas que incluyen nutrientes, metales y contaminantes— en el caudal generado por páramos conservados y degradados en el Ecuador.

Hasta donde sabemos, la primera investigación científica sobre la calidad del agua del páramo se llevó a cabo en el volcán Antisana en el norte del Ecuador (Williams et al., 2001). Durante condiciones de clima seco, estos autores reportaron diferencias significativas en la concentración de especies inorgánicas y orgánicas de carbono, nitrógeno y fósforo entre el agua de los arroyos y los

¹ Por ejemplo, Buytaert et al., 2006a; Célteri y Feyen, 2009; Correa et al., 2020.

² Por ejemplo, comunicación personal de ETAPA-EP; Fondo para la protección del Agua FONAG, Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito EPMAPS.

humedales. Más recientemente, el monitoreo de alta resolución temporal de parámetros de calidad del agua (muestras recolectadas cada 4 horas durante 16 meses entre 2017-2019) en una cuenca en el sur de Ecuador indicó que se exportan altas concentraciones de carbono orgánico disuelto (COD) a los arroyos durante eventos de lluvia de alta intensidad. La producción de compuestos orgánicos en cuencas de páramo, y de COD en particular (Pesántez et al., 2021; Ramón et al., 2021), resulta de la acumulación de altas cantidades de C en los suelos (Buytaert et al., 2006a). Esto, especialmente en los humedales altoandinos (Hribljan et al., 2016) o cubiertos por vegetación de almohadilla (Páez-Bimos et al., 2022) que a menudo están hidrológicamente conectados con arroyos y ríos (Mosquera et al., 2016a). Aunque el COD no representa una amenaza directa para la salud humana, la desinfección con cloro (el método más comúnmente aplicado para el tratamiento de agua potable en el Ecuador) del agua rica en materia orgánica podría resultar en la potencial producción de subproductos cancerígenos como los trihalometanos (Hsu et al., 2001; WHO, 2017). Sin embargo, no encontramos información sobre la exportación de nutrientes en otras cuencas de páramo, ni sobre el efecto del proceso de cloración en la producción de subproductos potencialmente dañinos.

El contacto del agua con materiales liberados a la superficie de la Tierra durante eventos volcánicos disuelve elementos mayores y traza provenientes del lecho rocoso y de los suelos que posteriormente se movilizan a arroyos y ríos e influyen en la calidad química del caudal (Rodríguez-Espinosa et al., 2015; Páez-Bimos et al., 2022). Teniendo en cuenta el papel clave que juega el vulcanismo en la configuración del paisaje del páramo ecuatoriano, el monitoreo de parámetros de calidad del agua y de metales pesados, que en concentraciones elevadas pueden poner en peligro la salud humana,³ debería ser un requisito obligatorio. A pesar de esto, estudios directamente relacionados con la investigación de la concentración de metales disueltos en cuencas de páramo en el Ecuador todavía son limitados.

Hay una escasa información disponible en dos estudios realizados en el sur del Ecuador (Correa et al., 2019; Pesántez et al., 2021) que sugiere que el agua de los arroyos en las cuencas de páramo no perturbadas en dicha región presenta metales disueltos asociados con problemas de salud (por ejemplo, aluminio y cobre) en concentraciones por encima de los límites permisibles (Figura 3.7) para agua potable, agua embotellada y la preservación de la vida acuática, de acuerdo con las normas de calidad del agua de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, del Ecuador y de la Organización Mundial de la Salud.

³ Por ejemplo, Achene et al., 2010; Malandrino et al., 2015; Vigneri et al., 2017; Briffa et al., 2020

Estas observaciones resaltan la importancia de llevar a cabo evaluaciones de la calidad del agua que incluyan el análisis de nutrientes y metales disueltos, particularmente aquellos relacionados con problemas de salud (por ejemplo, cadmio, hierro, manganeso, mercurio y plomo) en el caudal generado por cuencas de páramo debido a la acumulación significativa de complejos organometálicos en sus suelos (Buytaert et al., 2005). Dichas evaluaciones deben realizarse durante diferentes condiciones de flujo (desde caudales base hasta caudales pico) ya que los diferentes solutos podrían movilizarse preferentemente durante eventos hidrológicos húmedos o secos en el páramo, e incluso algunos podrían movilizarse independientemente de las condiciones de caudal (Pesántez et al., 2018, 2021; Correa et al., 2019; Arízaga-Ildrovo et al., 2022; Peña et al., 2023). Aunque la exportación de solutos podría verse exacerbada debido a cambios en el uso de la tierra (Pesántez et al., 2018; Matovelle, 2022) y los aumentos de temperatura esperados en zonas altoandinas en de los Andes tropicales (Buytaert et al., 2009, 2010), por el momento no existen estudios que analicen a fondo esta relación en el páramo del Ecuador.

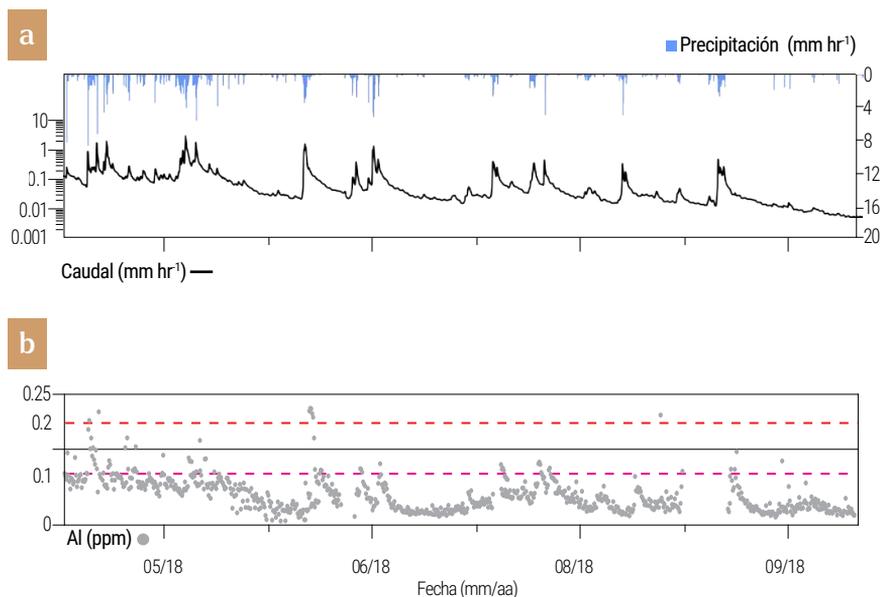


Figura 3.7 Serie temporal de alta frecuencia de a) precipitación y caudal (cada hora) y b) aluminio (Al) (cada 6 horas) en una cuenca de cabecera (3,28 km²) ubicada dentro del Observatorio Ecohidrológico de Zhurucay en el páramo del sur de Ecuador. Las líneas discontinuas horizontales moradas y rojas en b) representan los límites máximos permisibles para la preservación de la vida acuática y para el suministro de agua potable, respectivamente, según los estándares de calidad del agua de la Normativa de Calidad de Agua del Ecuador, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y la Organización Mundial de la Salud.

Aunque hay extensas áreas de páramo en los Andes del Ecuador que se ven afectadas por actividades antropogénicas (por ejemplo, pastoreo, agricultura y minería), hasta el momento existe solamente un estudio sobre los impactos de tales prácticas en la calidad química del agua de los arroyos y ríos que reciben sus descargas. En una cuenca de páramo en el sur del Ecuador se observó un deterioro en varios parámetros de calidad de agua (demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, coliformes totales, nitratos y sólidos suspendidos) a medida que el porcentaje de área destinada a ganadería aumentaba (Matovelle, 2022). Cabe resaltar que, si bien en las primeras etapas de los procesos de contaminación los suelos de páramo pueden acumular los metales, una vez los suelos alcancen su máxima capacidad de acumulación se convertirán en una enorme fuente de contaminación (González-Martínez et al., 2019). Este riesgo puede potenciarse por las condiciones de acidez de los suelos de páramo que facilitan la movilidad de metales y plaguicidas hacia el caudal (Mojica y Guerrero, 2013; González-Martínez et al., 2019).

Conclusiones y principales vacíos de conocimiento

Debido a la topografía compleja y los procesos climáticos causados por la presencia de la cordillera de los Andes, se ha encontrado una alta variabilidad espacial de precipitación a lo largo del páramo ecuatoriano. Aunque las mediciones de precipitación en campo han aumentado en varias regiones particularmente en el norte y sur del Ecuador en la última década, todavía existen muchos vacíos de datos, especialmente en el centro del país. Adicionalmente, a pesar de la esperada influencia de la niebla en el balance hídrico del páramo, este componente hidrológico aún no se ha investigado en detalle con excepción del sur del Ecuador. La evapotranspiración ha sido investigada en pajonales de páramo del sur del Ecuador, pero no existen cuantificaciones de este proceso hidrológico y su partición en diferentes componentes (intercepción, transpiración y evaporación del suelo) para pajonales en otras regiones, ni para otros tipos de vegetación (rosetas, arbustos, almohadillas y bosques nativos). También faltan estudios de la evaporación de lagos, humedales y suelos a lo largo del páramo ecuatoriano.

La mayoría de los estudios de flujo superficial y subsuperficial se han desarrollado para el páramo húmedo en el sur de Ecuador dominado por suelos volcánicos delgados (< 1-2 m) y un lecho rocoso con muy baja permeabilidad. Sin embargo, el conocimiento aún es escaso para las regiones de páramo estacionalmente secas como en la parte central del país. La infiltración de agua ha

sido investigada principalmente en sitios que presentan suelos volcánicos en el norte y sur del Ecuador, particularmente en ambientes dominados por pajonales altoandinos. Todavía no existen investigaciones sobre la infiltración en regiones con diferentes tipos de suelo tales como los Histosoles (turbas) formados a partir de la acumulación de materia orgánica, así como para diferente tipo de cobertura vegetal (por ejemplo, almohadillas, arbustos, bosques de *Polylepis* y frailejones). Aunque se conoce bien el movimiento del agua a través de los suelos de páramo de origen volcánico (Andosoles), faltan investigaciones en suelos no volcánicos y suelos ricos en materia orgánica (Histosoles). La comprensión de los procesos de lluvia-escorrentía es bien conocida para cuencas de páramo conservadas que poseen suelos volcánicos delgados (hasta unos pocos metros de profundidad) y lecho rocoso compacto, pero falta conocimiento para otras combinaciones de suelo y geología, particularmente para cuencas con alta permeabilidad del lecho rocoso. El papel de los lagos en el rendimiento hídrico y la regulación de caudales también sigue sin estudiarse. Cabe destacar que, a pesar del papel clave que desempeñan los humedales andinos como principales fuentes de generación de caudales en el sur del Ecuador, su dinámica hidrológica (por ejemplo, la variabilidad temporal de la humedad del suelo y la interacción con flujos subterráneos) aún se desconoce.

Además de la forestación con pinos, en el páramo ecuatoriano aún no se han investigado los impactos de otras plantaciones de especies exóticas (por ejemplo, *Cupressus* y *Eucalyptus*) y nativas (por ejemplo, *Polylepis*) sobre la dinámica y el almacenamiento del agua del suelo, así como sobre la generación y regulación de caudales. Asimismo, hace falta estudiar los posibles impactos (positivos o negativos) de las prácticas de revegetación en la hidrología como parte de la restauración de ecosistemas. La influencia de otros cambios en el uso de la tierra, incluidos los incendios, el pastoreo de ganado, la agricultura y la minería, en los procesos hidrológicos del páramo aún es limitada y muchas veces no concluyente o lo suficientemente detallada como para traducirse en recomendaciones de gestión. También faltan experimentos sobre cómo reaccionaría el contenido del agua del suelo a condiciones meteorológicas extremas, como las sequías, aunque dicha información podría ser muy valiosa para evaluar los impactos del cambio climático en el suelo del páramo y su hidrología a escala de cuenca. Adicionalmente, hacen falta evaluaciones sobre los efectos de la restauración en la función hidrológica del páramo.

A pesar de la noción proverbial de que el agua producida por las áreas de páramo andino conservadas es de alta calidad, existen muy pocas evaluaciones de la calidad química del agua en la literatura científica (concentración y carga anual), lo que hace que esta sea una brecha importante en el conocimiento que

debe llenarse en estudios futuros. Esto es particularmente significativo al considerar las implicaciones que altas concentraciones de compuestos orgánicos o la presencia de metales pesados de origen volcánico en el agua potable proveniente del páramo podrían tener sobre la salud humana y de animales domésticos. Además, los estudios de calidad del agua en áreas afectadas por cambios antropogénicos, incluyendo la extracción de minerales, la quema, la agricultura intensiva y el pastoreo, entre otros, aún son muy escasos en el páramo ecuatoriano. Esto puede ser particularmente importante en relación con la salud humana, cuando la contaminación relacionada con pesticidas, metales pesados, compuestos orgánicos y emergentes afecta el caudal generado.

Finalmente, un tema de relevancia en relación con la falta de estudios de calidad del agua se relaciona a la falta de control, monitoreo y seguimiento ambiental de las actividades humanas que se están ejecutando o planificando en el páramo ecuatoriano. De los estudios existentes se evidencia que los criterios de calidad ambiental o límites máximos permisibles para conservación de la vida natural no son, en muchos casos, aplicables ya que en su mayoría son menores a las concentraciones que se encuentran naturalmente en zonas de páramo (debido principalmente al origen volcánico de los suelos y la roca subyacente). Esto evidencia la urgencia de estudiar sobre calidad de agua y de desarrollar metodologías para el cálculo de valores de fondo. Sin dicha información, el seguimiento ambiental de actividades tan importantes como la extracción de minerales resulta compleja para el estado ecuatoriano, ministerios del ramo y gobiernos autónomos descentralizados, lo cual pone en grave riesgo a ecosistemas montañosos como el páramo y a la población que depende de ellos.



—CAPÍTULO 4

LA FLORA DE LOS PÁRAMOS ECUATORIANOS: ORÍGENES, DIVERSIDAD Y ENDEMISMO

Katya Romoleroux |
Priscilla Muriel | Petr Sklenář |
Carmen Ulloa Ulloa | David Espinel |
Chaquira Romoleroux

Urcurrosa (*Ranunculus gusmanii*).
Fotografía: Robert Hofstede



Resumen

Este capítulo presenta información actualizada sobre la flora, ecología y biogeografía de los páramos del Ecuador. La flora del páramo es producto de las adaptaciones a condiciones climáticas y edáficas especiales de elementos de la flora austral-antártica y de elementos holárticos. El levantamiento de los Andes y los eventos glaciares e interglaciares del Pleistoceno, además de las actividades antrópicas, ayudaron a consolidar las comunidades vegetales andinas. Así, la composición genérica de la flora paramuna comprende un 45 % de elementos de origen templado, 45 % de origen neotropical y 7 % son endémicos del Ecuador.

De acuerdo con el sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental, el páramo puede dividirse en tres categorías tradicionalmente propuestas (superpáramo, páramo y subpáramo), que comprenden varios tipos de vegetación, en función de las condiciones propias de las localidades y de las formas de crecimiento de su flora (rosetas gigantes, pajonales, hierbas acaulescentes, arbustos esclerófilos y plantas en almohadillas). Los páramos al sur del valle del Girón-Paute, más antiguos geológicamente, se encuentran a menor altitud y se diferencian por tener más especies leñosas mientras las plantas en almohadilla están casi ausentes.

Los diferentes páramos ecuatorianos, al igual que las otras regiones alpinas, varían en su diversidad florística debido a la elevación, el hábitat y la perturbación. En el presente capítulo registramos 1735 especies de plantas vasculares (1522 angiospermas, 208 pteridofitas y cinco gimnospermas), de las cuales 1696 son nativas, 690 son endémicas para el Ecuador y 39 son introducidas en el país. Las 10 familias más diversas son Asteraceae, Orchidaceae, Poaceae, Melastomataceae, Campanulaceae, Rosaceae, Ericaceae, Polypodiaceae, Cyperaceae y Lycopodiaceae, y los 10 géneros más ricos son *Epidendrum*, *Elaphoglossum*, *Phlegmariurus*, *Calceolaria*, *Senecio*, *Gentianella*, *Valeriana*, *Miconia*, *Gynoxys* y *Lachemilla*.

La flora de páramo tiene un alto porcentaje de endemismo, especialmente en los cinturones altitudinales más estrechos y fragmentados. De las 690 especies endémicas del Ecuador mencionadas aquí, varias son exclusivas de este ecosistema.

El páramo ecuatoriano, en relación con su área, es muy diverso por su alto número de especies nativas y endémicas. A la vez, el páramo es uno de los ecosistemas más vulnerables frente a los cambios ambientales y otros procesos antrópicos, por lo que la mayoría de las especies se encuentran en peligro. Es necesario continuar con el estudio de la flora del páramo y contar con un listado completo y actualizado de las especies, que sirva como una herramienta de base para procesos de conservación y toma de decisiones de este importante ecosistema.

Summary

This chapter presents updated information on the flora, ecology, and biogeography of Ecuador's páramo. The páramo flora is the product of adaptations to special climatic and edaphic conditions of elements of the austral-Antarctic and Holarctic flora. The uplift of the Andes and the Pleistocene glacial and interglacial events, in addition to anthropogenic activities, helped to consolidate the Andean plant communities. Thus, the generic composition of the páramo flora comprises 45% of elements of temperate origin, 45% of neotropical origin and 7% endemic.

According to the ecosystem classification system of continental Ecuador, the páramo can be divided into three traditionally proposed categories (superpáramo, páramo and subpáramo), which include various types of vegetation, depending on the conditions of the localities and the growth forms of their flora (giant rosettes, tussock plants, acaulescent grasses, sclerophyllous shrubs and cushion plants). The páramos south of the Girón-Paute valley, geologically older, are at a lower altitude and differ in having more woody species, while cushion plants are almost absent.

The different Ecuadorian páramos, like other alpine regions, vary in their floristic diversity due to elevation, habitat, and degree of disturbance. In the present chapter we recorded 1735 vascular plant species (1522 angiosperms, 208 pteridophytes and five gymnosperms), of which 1696 are native, 690 are endemic to Ecuador and 39 are introduced. The 10 most diverse families are Asteraceae, Orchidaceae, Poaceae, Melastomataceae, Campanulaceae, Rosaceae, Ericaceae, Polypodiaceae, Cyperaceae and Lycopodiaceae while the 10 richest genera are *Epidendrum*, *Elaphoglossum*, *Phlegmariurus*, *Calceolaria*, *Senecio*, *Gentianella*, *Valeriana*, *Miconia*, *Gynoxys*, and *Lachemilla*.

The páramo flora has a high percentage of endemism, especially in the narrower and more fragmented altitudinal belts. Of the 690 species endemic to Ecuador, several are exclusive to this ecosystem.

The Ecuadorian páramo, in relation to its area, is very diverse due to its high number of native and endemic species. At the same time, the páramo is one of the ecosystems most vulnerable to environmental changes and other anthropogenic processes, which is why most species are endangered. It is necessary to continue with the study of the páramo flora and to have a complete and updated list of species, which will serve as a basic tool for conservation and decision-making processes in this important ecosystem.

Introducción

En este capítulo estudiamos la flora de los páramos ecuatorianos desde puntos de vista biogeográficos, ecológicos y taxonómicos, y analizamos las amenazas que existen sobre ella. El objetivo es contar con información lo más exhaustiva y actualizada posible sobre este elemento para contribuir a la generación de políticas y la toma de decisiones relacionadas con la conservación y el manejo del páramo, un ecosistema fundamental para el desarrollo sustentable del Ecuador.

Reseña de los orígenes y la evolución de la flora del páramo

La flora del páramo tiene diversos orígenes; una de las sugerencias más probables indica que la flora inicial en el protopáramo se pudo haber desarrollado en las cimas de las colinas tipo sabana a partir de especies precursoras ya adaptadas a un clima con marcada estacionalidad pluvial o condiciones edáficas especiales (Sklenář et al., 2010; van der Hammen y Cleef, 1986). Como consecuencia del levantamiento final de los Andes septentrionales, a la vegetación del páramo temprano se le sumaron paulatinamente elementos de la flora austral-antártica que migró hacia el norte (Cleef, 1981; Hooghiemstra et al., 2006; van der Hammen y Cleef, 1986) y, además, elementos holárticos que migraron desde el hemisferio norte y se adaptaron a las condiciones climáticas y edáficas del páramo (Londoño et al., 2014; Ulloa Ulloa y Jørgensen, 1993). Posteriormente, los eventos glaciares e interglaciares ocurridos durante el Pleistoceno desplazaron, constantemente, de manera altitudinal las zonas de vegetación andinas (Hooghiemstra, 1984; van der Hammen, 1974). Sin embargo, desde finales del Holoceno las crecientes actividades antropogénicas han afectado a la flora del páramo (Hofstede, 1995; Luteyn, 1999; Verweij, 1995).

El origen de los géneros que se encuentran en los páramos ecuatorianos es muy variado: aproximadamente el 45 % son de origen templado, el 45 % de origen neotropical y el 7 % son endémicos (Hofstede et al., 2014). Esta proporción puede variar de acuerdo con la localidad, el tipo de páramo, y las predisposiciones ecológicas de los géneros. Sklenář y Balslev (2007) encontraron que más de la mitad de los géneros tropicales y templados estudiados en el superpáramo del Ecuador se distribuyen en zonas templadas, un 40 % en zonas tropicales y un 2 % son endémicos del páramo; sin embargo, señalaron que al desglosar los géneros templados y tropicales en los elementos geográficos de la flora que los constituyen, se encuentra una desviación significativa de los valores esperados sobre

los 4500 m de altitud. Los géneros de los elementos templado amplio, holártico y alpino andino aumentan significativamente al incrementar la altitud, mientras que los elementos neotropical montano, austral-antártico, endémico del páramo, y cosmopolita disminuyen significativamente con la altitud. Por otro lado, los datos filogenéticos sustentan que los géneros tropicales y templados contribuyeron por igual a la riqueza de especies actual de la flora del páramo. Entre los géneros templados, los géneros del hemisferio norte dieron lugar a más especies en el páramo que los géneros del hemisferio sur (Sklenář et al., 2010).

Tipos de vegetación y diversidad florística

El páramo es uno de los ecosistemas de montaña con más alta biodiversidad en el mundo (Luteyn, 1999; Muellner-Riehl et al., 2019; Smith y Cleef, 1988) y presenta altos niveles de especiación (Madriñán et al., 2013). Esta alta diversidad puede ser explicada por factores bióticos y abióticos (Pouchon et al., 2018, Perrigo et al., 2020; Muellner-Riehl et al., 2019; Guayasamín et al., 2021). En las montañas, por ejemplo, hay factores como la sedimentación, la formación del suelo y la orogenia que interactúan entre sí y con el clima, lo que genera alta heterogeneidad ambiental y propicia la existencia de una gran diversidad de especies (Perrigo et al., 2020). A eso se suman factores evolutivos como el flujo genético, el aislamiento reproductivo y eventos de hibridación y poliploidía que juegan un papel importante en la especiación, particularmente en las montañas (Steinbauer et al., 2016). Además, los eventos de glaciación ocurridos dentro de los últimos dos millones de años sirvieron como barreras geográficas que gatillaron procesos de especiación y adaptación en los páramos (Flantua et al., 2019; Kerr, 2004). Este aislamiento fue clave para la especiación y es consistente con el aumento directamente proporcional del porcentaje de endemismo y la elevación que se encuentra en las altas montañas.

Síntesis de los tipos de vegetación existentes en el páramo

Inicialmente, Cuatrecasas (1958, 1968) dividió la vegetación zonal de páramo en tres cinturones elevacionales, principalmente en referencia a los páramos colombianos: subpáramo arbustivo, páramo herbáceo (o páramo propiamente dicho) y superpáramo. Posteriormente, Peyre et al. (2018), en un análisis a gran escala de la vegetación en toda la región del páramo en Sudamérica, clasificaron la vegetación en tres tipos equivalentes: el subpáramo entre aproximadamente 3000 y 3500 m, el páramo medio entre 3500 y 4200 m, y el superpáramo entre 4200 y 5000 m. La posición altitudinal de los cinturones de vegetación es asimétrica, alcanzando

una elevación más baja en los lados húmedos de las montañas (Cleef, 1981; van der Hammen y Cleef, 1986). La vegetación de páramo dominada por bambúes ocurre en las laderas muy húmedas de los Andes. La vegetación se compone de cinco formas de crecimiento/vida básicas: rosetas gigantes, pajonales, hierbas acaulescentes, arbustos esclerófilos y plantas en almohadillas/cojines (Hedberg y Hedberg, 1979; Mena-Vásconez y Balslev, 1986; Luteyn, 1999). Actualmente, el sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013) define el páramo ecuatoriano como un ecosistema casi ininterrumpido que ocupa casi el 6 % del área total del país (más de 15 000 km²) y que se encuentra por sobre la línea de bosque de las cordilleras Oriental y Occidental, entre los pisos montano alto superior y subnival, con excepción de los páramos del sur en donde se encuentra por sobre los 2800 m de altitud (correspondientes al piso montano alto). El páramo está compuesto por diferentes tipos de ecosistemas, divididos en zonales y azonales, que comparten un ombrotipo húmedo o ultrahúmedo, y termotipos orotropicales o criotropicales.

La estructura de la vegetación de páramo en el Ecuador, generalmente, sigue las características anteriores (Ramsay, 1992; Sklenář, 2000; Sklenář y Lægaard 2003; Hansen et al., 2003; Moscol et al., 2009, Vargas et al., 2000). En este contexto, los ecosistemas de los altos Andes de Ecuador, que corresponden a lo que se conoce como páramos en general, están descritos en el *Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental* (MAE, 2014). A continuación, se describen los diferentes ecosistemas tradicionalmente incluidos dentro de las categorías superpáramo, páramo y subpáramo.

Subpáramo

El subpáramo está conformado por parches de bosques siempreverdes del páramo, con un estrato arbóreo de 5 a 7 m, dominado por pocas especies de *Polylepis* o *Gynoxys* (Figura 4.1), además de individuos de *Escallonia myrtilloides*, *Hesperomeles obtusifolia*, *Myrsine andina* y *Oreopanax andreanus*. Los árboles están cubiertos abundantemente por numerosas especies de briófitas, líquenes y epífitas. Tienen además un estrato arbustivo-herbáceo denso caracterizado por la presencia de especies de *Arcytophyllum*, *Barnadesia*, *Berberis*, *Puya*, *Brachyotum*, *Calamagrostis*, *Cortaderia*, *Diplostephium*, *Disterigma*, *Greigia*, *Pernettya*, *Senecio* y *Valeriana*. Sin embargo, este es uno de los ecosistemas más amenazados, pues su distribución se ha visto afectada por el cambio de uso del suelo, en especial debido a la agricultura, pastoreo, extracción de leña y quemas, además del aislamiento marcado de estos parches boscosos al estar embebidos en medio del Rosetal caulescente y el Herbazal del Páramo (Cuesta et al., 2013a).

Adicionalmente, en esta franja están incluidos el Arbustal siempreverde y el Herbazal del páramo (Salgado et al., 2013a), ecosistemas constituidos por arbustos de hasta 3 m de altura en parches mezclados con pajonales de *Calamagrostis* spp., y el Arbustal siempreverde montano alto del páramo del sur, una formación caracterizada por la presencia de árboles y arbustos leñosos de tamaño reducido de taxones como *Hesperomeles*, *Rubus*, *Ribes*, *Berberis*, *Desfontainia*, Ericaceae, Rosaceae, Asteraceae y Polygalaceae. En la provincia de Loja este ecosistema se conoce como 'paramillo' y posee elementos arbustivos y herbáceos característicos de los géneros *Puya*, *Miconia*, *Chusquea* (*Neurolepis*), *Oreocallis*, *Weinmannia* y *Blechnum* (Lozano y Mena-Vásconez, 2013).



Figura 4.1 Bosquete de *Gynoxys acostae* en el subpáramo en la antigua vía a Papallacta, cerca del Parque Nacional Cayambe Coca. Fotografía: Patricio Mena-Vásconez

Páramo

El tipo dominante de la vegetación de páramo en el Ecuador son los pastizales (pajonales) que corresponden al páramo propiamente dicho propuesto por Cuatrecasas (1958), el páramo medio descrito por Peyre et al. (2018) y el Herbazal del páramo descrito en el sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador Continental (Salgado et al., 2013b). De acuerdo con este último, este ecosistema ocupa al 2013 casi el 70 % de todos los páramos y más del 4 % del área total del Ecuador (Capítulo 1). El páramo de pajonal en el Ecuador se caracteriza, generalmente, por la presencia dominante de *Calamagrostis intermedia* y *Calamagrostis effusa* (este último solo en Carchi; Ramsay, 1992; Ramsay y Oxley, 2001; Sklenář y Ramsay, 2001; Sklenář, 2006).

Los rosetales caulescentes y herbazales del páramo son ecosistemas dominados por hierbas de roseta gigante (frailejones) que presentan un solo tallo de hasta 10 m (Cuesta et al., 2013a). *Espeletia* está representado en el páramo de pastizal del Ecuador por una sola especie, *Espeletia pycnophylla*, principalmente en Carchi (subsp. *angelensis*), pero presente también en Sucumbíos e Imbabura (Ramsay, 1992; Sklenář, 2000, Moscol et al., 2009), con una población disyunta en Llanganates (subsp. *llanganatensis*). Esto indica conexiones estrechas con los páramos adyacentes de Colombia (Londoño et al., 2014; Figura 4.2).



Figura 4.2 Páramo de pajonal (*Calamagrostis intermedia*) con frailejones (*Espeletia pycnophylla*) en la Reserva Ecológica El Ángel. Nótese la formación boscosa en la base del farallón. Fotografía: Patricio Mena-Vásconez

Los arbustos esclerófilos (*Diplostephium*, *Linochilus*, *Andicolea* [antes *Loricaria*], *Monticalia*, *Pentacalia*) y las plantas en almohadilla (*Azorella* spp., *Plantago rigida*) son características prominentes de los páramos ecuatorianos. Este tipo de vegetación es particularmente abundante en las zonas húmedas y corresponde al superpáramo inferior *sensu* Cuatrecasas (1989).

Superpáramo

Tradicionalmente, el superpáramo suele dividirse en inferior y superior en función de la presencia de formas de crecimiento y la composición de especies (Sklenář, 2006; Sklenář y Balslev, 2005; Peyre et al., 2018).

Los Herbazales y Arbustal siempreverdes subnavales del páramo son herbazales compuestos por una vegetación fragmentada, con suelo desnudo entre los parches de vegetación, y contienen dispersos arbustos esclerófilos semi-prostrados pequeños; se localizan en morrenas, circos glaciares, escarpamentos rocosos, depósitos de rocas glaciares y pendientes pronunciadas de arena o quebradas estrechas en las zonas más altas de los Andes del norte del Ecuador (Cuesta et al., 2013c, 2013d, 2013e). Las condiciones extremas del ambiente (gran variación de temperatura y de humedad) ejercen una presión selectiva fuerte sobre las especies vegetales, por lo que en este ecosistema muchas de las especies presentan adaptaciones fisiológicas singulares. Entre las especies dominantes de este tipo de vegetación se pueden encontrar arbustos esclerófilos enanos (géneros *Andicolea*, *Diplostephium*, *Linochilus*, *Monticalia*), cojines (*Azorella*, *Distichia*, *Plantago*, *Werneria* [antes *Xenophyllum*]) y hierbas de tallo corto (*Calamagrostis*, *Poa*, *Stipa*).

El Herbazal húmedo subnival del páramo (Cuesta et al., 2013d) comprende herbazales dispersos restringidos a las partes montañosas más altas, generalmente sobre los 4500 m. Son comunidades con composiciones florísticas muy heterogéneas, debido a diferencias marcadas en orientación, pendiente y precipitación, y variaciones de la humedad ambiental en los Andes. Aquí predominan las formas de vida graminoides de tallo corto (*Calamagrostis mollis* y *Agrostis toluensis*), las rosetas acaulescentes, las hierbas en cojín, y arbustos esclerófilos ocasionales (*Chuquiraga jussieui*, *Andicolea* spp.), prostrados (*Astragalus geminiflorus* y *Baccharis caespitosa*) y erectos (*Valeriana alypifolia*), y hierbas de tallo corto (Figura 4.3). Este ecosistema tiene una baja representación de briofitas (Sklenář y Lægaard, 2003), pero alberga varias especies de cojines edafoxerófilos, que están fisiológicamente adaptados a las condiciones climáticas extremas.



Figura 4.3 Algunas plantas que se encuentran en el superpáramo. a) *Chuquiraga jussieui*. b) *Astragalus geminiflorus*. c) *Azorella pedunculata*. d) *Distichia muscoides*. Fotografías: Patricio Mena-Vásquez (a) y Priscilla Muriel (b-d)

El Herbazal ultrahúmedo subnival del páramo, presente en laderas escarpadas cubiertas por depósitos glaciares y con suelos geliturbados de estabilidad variable, está dominado por arbustos postrados o almohadillas dispersas. Son zonas con una alta humedad por su exposición hacia las zonas de formación de precipitación de la Amazonía, las cuales influyen sobre su composición florística, caracterizada por una alta diversidad de especies y una importante presencia de briofitas. En estas formaciones existen muchas especies de distribución restringida, lo que genera un elevado recambio en la comunidad de plantas vasculares. Las familias dominantes —Asteraceae y Poaceae— incluyen casi un tercio del total de especies registradas para estos sitios (Cuesta et al., 2013e).

Páramos septentrionales vs. páramos australes

La perturbación natural en forma de actividad volcánica es un factor importante que afecta a la vegetación de páramo en los Andes septentrionales. Por ejemplo, Løjtman y Molau (1983) describieron la vegetación pionera del páramo de la cumbre húmeda del volcán Sumaco, formada por arbustos bajos, helechos arborescentes como *Blechnum loxense*, *Cortaderia nitida* y una rica cobertura de briofitas. Sklenář (2006) reporta una vegetación similar de páramo en las laderas del volcán Tungurahua, en función de la estructura de la vegetación. Por ejemplo, en varios lahares antiguos de las laderas del volcán Cotopaxi, Sklenář et al. (2010) describieron la recuperación de la vegetación de páramo.

La vegetación de los páramos localizados al sur del valle del Girón-Paute es muy diferente a la del páramo zonal del centro y norte del Ecuador (Jørgensen et al., 1995). Las cordilleras al sur del país habitualmente no superan los 4000 m, por lo que no se ha descrito el superpáramo. En general, los páramos del sur del Ecuador (como en el Parque Nacional Podocarpus) tienen una mayor proporción de especies leñosas (Ericaceae, Melastomataceae, Asteraceae) en comparación con el resto del país (Keating, 2000). En el Parque Nacional Podocarpus, la vegetación abierta de páramo puede alcanzar hasta 3000 m de altitud, posiblemente como resultado de perturbaciones humanas pasadas (Keating, 2000). Las plantas en almohadilla están casi ausentes (excepto *Oreobolus*) y hay una alta abundancia local de rosetas de *Puya* (Lozano y Mena-Vásconez, 2013). En estos herbazales de páramo, ubicados en áreas de laderas con pendiente fuerte o en planicies con suelos hidromorfos, es característica la presencia de comunidades pioneras de gramíneas bambusoideas dominadas por *Chusquea* spp. (Salgado et al., 2013b).

Diversidad de las especies de plantas vasculares registradas en el páramo

En su listado de plantas de páramo, Luteyn (1999) registró 1242 especies para el Ecuador. Posteriormente, Sklenář et al. (2005) estimaron alrededor de 1500 especies. Cuesta et al. (2014) caracterizaron los patrones de la diversidad vegetal de las cuatro fisonomías de páramos del Ecuador (bosques en páramos, herbazales inundables, herbazales no inundables y matorrales) y la variación en la composición florística a partir de los datos de composición y estructura de las comunidades de plantas vasculares provenientes de 23 localidades de páramo. Los registros de páramo levantados durante este estudio se combinaron con los datos de vegetación

provenientes de diversas fuentes (herbarios, levantamientos florísticos de proyectos, registros personales de expertos, etc.) para generar una lista anotada de especies de páramo (Muriel et al., 2014), que registra 1439 nombres de taxones reportados para este ecosistema, correspondientes a 1400 especies, 14 subespecies y 25 variedades, dentro de 119 familias y 391 géneros. Adicionalmente, se han llevado a cabo estudios focalizados en la diversidad florística de diferentes localidades, especialmente en áreas protegidas. A continuación, destacamos algunos trabajos que recopilan información de la flora paramera, geográficamente de norte a sur.

En el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), Ulloa Ulloa y Fernández (2015) registraron 79 especies características de los páramos. En la provincia de Napo, en los páramos de Oyacachi, Romoleroux et al. (2016) encontraron 146 especies de plantas vasculares asociadas a los bosques de *Polylepis* de este ecosistema.

En el Parque Nacional Llanganates, Vargas et al. (2000) reportaron más de 800 especies de plantas vasculares, de las cuales casi 200 ocurrían en el páramo (en su mayoría pastizales). A estas hay que añadir otras como las que habitan el superpáramo de Cerro Hermoso, entre las que se incluyen *Andicolea scolopendra* (antes *Loricaria scolopendra*), *Floscaldasia azurelloides*, *Oritrophium llanganatense* y *O. ollgaardii* (Sklenář refs. y obs. pers. 2010).

En el páramo del Parque Nacional Cajas (Azuay) se han reportado 89 familias, 264 géneros y 666 especies de plantas vasculares, 36 de ellas acuáticas (Ansaloni et al., 2022). Asteraceae es la familia más rica en especies, seguida de Poaceae, Rosaceae, Cyperaceae y Brassicaceae. Los géneros más ricos en especies son *Lachemilla*, *Baccharis*, *Calamagrostis*, *Phlegmariurus* y *Valeriana*.

Para los páramos del Parque Nacional Podocarpus, Lozano et al. (2009) reportaron 61 géneros y 187 especies, mientras que Cabrera et al. (2001) registraron 93 géneros y 221 especies. Tan solo el páramo de Cajanuma, en este parque nacional, contiene 50 familias, 81 géneros y 130 especies, de las cuales aproximadamente la mitad son leñosas y la otra mitad son hierbas (Keating, 1997).

En los páramos del norte de Loja y sur de Azuay (como en Fierro Urco y Cordoncillo) se han registrado 43 familias, 120 géneros y 216 especies de plantas vasculares (Izco et al., 2007). Allí, extensas plantaciones de *Pinus patula* se mezclan con comunidades vegetales de pajonal a 2800-3000 m, dando paso a un pajonal casi continuo sobre los 3000 m, al menos en la zona de Cordoncillo. Al igual que en las regiones comentadas anteriormente, Asteraceae, Poaceae, Cyperaceae y Ericaceae son las familias más ricas en especies.

En un peculiar páramo pionero del volcán Sumaco se reportaron 43 especies de plantas vasculares (Løjtntant y Molau, 1983).

La riqueza de especies de las regiones de páramo ecuatorianas varía principalmente por el área, la diversidad del hábitat y el régimen de perturbación

(Sklenář y Ramsay, 2001; Sklenář y Balslev, 2005; Londoño et al., 2014; Testolin et al., 2021). Por ejemplo, el número de especies disminuye con la elevación (Sklenář y Ramsay, 2001; Jørgensen y León-Yáñez, 1999), lo que concuerda con el patrón general observado en el cinturón alpino en todo el mundo (Körner, 1995; Capítulo 12). Sin embargo, las perturbaciones antropogénicas provocadas por la quema y el pastoreo pueden cambiar este patrón en el páramo de pajonal.

Para este capítulo hemos recopilado información de varias fuentes: Luteyn (1999), León-Yáñez (2011), MAE (2014), Muriel et al. (2014), Romoleroux et al. (2016), Ulloa Ulloa et al. (2017), Minga et al. (2019) y Ansaloni et al. (2022), y también se revisaron repositorios digitales como Tropicos (Tropicos.org, 2022) y Bioweb (Romoleroux et al., 2018). Como resultado se obtuvo una lista preliminar con un total de 1735 especies de plantas vasculares para el páramo ecuatoriano, de las cuales 1522 son angiospermas, 208 pteridofitas y cinco gimnospermas; además, del total de especies registradas 1696 son nativas, 690 son endémicas para el Ecuador y 39 son introducidas al país (Anexo 4.1). Las 10 familias más diversas de plantas vasculares en los páramos ecuatorianos son Asteraceae, Orchidaceae, Poaceae, Melastomataceae, Campanulaceae, Rosaceae, Ericaceae, Polypodiaceae, Cyperaceae y Lycopodiaceae (Tabla 4.1, Figura 4.4). En cuanto a la diversidad de géneros, los 10 taxones más ricos en especies son *Epidendrum*, *Elaphoglossum*, *Phlegmariurus*, *Calceolaria*, *Senecio*, *Gentianella*, *Valeriana*, *Miconia*, *Gynoxys* y *Lachemilla* (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Las 10 familias de plantas vasculares y los 10 géneros más diversos del páramo ecuatoriano.

Familia	No. spp.	Género (Familia)	No. spp.
Asteraceae	312	<i>Epidendrum</i> (Orchidaceae)	46
Orchidaceae	173	<i>Elaphoglossum</i> (Dryopteridaceae)	33
Poaceae	123	<i>Phlegmariurus</i> (Lycopodiaceae)	33
Melastomataceae	60	<i>Calceolaria</i> (Calceolariaceae)	30
Campanulaceae	56	<i>Senecio</i> (Asteraceae)	28
Rosaceae	56	<i>Gentianella</i> (Gentianaceae)	26
Ericaceae	50	<i>Valeriana</i> (Caprifoliaceae)	26
Polypodiaceae	48	<i>Miconia</i> (Melastomataceae)	26
Cyperaceae	46	<i>Gynoxys</i> (Asteraceae)	26
Lycopodiaceae	41	<i>Lachemilla</i> (Rosaceae)	24

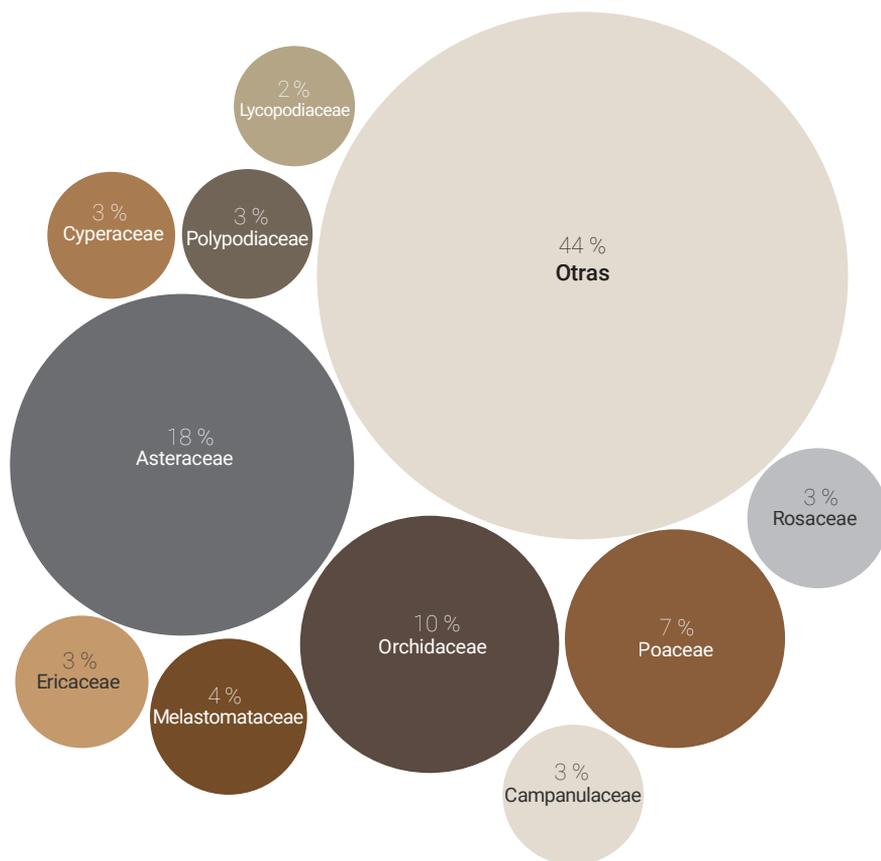


Figura 4.4 Porcentaje de especies por familia, recalcando las diez familias más diversas de los páramos ecuatorianos.

Endemismo¹

Los sistemas montañosos, de los que son parte los páramos, presentan una alta concentración de plantas endémicas para el ecosistema, que alcanzan un 80 % (Luteyn, 1999; Kessler, 2002; Muellner-Riehl et al., 2019). En general, la flora

¹ Nota de los editores: el endemismo es un concepto para identificar un taxón o un grupo biológico con una distribución limitada a un área geográfica específica. Así, las especies (o géneros o familias) “endémicas del páramo” son aquellas que únicamente ocurren en este ecosistema y no crecen en otras partes. También se puede expresar el endemismo relevante a un país (por ejemplo, “endémicas del Ecuador”) o un área particular (“endémica del Parque Nacional Sangay”) aunque estas unidades no representen realidades biogeográficas. En este libro, siempre se expresa el área geográfica a la cuál está restringida la distribución del taxón endémico.

muestra el mayor endemismo en los cinturones altitudinales más estrechos y fragmentados, presumiblemente debido al consiguiente fraccionamiento de las poblaciones de especies (Kessler, 2002). En los Andes, la mayor conectividad geográfica de las mesetas montañosas permite que las especies de alta montaña se distribuyan ampliamente, mientras que las especies que habitan las laderas empinadas y topográficamente complejas tienen áreas de distribución estrechas y fragmentadas y, por lo tanto, tienden al endemismo local (Sklenář y Jørgensen, 1999; Kessler, 2002).

El endemismo en los páramos ecuatorianos

Luteyn (1999) enumeró 1242 especies, de las cuales 470 especies (el 38 %) son endémicas para los páramos ecuatorianos (Londoño et al., 2014). Esta proporción de endemismo es comparable a la de los páramos de Venezuela, pero es inferior por un 10 % a los páramos de Colombia. Sin embargo, las listas proporcionadas por Luteyn (1999) contenían especies que no se limitan a hábitats estrictamente alpinos, como epífitas (Orchidaceae) y algunas parásitas (Loranthaceae).

A nivel nacional, de acuerdo con el *Libro Rojo de plantas endémicas del Ecuador* (León-Yáñez, 2011) se registraron 659 especies endémicas de plantas que crecen en el páramo, que son endémicas para el país. De estas, 273 crecen exclusivamente en páramos y el resto también se encuentran en otros ecosistemas. De los taxones exclusivos del páramo, Asteraceae y Orchidaceae son las familias más diversas con 44 y 45 especies respectivamente, seguidas por Gentianaceae y Poaceae con 25 y 18 especies. En cuanto a la diversidad de géneros *Gentiana* (Gentianaceae) se encuentra como el más diverso, con 20 especies, seguido por *Draba* (Brassicaceae), con 11 especies. El número de especies endémicas para el país, así como el número de especies nativas, ha incrementado en los últimos 11 años (Figura 4.5). Ulloa Ulloa et al. (2017) registraron aproximadamente 6064 especies de plantas vasculares endémicas para el Ecuador. Recientemente se publicó el Catálogo de la Flora Vasculare del Parque Nacional Cajas (Ansaloni et al., 2022) donde se registraron 666 especies, de las cuales hay 93 especies endémicas de angiospermas y ocho especies endémicas de helechos. En esta publicación se mencionan especies parameras endémicas para el Ecuador que no constaban en el *Libro Rojo* (León-Yáñez et al., 2011) como *Hypolepis crassa* y *Elaphoglossum cardiophyllum*.



Figura 4.5 Algunas plantas endémicas. a) *Brachyotum johannes-julii*, endémica de las zonas de Cajanuma y Nangaritza en el Parque Nacional Podocarpus. b) *Aphanactis antisaniensis*. c) *Draba longiciliata*. d) *Rockhausenia spathulata*. Fotografías: Carmen Ulloa Ulloa (a) y Petr Sklenář (b-d)

La mayoría de las especies de páramo endémicas para el país se encuentran entre los 3000 y 4000 m (Beltrán et al., 2009; León-Yáñez, 2011; Hofstede et al., 2014). Sin embargo, la proporción de endemismo es menor en las floras de páramo de montañas individuales. Sklenář y Balslev (2005) estimaron que la proporción de especies endémicas confinadas a una sola montaña variaba entre el 2-3 % en la flora del superpáramo ecuatoriano.

Entre las plantas endémicas recientemente registradas para los páramos podemos citar a:

1. *Oritrophium llanganatense*, conocida únicamente del remoto (super) páramo de Cerro Hermoso en el Parque Nacional Llanganates (Sklenář y Robinson, 2000; Calvo et al., 2016).
2. *Draba longiciliata*, descubierta recientemente solo de un pequeño (super) páramo aislado en la provincia de Chimborazo (Al-Shehbaz y Sklenář, 2010).
3. *Werneria acerosa* (*Xenophyllum acerosum*), redescubierta en los páramos del sur del Ecuador (Sklenář y Romoleroux, 2021; Hind, 2022).
4. Del lado occidental del Antisana, *Aphanactis antisanensis* y *Rockhausenia spathulata* (antes *Werneria spathulata*) (Robinson, 1997; Sklenář y Romoleroux, 2021; Hind, 2022).

De acuerdo con León-Yáñez et al. (2011), las plantas endémicas para el país que crecen en los páramos, comprenden aproximadamente el 15 % de toda la flora endémica del país. Este dato es especialmente interesante considerando que el páramo comprende solo una extensión del 5 al 7 % del territorio nacional (Hofstede et al., 2014). Sobre el grado de amenaza, se registra que el 75 % de las especies endémicas para el Ecuador están amenazadas y solo el 48 % se encuentran dentro de áreas protegidas (León-Yáñez, 2011).

Estos hallazgos enfatizan la necesidad de la exploración de campo de la biodiversidad del páramo e instan a la conservación de estos hábitats en todo el país.

Plantas invasoras que amenazan la vegetación nativa del páramo

Existen numerosas especies de plantas introducidas en los páramos del Ecuador y queremos recalcar dos ejemplos de estas especies:

Senecio niveo-aureus (Figura 4.6): especie herbácea nativa de los páramos de Colombia que en las últimas décadas se ha vuelto popular como planta ornamental en los páramos ecuatorianos. Tiene atractivas hojas plateadas y gajos de flores amarillas y se encuentra plantada alrededor de haciendas y casas en la Sierra norte y centro. También es cultivada dentro de áreas protegidas, por ejemplo, alrededor de las instalaciones de entrada de El Ángel y en el centro de interpretación de la Hacienda Antisana. Aunque no se ha reportado que la especie haya escapado y naturalizado en otros páramos, al ser una Asteraceae posee frutos que se dispersan fácilmente con el viento y no sería raro que la especie naturalice; por ejemplo, ya se la ha registrado bastante cerca de una hacienda cercana en las estribaciones de Cerro Corazón (Sklenář et al., 2021).



Figura 4.6 *Senecio niveo-aureus*, especie traída de Colombia con potencial de volverse invasora. a) Detalle. b) Sembrada en potreros cerca del páramo en la antigua vía a Papallacta. Fotografías: Robert Hofstede (a) y Patricio Mena-Vásconez (b)



Figura 4.7 *Polylepis racemosa*, una especie traída del Perú por su rápido crecimiento y frondosidad, formando cortinas en el páramo de Pambamarca, Cayambe, Pichincha. Fotografía: Robert Hofstede

Polylepis racemosa (Figura 4.7): esta especie leñosa se introdujo en el Ecuador procedente del Perú en 1988 debido a su rápido crecimiento y frondosidad, y para la protección de recursos hídricos (Segovia, 2011). Actualmente, *P. racemosa* se distribuye por toda la región interandina ecuatoriana llegando hasta el páramo. Su rápido crecimiento le permite formar densos bosquetes (por ejemplo, cerca de la Laguna de Mojanda) que rápidamente cubren la vegetación nativa. La reforestación cerca de especies nativas mediante la introducción de especies foráneas en un mismo lugar puede desencadenar procesos de hibridación como ya se ha observado entre *P. racemosa* y *P. incana*; esto se ha convertido en un problema dentro y fuera del Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador (Caiza et al., 2021).

Conclusiones

En el Ecuador el páramo ocupa aproximadamente el 6 % del territorio nacional (1,52 millones de ha) y es uno de los países de la región andina con mayor número de especies nativas y endémicas de todos los páramos en relación con su área.

Si bien en los últimos 20 años se han realizado importantes avances en los estudios florísticos, especialmente aquellos focalizados en algunas regiones de los páramos ecuatorianos, es necesario integrarlos y continuar documentando la flora existente para obtener catálogos completos, actualizados y disponibles para todos los actores interesados en este ecosistema. Esta información actualizada constituirá una herramienta útil para monitorear y dar a conocer vacíos de información no solo taxonómicos, sino geográficos.

La composición de especies y la estructura de la vegetación de las comunidades del páramo zonal del Ecuador están determinadas por cuatro factores principales: la altitud, la humedad, el desarrollo del suelo (es decir, el tiempo transcurrido desde la perturbación volcánica) y las perturbaciones de origen antropogénico. Existe, además, un gradiente biogeográfico entre la vegetación de páramo del centro-norte y el sur del Ecuador que, sin embargo, es difícil de diferenciar del efecto de la altitud y de la historia volcánica y glacial.

En este estudio hemos registrado 690 especies en los páramos que solo ocurren en el país, lo cual representa aproximadamente el 12 % de la flora endémica del Ecuador. De acuerdo con León-Yáñez (2011), el 75 % de especies endémicas de los páramos están amenazadas y solo el 48 % se encuentran dentro de áreas protegidas. Esto último es de vital importancia, si se considera que Cuesta et al. (2015), en un estudio para determinar las áreas protegidas de Ecuador (PANE) con mayor probabilidad de ser afectadas por el cambio del clima, reportaron que, paralas plantas con flor y los helechos, varias de las áreas

protegidas que incluyen ecosistemas montañosos verán sus índices de riqueza de especies reducidos en los dos escenarios de cambio climático modelados.

Lamentablemente, los análisis más recientes sobre los efectos de las presiones antropogénicas en las áreas de montaña a nivel global presentan un panorama crítico: la sequía, las inundaciones, los cambios en la estacionalidad, la reducción de disponibilidad de agua, el incremento de plagas y la disminución de la diversidad de polinizadores tendrán consecuencias graves sobre los ecosistemas montañosos (Adler et al., 2022). En este sentido, la información de base para el presente capítulo constituye un insumo esencial para futuros análisis de conservación de la biodiversidad florística de los páramos del Ecuador.

Anexo 4.1 Lista de familias de páramo con el número de géneros (No. gen), total de especies (No. esp) y cantidad de especies nativas (No. nat), endémicas para el Ecuador (No. end) e introducidas en el Ecuador (No. int).

Familia	No. gen	No. esp	No. nat	No. end	No. int	Familia	No. gen	No. esp	No. nat	No. end	No. int
Acanthaceae	1	1	0	1	0	Hypericaceae	1	15	8	7	0
Alstroemeriaceae	1	16	8	8	0	Iridaceae	1	8	8	0	0
Amaranthaceae	1	2	1	1	0	Isoetaceae	1	6	5	1	0
Amaryllidaceae	2	2	1	1	0	Juncaceae	4	14	13	1	0
Apiaceae	12	25	22	3	0	Juncaginaceae	2	2	2	0	0
Apocynaceae	2	8	0	8	0	Lamiaceae	6	15	10	5	0
Aquifoliaceae	1	6	6	0	0	Lentibulariaceae	1	2	1	1	0
Aspleniaceae	2	12	12	0	0	Loasaceae	2	9	2	7	0
Asteraceae	72	312	147	159	6	Loganiaceae	1	2	2	0	0
Balanophoraceae	1	1	1	0	0	Loranthaceae	1	1	1	0	0
Begoniaceae	1	5	1	4	0	Lycopodiaceae	3	41	33	8	0
Berberidaceae	1	11	7	4	0	Malvaceae	2	5	1	4	0
Blechnaceae	1	9	8	1	0	Melastomataceae	5	60	27	33	0
Boraginaceae	5	8	7	0	1	Montiaceae	2	2	2	0	0
Brassicaceae	10	33	11	18	4	Myrtaceae	1	2	2	0	0
Bromeliaceae	4	29	8	21	0	Nyctaginaceae	1	2	1	1	0
Buddlejaceae	1	4	2	2	0	Onagraceae	4	9	6	3	0
Calceolariaceae	1	30	10	20	0	Ophioglossaceae	1	1	1	0	0
Callitrichaceae	1	2	2	0	0	Orchidaceae	31	173	68	105	0

Familia	No. gen	No. esp	No. nat	No. end	No. int
Campanulaceae	5	56	12	44	0
Capparaceae	1	1	1	0	0
Caprifoliaceae	1	26	14	12	0
Caryophyllaceae	9	29	21	5	3
Celastraceae	2	2	0	2	0
Chloranthaceae	1	2	1	1	0
Clethraceae	1	3	1	2	0
Columelliaceae	1	1	1	0	0
Convolvulaceae	1	1	1	0	0
Coriariaceae	1	1	1	0	0
Crassulaceae	1	3	3	0	0
Cunoniaceae	1	3	3	0	0
Cyatheaceae	1	1	1	0	0
Cyperaceae	12	46	38	6	2
Dennstaedtiaceae	2	4	3	1	0
Dicksoniaceae	3	3	3	0	0
Dioscoreaceae	1	2	0	2	0
Dryopteridaceae	3	38	26	12	0
Elaeocarpaceae	1	1	1	0	0
Elantinaeae	1	1	1	0	0
Ephedraceae	1	2	2	0	0
Equisetaceae	1	1	1	0	0
Ericaceae	14	50	26	24	0
Eriocaulaceae	3	5	3	2	0
Escalloniaceae	1	1	1	0	0
Euphorbiaceae	3	3	2	1	0
Fabaceae	8	26	16	9	1
Gentianaceae	5	37	9	27	1
Geraniaceae	1	20	12	8	0
Gesneriaceae	1	1	1	0	0
Gleicheniaceae	1	1	1	0	0
Grossulariaceae	1	9	5	4	0
Gunneraceae	1	1	1	0	0
Haloragaceae	1	1	1	0	0
Hydrocharitaceae	1	1	1	0	0
Hymenophyllaceae	1	9	9	0	0

Familia	No. gen	No. esp	No. nat	No. end	No. int
Orobanchaceae	4	20	17	3	0
Oxalidaceae	1	6	5	1	0
Passifloraceae	1	3	2	1	0
Phrymaceae	1	1	1	0	0
Phyllanthaceae	1	1	1	0	0
Piperaceae	1	13	7	6	0
Plagiogyriaceae	1	1	1	0	0
Plantaginaceae	6	14	10	0	4
Poaceae	31	123	76	35	12
Podocarpaceae	2	3	3	0	0
Polygalaceae	3	21	14	7	0
Polygonaceae	3	10	5	2	3
Polypodiaceae	14	48	44	4	0
Potamogetonaceae	1	3	3	0	0
Primulaceae	5	8	7	0	1
Proteaceae	2	2	2	0	0
Pteridaceae	4	19	19	0	0
Ranunculaceae	6	15	14	1	0
Rosaceae	8	56	40	15	1
Rubiaceae	4	18	14	4	0
Santalaceae	1	2	2	0	0
Saxifragaceae	1	2	1	1	0
Scrophulariaceae	1	1	1	0	0
Selaginellaceae	1	2	2	0	0
Solanaceae	7	31	21	10	0
Styracaceae	1	1	1	0	0
Symplocaceae	1	7	2	5	0
Theaceae	1	1	0	1	0
Thelypteridaceae	1	8	7	1	0
Tofieldiaceae	2	3	3	0	0
Tropaeolaceae	1	4	3	1	0
Violaceae	1	6	4	2	0
Viscaceae	1	1	0	1	0
Woodsiaceae	3	3	3	0	0
Xyridaceae	1	1	1	0	0
Total	406	1735	1006	690	39

—CAPÍTULO 5

LA FAUNA DE LOS PÁRAMOS ECUATORIANOS: RIQUEZA, ENDEMISMO, ADAPTACIONES Y AMENAZAS

Galo Zapata Ríos | Aura Paucar-Cabrera | Yerka Sagredo |
Tatiana Santander | Fernando Anaguano-Yancha

Cóndor andino (*Vultur gryphus*).
Fotografía: Esteban Suárez Robalino



Resumen

La cordillera de los Andes ha generado innumerables oportunidades para la evolución, especiación y radiación de la fauna andina. La cordillera tiene una variedad de microhábitats como resultado de intrincadas interrelaciones entre altitud, temperatura y pluviosidad. Los páramos son islas altitudinales, generalmente por encima de 3000–3500 m, y su componente biótico está conformado por elementos neotropicales de origen local, elementos subantárticos, que emigraron desde el sur, y elementos neárticos, que llegaron desde el norte a través del Istmo de Panamá.

La riqueza de especies en los páramos está relacionada con la gradiente de elevación, y el número de especies se reduce con el incremento en altitud. En cambio, el endemismo en los páramos (especies de distribución restringida geográficamente) es muy alto como resultado del aislamiento geográfico y la adaptación de las especies a condiciones ambientales extremas. Este patrón de la riqueza frente al endemismo se repite en la mayor parte de grupos taxonómicos. Los páramos generan fuertes presiones selectivas sobre las especies de fauna por las condiciones inhóspitas de sus hábitats (bajas concentraciones de oxígeno, bajas temperaturas, vientos extremos, e intensa radiación ultravioleta). Como resultado de estos procesos de adaptación a ambientes extremos, y producto de evolución convergente, muchas especies de vertebrados comparten rasgos biológicos similares (mayor longevidad, baja fecundidad, número reducido de huevos, camadas más pequeñas, y cuidado parental prolongado). A pesar de estos mecanismos sofisticados de adaptación, la fauna de los páramos es muy sensible a los impactos negativos de las actividades humanas.

Actualmente, las amenazas principales para la conservación de la fauna silvestre en los páramos incluyen destrucción y la consiguiente fragmentación de los hábitats; sobreexplotación, incluyendo tráfico de fauna silvestre; cambio climático, y la introducción de especies exóticas. En este contexto de continuo incremento de impactos antrópicos, nuestro conocimiento sobre la diversidad e historia natural de las especies altoandinas es todavía muy limitado. A esto se suma nuestra falta de conocimiento sobre los patrones de abundancia y diversidad de las especies, diversidad funcional y redundancia, y resistencia a disturbios y al cambio climático.

El conocimiento de la riqueza, evolución y amenazas a la fauna es esencial para la conservación de los páramos. Para garantizarla, necesitamos establecer iniciativas a escala de paisaje que incluyan la protección de áreas núcleo y garanticen la conectividad para asegurar la persistencia de especies con áreas de vida grande, especies migratorias, especies raras, especies con distribución restringida y fragmentada, y la diversidad de atributos funcionales.

Summary

The Andes have generated innumerable opportunities for the evolution, speciation, and radiation of Andean fauna. The range has a variety of microhabitats because of intricate interrelationships between altitude, temperature, and rainfall. The páramos are altitudinal islands above 3000–3500 m and their biotic component is established by Neotropical elements of local origin, sub-Antarctic elements, which migrated from the south, and Nearctic elements, which arrived from the north through the Isthmus of Panama.

Species richness in páramo is related to the elevation gradient, and the number of species decreases with increasing altitude. On the other hand, páramo endemism (species with geographically limited distribution) is very high because of geographic isolation and the adaptation of species to extreme environmental conditions. This pattern of richness vs. endemism is repeated in most taxonomic groups. Páramos generate strong selective pressures on fauna species due to the inhospitable conditions of their habitats (low oxygen concentrations, low temperatures, extreme winds, and intense ultraviolet radiation). As a result of these processes of adaptation to extreme environments, and as a product of convergent evolution, many vertebrate species share similar biological traits (greater longevity, low fecundity, reduced number of eggs, smaller litters, and prolonged parental care). Despite these sophisticated adaptive mechanisms, páramo fauna is very sensitive to the negative impacts of human activities.

Currently, the main threats to wildlife conservation in páramos include destruction and consequent fragmentation of habitats; overexploitation, including wildlife trafficking; climate change; and the introduction of exotic species. In this context of continually increasing anthropogenic impacts, our knowledge of the diversity and natural history of high Andean species is still very limited. This is compounded by our lack of knowledge about patterns of species abundance and diversity, functional diversity and redundancy, and resilience to disturbance and climate change.

The knowledge of fauna richness, evolution and threats is essential for the conservation of the páramo. To guarantee it we need to establish landscape-scale initiatives that include the protection of core areas and guarantee connectivity to ensure the persistence of species with large life ranges, migratory species, rare species, species with restricted and fragmented distribution, and the diversity of functional attributes.

Introducción

La influencia de la cordillera de los Andes ha sido crucial en la evolución de la biota en América del Sur. La diversidad de ecosistemas y hábitats creados por su surgimiento y presencia han generado inconmensurables oportunidades para la evolución, especiación y radiación de la fauna andina (Novillo y Ojeda, 2012). Los Andes representan un ejemplo de barrera biogeográfica para la dispersión de especies, facilitando el aislamiento y la diferenciación de las biotas a ambos lados de la cordillera (Brumfield y Edwards, 2007). Por otra parte, los Andes han facilitado la dispersión de especies desde y hacia América del Sur durante el Gran Intercambio Biótico Americano (Carrillo et al., 2015). La cordillera, además, ha generado una variedad enorme de microhábitats, como resultado de complejas interacciones entre altitud, temperatura y pluviosidad, las que han generado niveles de endemismo¹ incomparables con otros ecosistemas neotropicales (Young et al., 2007).

En las secciones más altas de la cordillera de los Andes, por encima de 3000–3500 m, los páramos forman una serie de islas altitudinales (Anthelme et al., 2014; Muñoz-Tobar y Caterino, 2020). El ensamble de las comunidades bióticas de los páramos, como las conocemos ahora, sucedió durante el periodo más reciente de formación de los Andes, hace aproximadamente 3 millones de años (van der Hammen y Cleef, 1986). El componente biótico de los ecosistemas de páramo está conformado por elementos neotropicales de origen local, más elementos subantárticos que emigraron desde el sur, y elementos neárticos que llegaron desde el norte a través del Istmo de Panamá (Morrone, 2021). Se ha propuesto que los páramos representan centros de endemismo y que esto se debería a tasas de diversificación mucho más rápidas que en las tierras bajas, causadas por oscilaciones climáticas y la formación de refugios durante el Pleistoceno (Noonan, 1982; Calpa-Anaguano et al., 2021).

Los ecosistemas de los páramos representan un reto de adaptación para la fauna altoandina. La altitud ha dado forma a los patrones de adaptación de los organismos, y muchos de ellos presentan convergencias como resultado de condiciones ambientales compartidas. Como resultado, la fauna silvestre del páramo se ha adaptado eficientemente a condiciones extremas, pero es muy sensible a cambios rápidos en el clima y en la disponibilidad de hábitat, y a la competencia y depredación causada por especies recién llegadas (Báez et al., 2016; Zapata Ríos y Branch, 2016). Es así como los cambios producidos por las actividades humanas constituyen amenazas grandes para la fauna silvestre de

¹ Véase nota a pie #3, Capítulo 4, sobre endemismo.

los páramos. Aunque los impactos humanos son evidentes, los páramos mantienen todavía remanentes de ecosistemas en buen estado de conservación, y estos están en capacidad de mantener a largo plazo las comunidades faunísticas originales que evolucionaron a lo largo de millones de años. En este capítulo presentamos una síntesis del conocimiento actual sobre la fauna de los páramos. Nos hemos enfocado en insectos, peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos. Además, presentamos una sección sobre adaptaciones de las especies de fauna silvestre al ambiente extremo de los páramos y resumimos las amenazas antrópicas a la supervivencia de estas especies.

Insectos

Aún queda mucho por explorar sobre la entomofauna de los páramos ecuatorianos. Entre los pocos taxones con listados de especies están los carábidos, una familia diversa de coleópteros carnívoros, nocturnos y de hábitos terrestres (Moret, 2005). Carabidae cuenta con cerca de 230 especies distribuidas en páramos sobre los 3400 m; tiene un género endémico para los páramos del Ecuador, *Aquilex* (4300 m; Figura 5.1), y algunas especies orobiontes que habitan en los superpáramos áridos del Antisana, Cotopaxi y Chimborazo, sobre los 4400 m (Moret, 2009). Entre otros coleópteros estudiados en el país, Coccinellidae registra una especie en el páramo de Papallacta (González et al., 2018); Scarabaeidae, con sus subfamilias Rutelinae y Dynastinae (Figura 5.2), registran ocho y 56 especies en el páramo respectivamente, pero no son especies exclusivamente altoandinas (Paucar-Cabrera, 2005; Ratcliffe et al., 2020); Cicindelidae cuenta con cuatro especies altoandinas de los géneros *Eucallia* y *Pseudoxyscheila* (Pearson et al., 1999). Diptera tiene reportes en el páramo, con seis especies de *Drosophila* registradas en los bosques de *Polylepis* (Papallacta, sobre 3700 m). Existen también algunos listados sobre lepidópteros del páramo ecuatoriano hasta el nivel de género (Razowski et al., 2008; Padrón et al., 2021). En términos generales, se ha sugerido que en los páramos predominan los dípteros polinizadores sobre otros grupos como los himenópteros (Figuro y Rafael, 2013; Vásquez Espinoza, 2019).



Figura 5.1 *Aquilex diabolica* (Coleoptera, Carabidae) pertenece a un género endémico de los Andes centrales de Ecuador. Fotografía: Terry Erwin



Figura 5.2 *Ancognatha castanea* (Coleoptera, Dynastidae) es un escarabajo que no es exclusivo de páramo, pero alcanza los 4000 m de altitud en los Andes ecuatorianos. Fotografía: Aura Paucar

Estas y otras especies de insectos usan diferentes estrategias de supervivencia a las condiciones extremas de los páramos ecuatorianos. Sus adaptaciones pueden ser morfológicas, fisiológicas o etológicas. Estos niveles de especialización llevan a la entomofauna terrestre y acuática del páramo a tener altos niveles de endemismo, especialmente sobre los 4400 m hay especies que no se encuentran a menor altitud (Moret, 2005; Ríos-Touma et al., 2022). Sin embargo, el páramo también recibe especies de tierras bajas que logran alcanzar los subpáramos y zonas de transición hasta los 4200 m (Paucar-Cabrera, 2005; González et al., 2018; Ratcliffe et al., 2020). Las condiciones de altitud, composición vegetal, humedad y morfología del suelo de los ecosistemas altoandinos son determinantes para la entomofauna que albergan. Por ejemplo, los páramos húmedos como Guamaní y Llanganates tienen una alta riqueza de especies, mientras que los páramos secos son significativamente menos diversos (Moret, 2009). La riqueza taxonómica y funcional de los recursos florales también influyen en la diversidad de insectos polinizadores (Vásquez Espinoza, 2019). Mientras tanto, a mayor altitud, la diversidad de insectos acuáticos disminuye (Villamarín et al., 2020; Ríos-Touma et al., 2022). Este patrón altitudinal no se cumple en todos los grupos de insectos porque los ensambles de especies también dependen del aislamiento continental y de su capacidad de dispersión. Algunas especies son estenotópicas, con niveles bajos de intercambio genético (Moret, 2005), mientras que otras especies, voladoras o no, se dispersan con efectividad en la matriz circundante a los picos altoandinos, ya sean matrices naturales o antrópicas (Anthelme et al., 2014; Muñoz-Tobar y Caterino, 2020).

A los estudios básicos de diversidad se suman algunas investigaciones sobre entomofagia, sucesión, entomología forense, biogeografía, efectos del cambio climático y uso de macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores (Moret et al., 2016; Moret et al., 2021; Onore, 2005; Ríos-Touma et al., 2014; Rosero-López et al., 2019). No obstante, aún queda mucho por descubrir sobre los insectos del páramo y faltan listados y descripciones de la biología de casi todos los grupos taxonómicos. Con estos vacíos de información resulta difícil evidenciar los reemplazos de especies, posibles extinciones y pérdida de servicios ecosistémicos por el cambio global, y el impacto de estos factores sobre el funcionamiento de los ecosistemas altoandinos.

Peces

La Cordillera de los Andes alberga una ictiofauna muy distinta a la de las regiones bajas, a ambos lados de los Andes (Albuja et al., 2012). Los ecosistemas acuáticos altoandinos por encima de los 3000 m de altitud poseen una diversidad de peces

extremadamente baja, representada por la sardina *Grundulus quitoensis* (Figura 5.3) y tres especies de preñadillas *Astroblepus* spp. (Barriga y Terneus, 2005; Alexiades y Encalada, 2017; Figura 5.4). Esta riqueza constituye el 0,4 % del total de especies dulceacuícolas registradas en el Ecuador (Aguirre et al., 2021). *Grundulus quitoensis* (Characiformes: Characidae) es una especie endémica del norte de los Andes del Ecuador, habita exclusivamente en la laguna El Voladero, en el interior de la Reserva Ecológica El Ángel (Román-Valencia et al., 2005). Las observaciones en campo sugieren que esta especie podría estar organizada en metapoblaciones que presentan tamaños poblacionales pequeños con una alta especificidad en sus hábitats (Barriga y Terneus, 2005). A nivel nacional, su estado de conservación es Vulnerable, debido principalmente a su rango restringido de distribución (Aguirre et al., 2021). Sin embargo, la introducción de especies exóticas en su hábitat y la baja tasa de fecundidad que presenta podrían contribuir a agravar su situación actual (Barriga y Terneus, 2005; Valdivieso-Rivera et al., 2016).



Figura 5.3 *Grundulus quitoensis* (Characiformes: Characidae), una especie de sardina endémica para los Andes septentrionales del Ecuador. Fotografía: Fernando Anaguano



Figura 5.4 *Astroblepus* sp. (Siluriformes, Astroblepidae), un género de preñadilla que tiene tres especies en los Andes del Ecuador. Fotografía: Fernando Anaguano

Las preñadillas, *Astroblepus* spp. (Siluriformes: Astroblepidae), constituyen un grupo de peces de amplia distribución en los Andes y sus estribaciones; la mayor diversidad de especies ha sido registrada sobre los 1000 m de altitud (Schaefer et al., 2011). En el Ecuador se ha reportado la presencia de 24 especies de *Astroblepus* (Barriga, 2012). De ellas, *Astroblepus ubidiai*, *A. regani* y *A. vaillanti* están presentes en sistemas acuáticos altoandinos (Alexiades y Encalada, 2017). Los astroblépidos presentan adaptaciones morfológicas especiales como ventosas bucales y movilidad de la cintura pélvica que les permiten adherirse a las rocas y remontar los cauces torrentosos (De Crop et al., 2013). Se ha reportado que estas especies habitan aguas claras y son sensibles a la degradación ambiental, por lo que podrían ser buenos indicadores del estado de salud de los ríos (Schaefer et al., 2011). Sin embargo, algunas especies también podrían sobrevivir en ríos muy impactados (Alexiades y Encalada, 2017), lo que sugiere que se requieren más estudios sobre la ecología y tolerancia de las especies de este grupo. Los astroblépidos también son muy sensibles a la introducción de peces invasores (Vélez-Espino, 2003a). La introducción de peces exóticos en ecosistemas acuáticos andinos del Ecuador es frecuente: en ríos y lagunas altoandinas de todo el país se ha registrado la presencia de la trucha arcoíris y la trucha marrón *Salmo trutta* (Aguirre et al., 2021). En las lagunas del callejón interandino también se ha reportado la presencia de la carpa dorada *Carassius auratus* y la lubina negra *Micropterus salmoides* (Vélez-Espino, 2003a). Existen evidencias de que la trucha arcoíris altera las redes tróficas en los ecosistemas acuáticos altoandinos (Vimos et al., 2015), depreda ranas y peces nativos (Buitrago-Suarez et al., 2015; Martín-Torrijos et al., 2016) y desplaza a las especies de *Astroblepus* hacia zonas más bajas de la cuenca (Alexiades y Encalada, 2017).

Otras amenazas que enfrentan los astroblépidos son la degradación de sus hábitats y la construcción de embalses para proyectos hidroeléctricos (Anderson y Maldonado-Ocampo, 2011; Capítulo 11), y la contaminación y modificación de los cursos de agua que cambian las condiciones físicas y químicas de los cuerpos de agua (Dudgeon, 2012; Tognelli et al., 2016). Estos impactos alteran la estructura y la conectividad de los sistemas acuáticos dentro de la red hídrica, lo que ocasiona el aislamiento poblacional e interrumpe el flujo genético entre las poblaciones (Tognelli et al., 2016). La sinergia de estos impactos, sumada a las amenazas causadas por los peces invasores, han promovido el declive de los astroblépidos altoandinos, sobre todo de las especies endémicas como *A. ubidiai* que se encuentra en Peligro Crítico de extinción (Vélez-Espino, 2003a, b). Por otra parte, se ha reportado que el aislamiento poblacional influye en la aparición de aberraciones pigmentarias producto de la endogamia o el estrés ambiental (Mena-Valenzuela y Valdivieso-Rivera, 2016; Anaguano-Yancha, 2018) y el retraso de la madurez

sexual como una respuesta adaptativa para aumentar la supervivencia de los juveniles en condiciones de estrés (Vélez-Espino y Fox, 2005). Debido al alto grado de amenaza al cual se enfrentan los peces altoandinos, es de suma importancia seguir incrementando la información existente sobre el estado de sus hábitats, la tendencia, estructura y distribución de sus poblaciones, y su historia natural. Además, urge el establecimiento de programas de control de especies invasoras, las cuales, constituyen la principal amenaza de los peces nativos altoandinos.

Anfibios

Los páramos son ecosistemas con características ambientales extremas (Hofstede et al., 2003), que parecerían poco propicias para la supervivencia de anfibios. Sin embargo, estos están presentes debido a dos factores, principalmente: la presencia de microhábitats y la existencia de especies de anfibios con una capacidad de termorregulación y metabolismos extraordinarios (Navas, 1999). Algo notorio en los páramos es que solo se han adaptado eficientemente los anuros, no así sus órdenes hermanos, las cecilias y las salamandras. Así, las tierras altas del Ecuador albergan al menos 56 especies de anfibios, es decir, un 9 % del total de la herpetofauna ecuatoriana (Ron et al., 2022). A pesar de que las cifras son bajas, el nivel de endemismo en los páramos del Ecuador es impresionantemente alto: el 80 % (45 especies) de las especies registradas se encuentra únicamente en el país y 15 de estas están únicamente en páramo; Ron et al., 2022). Asimismo, de las 56 especies de anfibios registradas en los páramos, 31 están en alguna de las categorías de amenaza (IUCN, 2022; Ortega et al., 2021), lo que los convierte en uno de los grupos de fauna más amenazados del país.

El ensamble de anfibios en los páramos es completamente diferente a los reportados para otros ecosistemas como la selva amazónica. Existen nueve géneros que dominan en los páramos: *Gastrotheca* (ranas que poseen un marsupio en su espalda), *Lynchius*, *Niceforonia* y *Pristimantis* (ranas cutines que tienen desarrollo directo), *Hyloscirtus* (ranas de torrente), *Hyloxalus* (ranas cohete asociadas a cuerpos de agua con caudal), *Osornophryne* (comúnmente conocidos como osornosapos), *Atelopus* (ranas arlequín o jambatos) y *Telmatobius* (ranas uco). Los dos últimos géneros, como resultado de una alta dependencia al agua, han sufrido reducciones poblacionales significativas en los últimos 40 años (Young et al., 2001; La Marca et al., 2005). La reducción poblacional del jambato, *Atelopus ignescens*, es uno de los eventos más drásticos que se ha documentado en los páramos del Ecuador. Las poblaciones de esta especie, muy abundantes décadas atrás, declinaron drásticamente hasta finales de los ochenta. La IUCN llegó a considerarla extinta, hasta que fue redescubierta en 2016 (Coloma, 2016) (Figura 5.5).



Figura 5.5 *Atelopus ignescens*, el legendario jambato: antes abundante, después extinto, ahora redescubierto. Fotografía: Kyle E. Jaynes, Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International. Disponible en https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atelopus_ignescens_2019.jpg

Aunque la riqueza de especies de los anfibios en los páramos del Ecuador es baja, en los últimos cinco años se han descrito no menos de 15 especies (Yáñez-Muñoz et al., 2010, Ramírez-Jaramillo et al., 2018; Sánchez-Nivicela et al., 2018; Székely et al., 2018; 2020; Páez y Ron, 2019) y no es extraño que a futuro se sigan describiendo más especies y que muchas fueran endémicas. Sin embargo, así como se incrementa año a año el descubrimiento de nuevas especies, la declinación de anfibios va también en aumento. Salvaguardar la diversidad de anfibios en los páramos es fundamental, pues a través de ellos podemos conocer cómo se encuentra la salud de un ecosistema, sea este acuático o terrestre, ya que son susceptibles a la modificación o fragmentación de sus entornos, son vulnerables a la elevada radiación ultravioleta, al ataque de patógenos asociados al agua, y al cambio extremo de temperatura (Blaustein, 1994; Blaustein y Johnson, 2003; Menéndez-Guerrero y Graham, 2013).

Reptiles

Existen pocas especies de reptiles en los páramos, y todas ellas exhiben respuestas adaptativas a los ambientes extremos en los que se encuentran (Navas, 1999; Torres-Carvajal et al., 2022). Los reptiles tienen la capacidad de termorregular, tienen tasas metabólicas bajas y son muy eficientes conservando energía (Navas, 1999). Se han registrado al menos 15 especies de reptiles, lo que representa un 3 % del total de especies registradas en el Ecuador (Torres-Carvajal et al., 2022). Estas cifras son relativamente bajas, pero, al igual que los anfibios, el nivel de endemismo para el país es muy alto, alcanzando el 53 % (Torres-Carvajal et al., 2022). Algo que llama la atención es que hasta ahora se han registrado solo dos especies de serpientes en los páramos, la corredora de Simons (*Incaspis simonsii*; Figura 5.6) y la Corredora de Amaru (*Incaspis amaru*), esta última endémica de los páramos de la provincia del Azuay (Zaher et al. 2014).

La estructura de la comunidad de reptiles en los páramos es muy diferente a la que encontramos en las tierras bajas. En los páramos, esta comunidad está dominada por las lagartijas palo de la familia Gymnophthalmidae (*Andinosaura vespertina*, *Pholidobolus fascinatus*, *P. macbrydei*, *P. montium*, *Riama cashcaensis*, *R. colomaromani*, *R. simotera* y *R. unicolor*) y las iguanas del género *Stenocercus*, conocidas localmente como guagsas (*Stenocercus angel*, *S. cadlei*, *S. festae*, *S. guentheri*, *S. humeralis* y *S. ornatus*; Figura 5.7). En los últimos tres años, solo se ha descrito una especie nueva de lagartija para los páramos del Ecuador (*Pholidobolus fascinatus*), una especie endémica para la parte suroccidental del país (Parra et al., 2020). En la actualidad, los reptiles de los páramos se encuentran amenazados, principalmente, por el cambio climático y la pérdida de hábitat (Uribe, 2015). Es todavía muy poco lo que conocemos sobre los reptiles de los páramos, incluyendo su historia natural, dinámica poblacional, comportamiento y sensibilidad a los impactos de las actividades humanas.



Figura 5.6 *Incaspis simonsii*, una culebra corredora que es el único ofidio registrado en los páramos ecuatorianos. Fotografía: disponible en Pazmiño-Otamendi (2020).



Figura 5.7 *Stenocercus* sp., una guagsa o iguana de páramo. Fotografía: Robert Hofstede

Aves

Los altos Andes de América del Sur constituyen un importante centro de diversidad de aves, concentrando un elevado número de especies tanto endémicas como amenazadas, lo que los convierte en una región prioritaria para la conservación (Fjeldså y Krabbe, 1990). Los páramos son ecosistemas únicos, donde las aves son el grupo más abundante y diverso de vertebrados (Sevillano-Ríos et al., 2020). A pesar de que varios estudios describen la avifauna asociada a los páramos, no sabemos con certeza el número total de especies en estos ecosistemas (Sevillano-Ríos et al., 2020). Vuilleumier y Simberloff (1980) documentaron 60 especies (29 especialistas de los páramos), mientras que Stotz et al. (1996) reportaron 53 especies. En el Ecuador, algunos estudios previos consideran un número total que varía entre 33 y 44 especies (Champan, 1926; Sierra et al., 1999; Koenen y Gale, 2000). Las especies residentes cuentan con diversas estrategias de forrajeo y adaptaciones a ambientes de tierras altas, predominando los insectívoros terrestres y los colibríes. Algunas especies representativas son el chungüi (*Cinclodes albidiventris*, Figura 5.8), el caracara carunculado o curiquingue (*Phalcoboenus carunculatus*, Figura 5.9) y la estrella ecuatoriana (*Oreotrochilus chimborazo*). Además, algunas investigaciones recientes sugieren que algunas especies de los páramos pueden alimentarse y anidar directamente en áreas cubiertas de glaciár, como el frígilo unicolor (*Geospizopsis unicolor*) y la agachona ventrerrufa (*Attagis gayi*, Hardy et al., 2018).



Figura 5.8 *Cinclodes albidiventris* (Passeriformes, Furnariidae), una especie de chungüi ampliamente distribuido entre 3200 y 4500 m en los Andes ecuatorianos. Fotografía: Galo Zapata Ríos

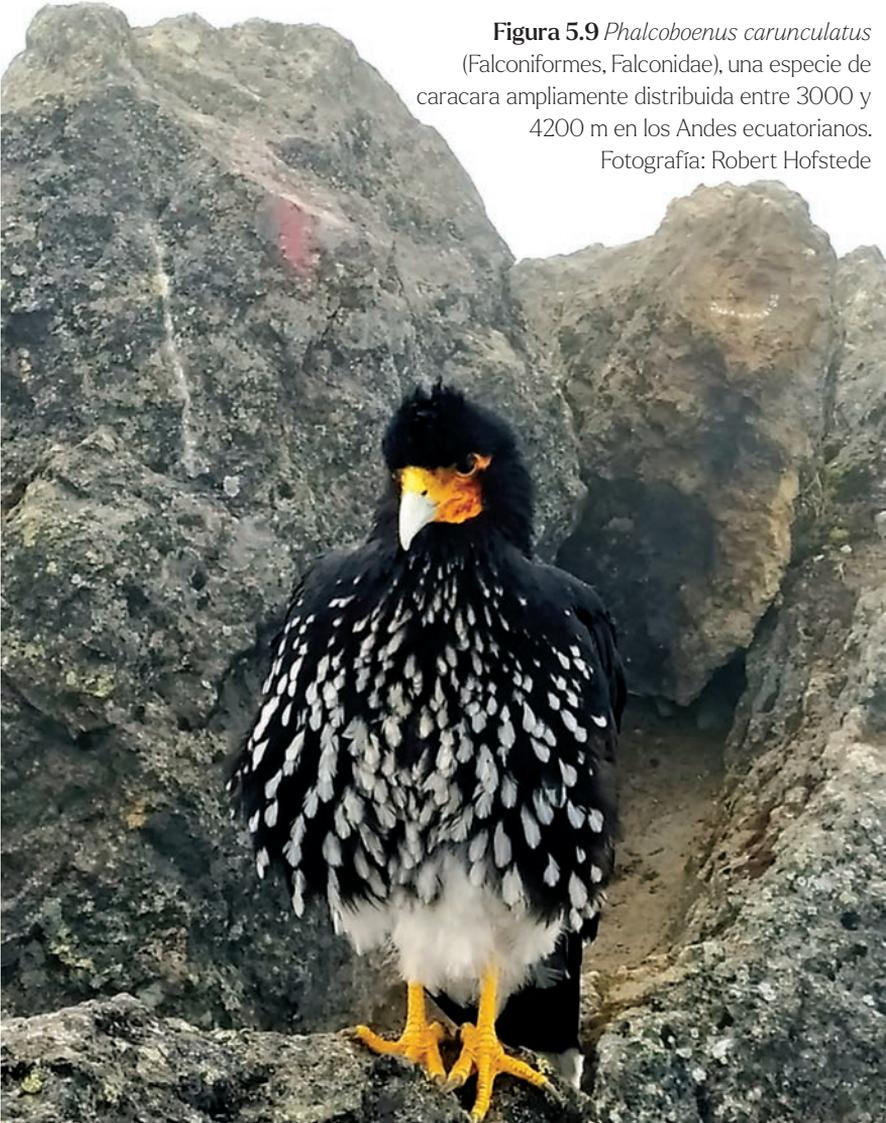


Figura 5.9 *Phalcoboenus carunculatus* (Falconiformes, Falconidae), una especie de caracara ampliamente distribuida entre 3000 y 4200 m en los Andes ecuatorianos. Fotografía: Robert Hofstede

Por otra parte, los humedales altoandinos incluyen lagos, lagunas, turberas y áreas pantanosas que reciben el agua de la lluvia y de los glaciares, y mantienen la humedad todo el año. La avifauna de estas áreas es peculiar y está representada por especies como la bandurria (*Theristicus branickii*, Figura 5.10) y el zambullidor plateado (*Podiceps occipitalis*), ambas consideradas especies amenazadas en el Ecuador, y otras especies como el ligle (*Vanellus resplendens*), la gaviota andina (*Chroicocephalus serranus*, Figura 5.11) y varias especies de patos. Los humedales y páramos juegan un rol importante en la migración de varias especies de aves, como lugar de descanso y recarga de reservas. Estas especies migratorias pertenecen principalmente a la familia Scolopacidae. Entre ellas está el cuviví (*Bartramia longicauda*), conocida localmente como el ave suicida.



Figura 5.10 *Theristicus branickii* (Pelecaniformes, Threskiornithidae), es una especie de ibis andino con una distribución restringida en los Andes septentrionales de Ecuador. Fotografía: Galo Zapata Ríos

Figura 5.11 *Chroicocephalus serranus* (Charadriiformes, Laridae), es una especie de gaviota que habita lagunas, ríos y bofedales entre los 3000 y 4500 m. Fotografía: Galo Zapata Ríos



Dentro del páramo, los bosques de *Polylepis* son ecosistemas fragmentados que existen como parches de diferentes tamaños en la matriz de pajonal. Varias especies de aves son altamente dependientes de estos ecosistemas (Fjeldså y Krabbe, 1990; Astudillo et al., 2018). A lo largo de los Andes se han reportado 214 especies de aves, 31 endémicas y 23 especialistas (Fjeldså, 2002; Sevillano et al., 2018); mientras que, en un estudio en el Ecuador, se registraron 30 especies (Tinoco et al., 2013). Los Andes del norte cuentan con menos especialistas de *Polylepis* (por ejemplo, picocono gigante, *Conirostrum binghami*, *Xenodacnis parina*), y más bien comparten varias especies de los bosques húmedos montanos, así como algunas generalistas que se mueven entre los parches de *Polylepis* y la matriz de páramo.

Tomando como referencia la última versión de la lista de aves del Ecuador, que reporta un total de 1721 especies (Freile et al., 2022), y contando solamente las especies que tienen una distribución altitudinal sobre los 3500 m, existirían más de 110 especies en los ecosistemas de páramo, los bosques de *Polylepis* y los humedales altoandinos. Adicionalmente, existirían alrededor de 45 especies de los bosques montanos que también se registran en los páramos. De estas últimas, 13 son aves migratorias, nueve son aves con rangos de distribución restringidos (Stattersfield et al., 1998) y cinco están consideradas como especies amenazadas, incluyendo a la recientemente descubierta estrella de garganta azul (*Oreotrochilus cyanolaemus*). Nuestro conocimiento de las aves altoandinas todavía presenta vacíos importantes sobre su historia natural y el rol que desempeñan en el funcionamiento y el mantenimiento de los ecosistemas de los páramos.

Mamíferos

Todavía no conocemos todas las especies de mamíferos que existen en los páramos, y cada año nuevas especies (incluso nuevos géneros) continúan siendo descritas (Alvarado-Serrano y D'Elía, 2013; Brito et al., 2019; Oliveira do Nascimento et al., 2021). Los inventarios de mamíferos en un número representativo de localidades altoandinas están lejos de estar completos; por esta razón, las publicaciones taxonómicas de mamíferos se generan continuamente (Hanson et al., 2015; Lee et al., 2022). Actualmente, en los páramos del Ecuador, por arriba de los 3000 m de altitud se estima que existen 75 especies, lo que representa 16 % de los mamíferos de todo el país (Tirira et al., 2022). Si bien la riqueza de especies es relativamente baja, especialmente si la comparamos con otras regiones del país (por ejemplo, 219 especies en la Amazonía baja; una reducción altitudinal del 65 % en número de especies), el porcentaje de endemismo para el Ecuador no tiene comparación. Con un total de 20 especies (36 %), el piso altoandino contiene el mayor número de especies endémicas en todo el Ecuador. En comparación, en la

Amazonía baja ninguna de las especies es endémica (Tirira et al., 2022). Estos niveles impresionantes de endemismo no están distribuidos equitativamente entre todos los órdenes de mamíferos, lo que se debe, principalmente, al aporte de las especies de roedores, que comprenden el 75 % de todas las especies endémicas altoandinas (Tirira et al., 2022).

La comunidad de mamíferos de los páramos del Ecuador es representativa de los Andes del norte, región cuyo límite meridional se encuentra en la Depresión de Huancabamba, en el norte del Perú. Desde una perspectiva biogeográfica, de acuerdo con Voss (2003), el ensamble de especies altoandinas está constituido por géneros que se distribuyen en los Andes meridionales templados (por ejemplo, *Lycalopex*-Figura 5.12, *Pudu*-Figura 5.13 y *Phyllotis*); géneros que se distribuyen desde latitudes septentrionales templadas (por ejemplo, *Odocoileus*-Figura 5.14, *Cryptotis* y *Reithrodontomys*); géneros que se distribuyen tanto en latitudes septentrionales como meridionales templadas (por ejemplo *Sylvilagus*-Figura 5.15, *Puma*, *Conepatus*-Figura 5.16 y *Neogale*); géneros con una distribución amplia en los trópicos de tierras altas y bajas (por ejemplo, *Tapirus*-Figura 5.17, *Coendou* y *Cuniculus*-Figura 5.18), y géneros que son endémicos de los Andes Tropicales (por ejemplo, *Caenolestes*, *Tremarctos*-Figura 5.19, y *Thomasomys*).



Figura 5.12 *Lycalopex culpaeus* (Carnivora, Canidae) o zorro andino, una especie ampliamente distribuida entre 1600 y 5100 m en los Andes ecuatorianos. Fotografía: Robert Hofstede



Figura 5.13 *Pudu mephistophiles* (Artiodactyla, Cervidae) o pudú del norte, una especie poco conocida de venado enano. Fotografía: Wildlife Conservation Society–Ecuador Program



Figura 5.14 *Odocoileus virginianus* (Artiodactyla, Cervidae) o venado de cola blanca. Una especie crecientemente común en los páramos ecuatorianos. Fotografía: Robert Hofstede



Figura 5.15 *Sylvilagus andinus* (Lagomorpha, Leporidae) o conejo de páramo, una especie de las alturas andinas del Ecuador y el sur de Colombia. Fotografía: Robert Hofstede



Figura 5.16 *Conepatus semistriatus* (Carnivora, Mephitidae) o zorrillo rayado, una especie común en los ecosistemas andinos del Ecuador entre 2000 y 4200 m. Fotografía: Galo Zapata Ríos



Figura 5.17 *Tapirus pinchaque* (Perissodactyla, Tapiridae) o tapir andino, una especie considerada En Peligro Crítico (CR) en el Ecuador. Fotografía: Robert Hofstede



Figura 5.18 *Cuniculus taczanowskii* (Rodentia, Cuniculidae) o guanta de altura, una especie andina poco conocida y considerada Vulnerable (VU) en el Ecuador. Fotografía: Galo Zapata Ríos



Figura 5.19 *Tremarctos ornatus* (Carnivora, Ursidae) u oso andino. Esta especie está ampliamente distribuida en los Andes ecuatorianos entre 900 y 4300 m. Fotografía: Esteban Suárez Robalino

Los grupos taxonómicos abundantes en tierras bajas y que no están presentes en los páramos son los órdenes Cingulata (armadillos), Pilosa (perezosos) y Primates. Mientras tanto, los carnívoros, los artiodáctilos (venados) y los perisodáctilos (ta-pires) mantienen sus niveles de diversidad constantes a lo largo de la gradiente altitudinal. Finalmente, los marsupiales cenoléstidos (ratones marsupiales) y los sorícidos (musarañas) son las únicas familias que están presentes en el páramo y están ausentes en tierras bajas (Voss, 2003).

A pesar de las cifras presentadas aquí, nuestro conocimiento sobre la fauna de los mamíferos de los páramos sigue siendo escaso y fragmentario (Voss, 2003; Palacios et al., 2018). Por ejemplo, más allá de las especies presentes, no tenemos información sobre densidades poblacionales, uso de hábitat, recambio de especies a lo largo de gradientes altitudinales y latitudinales, o respuestas a los impactos de las actividades humanas (Amori et al., 2013; Andermann et al., 2020). Los mamíferos son considerados un grupo bien conocido porque la tasa de descubrimiento de especies es relativamente baja. Sin embargo, no solo que nuevas especies son descritas continuamente, sino que nuevos registros amplían el ámbito de distribución de las especies conocidas de forma significativa (Brito et al., 2016; Moreno-Cárdenas y Novillo-González, 2020). Todavía estamos aprendiendo sobre la fascinante diversidad de los mamíferos altoandinos; este conocimiento es crítico para la conservación de los páramos.

Adaptaciones de la fauna silvestre a los ambientes extremos de los páramos

Las especies que viven en los páramos están sujetas a fuertes presiones selectivas por las condiciones inhóspitas de sus hábitats (por ejemplo, bajas concentraciones de oxígeno, bajas temperaturas, vientos extremos, intensa radiación ultravioleta). Por ejemplo, a una altitud de 4000 m, la atmósfera contiene solo el 60 % del oxígeno disponible a nivel del mar (Peacock, 1988). Por otra parte, la temperatura, dependiendo de la humedad en la atmósfera, se reduce a una tasa de aproximadamente 0,54–0,65 °C por cada 100 m de elevación (Montgomery, 2006). La exposición a la radiación ultravioleta, mientras tanto, se incrementa, dependiendo de los niveles de contaminación del aire, entre un 7 y 15 % por cada 1000 m de elevación (Kerr y Fioletov, 2008). Estos factores están entre los determinantes principales para la reducción en la riqueza de especies en los páramos (McCain y Grytnes, 2010). Las especies adaptadas a grandes alturas presentan una gran plasticidad fenotípica; con frecuencia, la tolerancia al estrés se refleja en diferenciación ecotípica a escalas locales, derivada de genes de evolución rápida (Storz et al., 2010; Muir et al., 2014).

Los tipos de adaptaciones de los animales silvestres a las grandes alturas han recibido una atención considerable de los biólogos evolutivos (Storz et al., 2010; Kang et al., 2017). Muchos de estos estudios se han enfocado en las adaptaciones a la hipoxia y a las bajas temperaturas, especialmente en organismos endotermos (Castiglione et al., 2017; McClelland y Scott, 2019). Como respuesta a las bajas concentraciones de oxígeno, muchas especies presentan procesos mecánicos de ventilación más eficientes, cambios en la composición sanguínea (por ejemplo, incremento de hemoglobina), y mayor porosidad en las membranas exteriores de los huevos para facilitar el transporte de oxígeno hacia los embriones (Weber et al., 2002; Hille y Cooper, 2015). En insectos, las bajas temperaturas favorecen los cuerpos pequeños (Mani, 1968), ya que esta característica les capacita efectivamente para tomar ventaja de pequeños refugios con microclimas, bajo piedras y en grietas (Mani, 1968; Sømme et al., 1996). La atrofia alar (apteria, microptería, braquiptería) es también común en los insectos de ambientes extremos. En los páramos del Ecuador, por ejemplo, 94 % de los escarabajos carábidos son especies micrópteras (Moret, 2009). Este patrón tiende a incrementar con la altitud y posiblemente se debe a la influencia del viento (Sømme y Block, 1991), ya que los insectos voladores son fácilmente arrastrados por él y la pérdida de la capacidad de vuelo reduce el riesgo de ser llevados a lugares inhóspitos. Como consecuencia, la capacidad de dispersión de los insectos de los páramos es muy baja.

En colibríes, el torpor nocturno representa uno de los ejemplos más espectaculares de adaptación a las bajas temperaturas. El torpor está caracterizado por reducciones de temperaturas corporales de hasta 30 °C, con una consiguiente reducción drástica del metabolismo (Wolf et al., 2020). Recientemente, se ha descubierto que las ranas del género *Pristimantis*, al igual que otros anuros de latitudes septentrionales, tienen adaptaciones fisiológicas en la forma de anti-congelantes a nivel celular para ser tolerantes al congelamiento (Carvajalino-Fernández et al., 2021). En cuanto a los altos niveles de radiación ultravioleta, el melanismo termal ayuda a muchas especies a protegerse de los rayos ultravioleta y a elevar la temperatura del cuerpo por absorción de calor (Sømme, 1989). Finalmente, el zooplancton en los lagos andinos evita la exposición a niveles altos de radiación ultravioleta, utilizando las capas más profundas de agua o realizando migraciones verticales diarias (Cabrera et al., 1997).

Como resultado de la adaptación a los ambientes extremos de los páramos, y producto de evolución convergente, muchas especies de vertebrados comparten rasgos biológicos similares. En comparación a sus contrapartes de tierras bajas, los vertebrados de tierras altas presentan mayor longevidad, baja fecundidad, número reducido de huevos (pero de mayor tamaño), camadas más pequeñas, y cuidado parental prolongado (Shine, 2005; Sternberg y Kennard, 2013; Liao et al., 2014). Estos rasgos biológicos son el resultado de la optimización de fenotipos individuales y el desarrollo de estrategias evolutivas estables. Como resultado de estos procesos de adaptación, la fauna de los páramos ha llegado a tener los altos niveles de endemismo existentes en la actualidad (Erwin, 1985; Stearns, 1992).

Impactos de las actividades humanas en la fauna de los páramos

Los animales de los páramos, a pesar de haber desarrollado mecanismos sofisticados para adaptarse a las condiciones extremas de sus hábitats, son muy sensibles a los impactos negativos de las actividades humanas. Las amenazas principales para la conservación de la fauna silvestre en los páramos incluyen destrucción y la consiguiente fragmentación de los hábitats; sobreexplotación, incluyendo tráfico de fauna silvestre; cambio climático, y la introducción de especies exóticas (Lambertini et al., 2011; Báez et al., 2016; Bonacic et al., 2016).

La destrucción de hábitats es probablemente la causa principal de la extinción de especies en tiempos recientes. La pérdida de hábitat no solamente resulta en una reducción del área total de hábitat disponible, sino que además frecuentemente produce discontinuidad en la distribución del hábitat remanente.

El resultado de este proceso es la fragmentación del hábitat original. La fragmentación es un proceso por el cual áreas de hábitat natural contiguas se dividen en parches de menor tamaño, aislados unos de otros en mayor o menor grado, dentro de una matriz dominada por actividades humanas (Andrén, 1994; Sih et al., 2000; Fahrig, 2003). Los páramos, y los paisajes andinos, en general, han sufrido destrucción de hábitats y fragmentación debido al crecimiento de las poblaciones humanas, el avance altitudinal de la frontera agrícola, la construcción de carreteras y la resultante colonización de áreas que estaban previamente aisladas. Con el avance de las actividades humanas, es previsible que las poblaciones de especies silvestres de los páramos estén disminuyendo como resultado de la pérdida de hábitats. Además, estas poblaciones deben estar perdiendo variabilidad genética como resultado de la reducción en el número de individuos, la extirpación de poblaciones y el incremento del aislamiento de las poblaciones remanentes causado por la fragmentación.

La información sobre cacería y tráfico de fauna silvestre en los páramos es escasa, y la poca información que existe en el Ecuador se ha generado en ecosistemas de tierras bajas. La extracción de animales silvestres de sus hábitats naturales produce una serie de impactos negativos, tanto ecológicos como sociales. Por ejemplo, la cacería y el tráfico de fauna silvestre producen la extinción local de especies con funciones ecológicas irremplazables, lo que afecta el funcionamiento de los ecosistemas de forma irreparable y afecta la provisión de servicios ecosistémicos (Bennett y Robinson, 2000; Zapata Ríos et al., 2011). A partir de información anecdótica, sabemos que existe demanda por partes constitutivas de especies andinas como colas de zorros andinos (*Lycalopex culpaeus*), pieles de venados de cola blanca (*Odocoileus virginianus*) y vísceras y grasa de oso andino (*Tremarctos ornatus*). Estas partes parecen ser amuletos de buena suerte, materias primas para zamarros y otros artículos de cuero, o tener usos medicinales. Por otra parte, existe cacería por retaliación, como resultado del conflicto entre la gente y la fauna silvestre. Las especies principalmente afectadas incluyen a zorros andinos, osos andinos, pumas (*Puma concolor*), cóndores andinos (*Vultur gryphus*) y águilas andinas (*Spizaetus isidori*). La cacería por retaliación es un tipo de cacería críptica ilegal (Liberg et al., 2012), por lo que es muy difícil obtener información sobre el número de individuos cazados, las áreas de extracción o los impactos en la dinámica poblacional de las especies afectadas.

Actualmente, las especies exóticas están presentes en la mayor parte de los ecosistemas del planeta. Los páramos no son una excepción y dos de las especies exóticas más conspicuas son las truchas y los perros domésticos. Las truchas (trucha arcoíris, *Oncorhynchus mykiss*; trucha café, *Salmo*

trutta; trucha de manantial, *Salvelinus fontinalis*), nativas del hemisferio norte, están ampliamente distribuidas en América del Sur, especialmente a lo largo de los Andes (Arismendi et al., 2019). El proceso de introducción de estas especies inició hace más de 150 años en nuestro continente y ahora son las especies de peces dominantes en la mayoría de los ríos y riachuelos andinos. En algunas localidades alcanzan una densidad poblacional de 0,99 individuos/m² y representan un 95 % de la biomasa total de especies acuáticas (Vimos et al., 2015; Arismendi et al., 2019). La trucha marrón es la especie más común en los páramos del Ecuador; se ha determinado que genera impactos negativos significativos en los ecosistemas acuáticos. A través de depredación, competencia y transmisión de enfermedades (por ejemplo, hongos patógenos como *Saprolegnia diclina*), las truchas han desplazado a las especies nativas de peces (al menos, 20 especies de preñadillas, *Astroblepus*), están extinguiendo a especies amenazadas de anfibios y han producido cambios etológicos y ontogénicos en las comunidades de macroinvertebrados (Vimos et al., 2015; Martín-Torrijos et al.; 2016, Alexiades y Encalada, 2017; Krynak et al., 2020).

Los perros domésticos son los carnívoros más abundantes en la actualidad. Se estima que existen aproximadamente mil millones de perros en todo el planeta (Gompper, 2014). Los perros (de libre rango y asilvestrados) se han convertido en un problema de conservación en muchas áreas de páramo como resultado del crecimiento poblacional humano, ausencia de tenencia responsable de mascotas, falta de manejo adecuado de desechos sólidos y falta de conocimiento de los impactos negativos de las especies exóticas invasoras. La distribución actual y la abundancia de los perros en los páramos es desconocida, pero se ha estimado una densidad poblacional de hasta 1,1 perros/ km² en algunas localidades de la cordillera Oriental (Zapata Ríos y Branch, 2016). Los perros (Figura 5.20) están desplazando a los carnívoros nativos, como pumas y osos andinos, en grandes áreas de los Andes septentrionales (Zapata Ríos y Branch, 2018); algunas especies de mamíferos han sido ya extirpadas en áreas donde los perros son abundantes (por ejemplo, coatí de montaña, *Nasua olivacea*; guanta de altura, *Cuniculus taczanowskii*; Pudú del norte, *Pudu mephistophiles*); otras especies presentan reducciones significativas de su abundancia en áreas con perros (por ejemplo, zorro andino; zorrillo, *Conepatus semistriatus*); y otras especies (por ejemplo, tapir de montaña, *Tapirus pinchaque*; cervicabra, *Mazama rufina*) alteran sus patrones de actividad para evitar la presencia de los perros (Zapata Ríos y Branch, 2016). Los perros representan una amenaza inminente para la fauna silvestre nativa, y en el futuro inmediato sus impactos son más graves que los de otras amenazas descritas aquí.



Figura 5.20 Un perro de libre rango y asilvestrado en el pajonal. Fotografía: Galo Zapata Ríos

El cambio climático está agravando los impactos de las otras amenazas para la conservación de la fauna altoandina (Malcolm et al., 2006; Báez et al., 2016; Capítulo 12). En los páramos, el aumento de temperatura podría producir que las especies y ecosistemas migraran fuera de sus rangos de distribución históricos, que se incrementaran las enfermedades humanas y de la fauna silvestre (por ejemplo, la quitridiomycosis en ranas), y que se alteraran las interacciones interespecíficas. Estos cambios alterarían radicalmente la distribución actual de la fauna altoandina y el funcionamiento de los ecosistemas de páramo (Ávalos y Hernández, 2015; Seimon et al., 2007; Morueta-Holme et al., 2015; Freeman et al., 2021). Además, podrían producirse interrupciones severas de las interacciones entre especies. Por ejemplo, los polinizadores podrían reducir, o detener, sus visitas a las plantas que dependen de ellos (Torres-Díaz et al., 2007). Los páramos y sus especies son especialmente vulnerables al cambio climático por estar localizados en las tierras altas, por lo que no tendrían espacio (altitudinal) donde desplazarse más arriba, y podrían desaparecer. Estas predicciones no toman en cuenta los efectos sinérgicos que existirían con cambios en el uso del suelo, la cacería, la introducción de especies exóticas o las respuestas de adaptación humanas al cambio climático. Las respuestas de las especies de fauna silvestre y

los ecosistemas al cambio climático se verán influenciadas por la configuración espacial de los elementos de los paisajes y otras actividades humanas (Jantz et al., 2015). Por ejemplo, el movimiento de las especies se vería inhibido o bloqueado por el incremento del aislamiento entre parches de vegetación nativa. Por el momento, contamos con predicciones, la mayor parte a escala gruesa, de lo que el cambio climático implicaría para la fauna silvestre altoandina. Sin embargo, realizar predicciones es muy complicado porque la distribución y abundancia de las especies no solo dependen del clima, sino de otros factores como las interacciones bióticas, de las cuales todavía conocemos muy poco.

Conclusiones

La riqueza de especies de fauna en los páramos está asociada con una gradiente de elevación, donde el número de especies se reduce con el incremento en altitud. En cambio, el endemismo en los páramos (es decir, las especies de distribución restringida geográficamente) es muy alto como resultado del aislamiento geográfico y la adaptación de las especies a condiciones ambientales extremas. Este patrón de riqueza *vs.* endemismo se repite en muchos grupos taxonómicos.

Nuestro conocimiento sobre la diversidad de las especies altoandinas todavía es muy limitado. Nuevas especies se describen continuamente, o se redescubren luego de haber sido consideradas extintas. A esto se suma nuestra falta de conocimiento sobre los patrones de abundancia y diversidad de las especies, diversidad funcional y redundancia, y resistencia a disturbios y a cambios climáticos, entre otros. Este conocimiento es esencial para la conservación de los páramos.

Aunque esta falta de información es problemática y representa un reto para la toma de decisiones, no debe limitar nuestra capacidad de diseñar acciones de conservación y manejo con la información disponible; debe haber apertura para incorporar nueva información sobre ecología y amenazas antrópicas tan pronto esta se genera.

Para garantizar la conservación de los páramos, necesitamos establecer iniciativas a escala de paisaje que incluyan la protección de áreas núcleo y garanticen la conectividad para asegurar la persistencia de especies con áreas de vida grande, especies migratorias, especies raras, especies con distribución restringida y fragmentada, y la diversidad de atributos funcionales.

— CAPÍTULO 6

ECOLOGÍA DE LOS PÁRAMOS DEL ECUADOR: UN PAISAJE ALTOANDINO INTEGRADO POR MÚLTIPLES ECOSISTEMAS

Esteban Suárez Robalino | Andrea C.
Encalada | Segundo Chimbolema |
Ricardo Jaramillo | Sisimac Duchicela |
Claudia Segovía-Salcedo | Joselín Caiza |
Gabriela Pazmiño | Marcelo Guamán |
Diego Riveros-Iregui | Robert Hofstede

Paisaje de páramo en la
Reserva Ecológica El Ángel.
Fotografía: cortesía de Pablo
Corral Vega ©



Resumen

El páramo ecuatoriano constituye un bioma complejo y heterogéneo cuya composición y estructura varían ampliamente a lo largo de los gradientes de elevación, clima, sustrato geológico e historia biogeográfica. Desde el punto de vista de su ecología y conservación, este bioma ha sido caracterizado principalmente como un ecosistema abierto dominado por pajonales, pero puntuado de forma dispersa por parches de bosques azonales de varias especies de *Polylepis*. Aunque este sesgo tiene justificación en la dominancia de estos dos tipos de vegetación, en realidad el paisaje del páramo está formado por un mosaico complejo de comunidades vegetales que difieren ampliamente en sus características estructurales, en su composición y funcionamiento, y en los impactos antropogénicos a los que están expuestas.

Los elementos de este mosaico —que incluye además a las turberas de páramo, las zonas periglaciares, la línea arbórea (*treeline*) y la interfase entre ecosistemas terrestres y acuáticos— componen un paisaje mucho más complejo que hasta ahora solo ha sido descrito desde sus elementos individuales. En este capítulo se resume en estado del conocimiento sobre los principales tipos de ecosistemas presentes en los páramos del Ecuador, con énfasis en sus aspectos funcionales y en los vacíos más apremiantes de información que aún existen.

Más allá de la importancia de los pajonales de páramo y los bosques ocasionales de *Polylepis* o *Cynoxys*, describimos un paisaje heterogéneo en el que turberas, bosques, pajonales, y zonas periglaciares interactúan entre sí y con los ecosistemas acuáticos, dando lugar a la fábrica de procesos ecológicos y servicios ecosistémicos que representan los páramos.

Summary

The Ecuadorian páramo constitutes a complex and heterogeneous biome, whose composition and structure vary widely along gradients of climate, geological substrate, and biogeographic history. From the point of view of its ecology and conservation, this biome has been characterized mainly as an open ecosystem dominated by grasslands with patches of azonal forests of various *Polylepis* species. However, in reality the páramo landscape is formed by a complex mosaic of plant communities that differ widely in their structural characteristics, in their composition and functioning, and in the anthropogenic impacts that affect them.

The elements of this mosaic —which also includes páramo peatlands, peri-glacial zones, the treeline, and the interface between terrestrial and aquatic ecosystems— compose a much more complex landscape that, until now, has only been described from its individual elements. This chapter summarizes the state of knowledge about the main types of ecosystems present in the páramos of Ecuador, with emphasis on their functional aspects and the most pressing information gaps.

Beyond the importance of páramo grasslands and occasional *Polylepis* or *Gynoxys* forests, we describe a heterogeneous landscape in which peatlands, forests, grasslands, and peri-glacial areas interact with each other and with aquatic ecosystems, giving rise to the array of ecological processes and ecosystem services that the páramos represent.

Introducción

El páramo es uno de los biomas presentes en el Ecuador que más atención han recibido en los últimos treinta años. A lo largo de un par de décadas de intensa actividad académica se multiplicaron los estudios que documentaron su importancia como fuente de agua y otros servicios ecosistémicos, su riquísima diversidad y el complejo vínculo que tienen con las comunidades ancestrales y la sociedad en general. Al mismo tiempo, se fueron evidenciando la complejidad y la heterogeneidad de las dinámicas sociales, económicas, políticas e institucionales que condicionan el uso y conservación de los páramos. De la mera exaltación y exploración de las maravillas biológicas del páramo, pasamos a la constatación de la relación estrecha, pero muchas veces conflictiva, que las sociedades humanas han tenido con este ecosistema. Esta evolución se refleja perfectamente en el título del libro de Balslev y Luteyn (1992): *Páramo: un ecosistema natural bajo influencia humana*.

A escala regional, el periodo entre las décadas de los noventa y los dos mil representó, primero, una explosión de conocimiento sobre la estructura y el funcionamiento de los páramos; segundo, una serie de proyectos de conservación y desarrollo que exploraron mejores y más dignas alternativas para apoyar el manejo de los páramos desde la visión de las comunidades; y, tercero, la formación de nuevas cohortes de jóvenes, con novedosas herramientas y enfoques para el estudio de los ecosistemas y las especies de altura. Como resultado del trabajo de esas décadas, y a pesar de los vacíos que aún persisten, el páramo está ahora mucho mejor posicionado en el imaginario colectivo de lo que estuvo treinta años atrás.

A pesar de estos avances, el manejo y la conservación de los páramos sigue siendo una tarea pendiente y que hoy enfrenta nuevos y crecientes desafíos. El cambio climático está alterando las condiciones ambientales de las que dependen la estructura y el funcionamiento de los páramos, produciendo, por un lado, una reorganización de sus comunidades biológicas y, por otro, la pérdida de especies y servicios ecosistémicos. La expansión de la frontera agrícola, la minería y las nuevas dinámicas de migración humana imponen no solo una presión altísima sobre el ecosistema, sino también un cambio de la naturaleza y los actores de las actividades económicas que afectan a los páramos. En donde antes solo pensábamos en generación de alternativas económicas para comunidades indígenas marginalizadas, hoy también pensamos en los impactos a gran escala de las actividades mineras promovidas por un Estado en busca de recursos para financiar la economía de todo el país. En donde nuestra preocupación era la de los incendios y los impactos de la precaria ganadería de subsistencia, hoy tal vez

nos encontramos con las demandas de agua de grandes compañías agrícolas o las empresas de agua que drenan los páramos y muchas veces promueven la reubicación o migración interna de sus habitantes tradicionales. Y donde antes nuestra visión se centraba en los páramos entendidos casi estrictamente como ecosistemas de pajonal, hoy los reconocemos como ambientes complejos en los que los pajonales son parte de una matriz dinámica y heterogénea en la que se mezclan bosques de altura, ríos, lagunas, bosques, zonas periglaciares y turberas. En este contexto, el desafío actual se centra en cómo incorporar nuestra visión actual de los páramos como ecosistemas complejos, en enfoques de manejo que reconozcan las nuevas dinámicas socioambientales y la dimensión de las nuevas presiones que experimentan los ecosistemas altoandinos.

En este contexto, en este capítulo revisamos el estado del conocimiento sobre la ecología de los páramos desde la heterogeneidad de los ecosistemas que los componen.

Los pajonales de páramo en el Ecuador

Al ser los pajonales el tipo de vegetación más representativo de los páramos del Ecuador, gran parte de la investigación que se ha realizado en el país se ha implementado íntegra o parcialmente en este tipo de vegetación. Desde este punto de vista, nuestra comprensión sobre los factores ambientales, los patrones de diversidad, y el estado de conservación de los ecosistemas de páramo en el Ecuador posiblemente está basada en este tipo de ecosistema. Sin embargo, en esta sección queremos destacar no tanto la fisonomía y distribución de los pajonales de páramo como elemento del paisaje (Figura 6.1), sino más bien el papel que podrían tener como forma de vida esencial en la estructuración y funcionamiento de los ecosistemas de páramo.

Los pajonales de páramo están formados por varias especies de Poaceae formadoras de macollas o penachos (entre otras *Calamagrostis* spp., *Festuca* spp. y *Cortaderia* spp.), que les confieren varias características ecológicas importantes. Por un lado, los penachos de pajonal almacenan una considerable cantidad de carbono en su biomasa aérea (Tabla 6.1), especialmente por la acumulación de hojas muertas (necromasa) que en algunos casos puede alcanzar hasta un 80 % de la biomasa aérea (Hofstede, et al. 1995; Hofstede y Rossenaar, 1995). Esta biomasa, pese a no ser comparable con el almacenamiento de carbono en el suelo, parece tener un papel fundamental en la formación de una barrera física que protege el suelo, y en la generación de un microclima que mitiga los extremos de la temperatura del aire en el páramo. En un sistema experimental en el sector de Antisanilla, por ejemplo, se monitoreó la temperatura

del aire y del suelo en parcelas de pajonal intacto (*Calamagrostis intermedia*) durante tres meses, en parcelas quemadas o convertidas en cultivos de papa (Figura 6.2). De estas mediciones emergen dos patrones importantes. Primero, el suelo bajo el pajonal intacto tarda casi una hora más en calentarse por encima de la temperatura del aire que en las parcelas quemadas o cultivadas. Segundo, mientras que las temperaturas del suelo de las parcelas alteradas llegan a ser entre 6 y 7 °C más altas que las del aire, esta diferencia alcanza un máximo de 4 °C en las parcelas de pajonal intacto. Este calentamiento adicional de las parcelas quemadas o cultivadas refleja la pérdida de la cobertura vegetal y podría resultar en un incremento de la actividad microbiana (mayores tasas de descomposición de materia orgánica), y mayor evaporación del agua del suelo. Desde esta perspectiva, el microclima generado por los pajonales podría ser esencial para mantener el reservorio de carbono del suelo y los otros servicios ecosistémicos asociados. Al mismo tiempo, el microclima generado por los penachos de pajonal podría ser fundamental para el establecimiento y sobrevivencia del rico estrato herbáceo y arbustivo que caracteriza a muchas zonas de páramo (Zomer y Ramsay, 2021). Este potencial rol de facilitación de los pajonales no ha sido evaluado explícitamente.

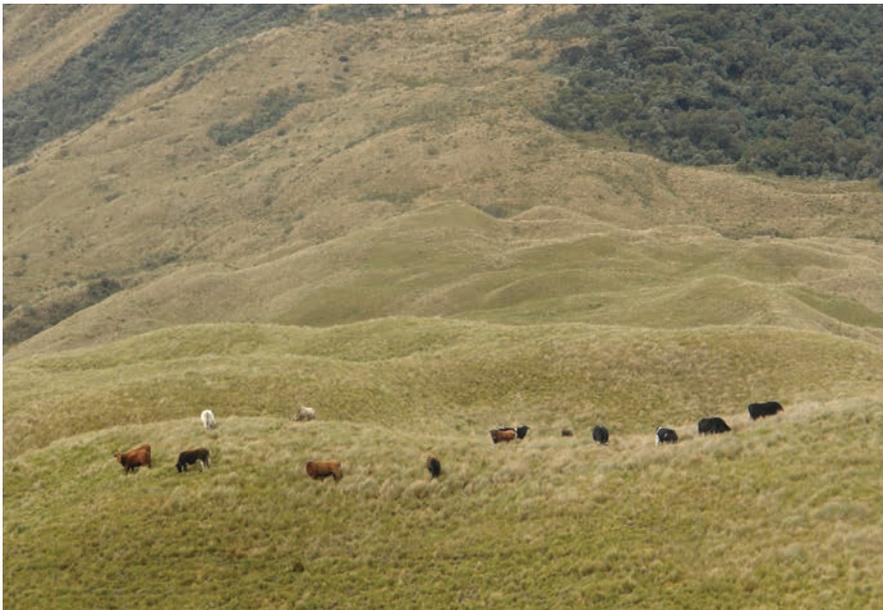


Figura 6.1 Un paisaje de páramo de pajonal dominado por *Calamagrostis intermedia*. Fotografía: Robert Hofstede

Por otro lado, a pesar de que la biomasa aérea de los pajonales tiende a ser mayor que su biomasa subterránea (relación biomasa aérea:biomasa subterránea = $9,91 \pm 1,2$) (Suárez, 2020) su alta densidad y la extensión de su cobertura implican que los pajonales de páramo podrían almacenar no menos de 3,6 Mg de biomasa subterránea por hectárea. Desde esta perspectiva, estos pajonales posiblemente tienen un rol preponderante en la contribución de carbono al suelo, con las implicaciones que este proceso tiene para la regulación hídrica, la estabilidad de los suelos y la mitigación del cambio climático.

Los pajonales de páramo también podrían ser esenciales como base de las redes tróficas de muchos ambientes de páramo. En términos tróficos, los pajonales son una fuente importante de alimento para conejos, ratones y otros herbívoros de los que luego dependen los niveles tróficos superiores, incluyendo águilas, gavilanes, zorros y comadrejas, entre otros. Al mismo tiempo, la extensa y compleja estructura provista por los pajonales sirve como hábitat para un sinnúmero de especies de flora y fauna que dependen estrictamente del microclima que se genera en ellos. En este sentido, las especies de Poaceae que forman penachos de pajonal podrían ser consideradas como una especie clave (*keystone*) al contribuir desproporcionadamente a la estructura y funcionamiento de los paisajes de páramo. Al igual que en otros casos, este rol ecológico de los pajonales aún no ha sido explícitamente evaluado.

Lamentablemente, al igual que otros tipos de vegetación de páramo, los pajonales están amenazados por las actividades humanas que típicamente afectan a las zonas altoandinas, como la expansión de la frontera agrícola, los incendios y la ganadería extensiva. Algunas de estas amenazas, como los incendios, parecerían estar disminuyendo en su extensión y frecuencia como resultado de acciones de conservación y de los complejos patrones socioeconómicos que afectan a los pobladores del páramo y que son analizados en detalle en los Capítulos 8 y 9. Sin embargo, los pajonales enfrentan nuevas amenazas, algunas de ellas provenientes de prácticas de manejo o restauración mal concebidas. En muchas partes del país, por ejemplo, se han desarrollado proyectos de restauración de páramos que consisten únicamente en la plantación extensiva de especies arbóreas de géneros como *Polylepis*, incluso en áreas en las que no hay evidencia de que ese tipo de vegetación haya sido el original. Al ser una forma de vida completamente diferente, los árboles tienen necesidades ambientales y efectos en el ecosistema que pueden ser diametralmente diferentes a los de los pajonales. Por un lado, los árboles almacenan mucho más carbono en la biomasa aérea, pero, por otro lado, el hábitat y microclima que generan son muy diferentes, y sus demandas hídricas

podrían ser mucho mayores. Estos factores varían mucho entre especies, por lo cual las generalizaciones no son posibles. Sin embargo, el reemplazo del ecosistema abierto de los pajonales por el ambiente cerrado de los bosques de *Polylepis* podría tener efectos importantes en la dinámica de carbono, la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad. Así, parece urgente generar regulaciones y mejores prácticas de restauración que no generen impactos adicionales a los que se pretenden mitigar.

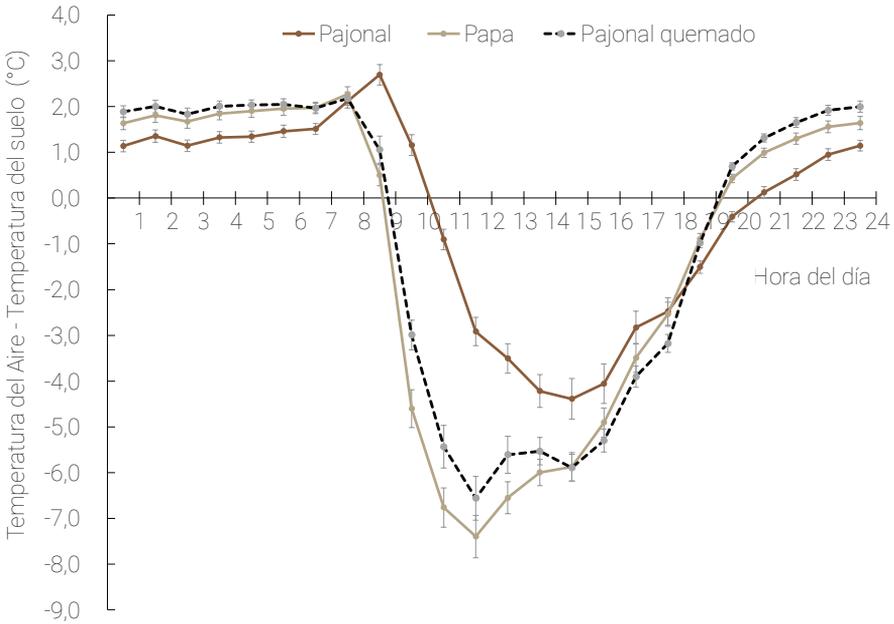


Figura 6.2 Promedios diarios de la diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura del suelo en parcelas de pajonal intacto, parcelas de pajonal quemado y parcelas de pajonal transformado en sembríos de papa. Los valores negativos implican que la temperatura del suelo es más alta que la temperatura del aire y viceversa. Cada valor representa el promedio (\pm error estándar) de mediciones de temperatura durante 84 días consecutivos en tres parcelas de cada tipo de tratamiento.

Tabla 6.1 Compilación de datos sobre almacenamiento de carbono en biomasa aérea, subterránea, y suelos de ecosistemas de páramo.

Tipo de Vegetación	Elevación (m)	Biomasa aérea (kgC/m ²)	Biomasa subterránea (kgC/m ²)	Carbono en Suelo (kgC/m ²)	Fuente	Observaciones
Pajonal	3750	0,4185			(Ramsay y Oxley, 2001)	
Pajonal	4000	0,397			(Ramsay y Oxley, 2001)	
Campo agrícola	3100	0,027			(Ramsay y Oxley, 2001)	
Arbustivo	3000	0,46 a 1,44		3,74 a 16,4	(Eguiguren et al., 2015)	
Pajonal	3000	0,29 a 0,49		5,48 a 15,33	(Eguiguren et al., 2015)	
Pajonal	4100	1,74	0,61		(Hofstede y Rossenaar, 1995)	
Pajonal quemado	3950	0,57	0,6		(Hofstede y Rossenaar, 1995)	
Pajonal	3500	0,16			(Cabrera y Duivenvoorden, 2020)	
Pajonal quemado	3654	0,23		6,76	(Farley et al., 2013)	Suelo 0-10 cm
Pajonal	3645	2,29		6,72	(Farley et al., 2013)	Suelo 0-10 cm
Pino	3601	27,9		3,35	(Farley et al., 2013)	Suelo 0-10 cm
Agrícola	3518	1,71		4,08	(Farley et al., 2013)	Suelo 0-10 cm
Pajonal	4100	0,7	1,4	11,3	(Calderón-Loor et al., 2020)	Suelo 0-36 cm

Estructura y funcionamiento de las turberas de páramo en los Andes ecuatorianos

Las turberas son ecosistemas que se forman en áreas relativamente planas del paisaje que tienden a acumular agua en capas superficiales del suelo durante la mayor parte del año (Figura 6.3). Al estar casi permanentemente anegados, los suelos de las turberas se vuelven anóxicos (carentes de oxígeno), lo que resulta en un cambio de las comunidades bacterianas que descomponen la materia orgánica y su reemplazo por otro grupo de microbios que puede sobrevivir en el suelo anegado, pero que es mucho menos eficiente al procesar la materia orgánica. Este cambio en la comunidad microbiana da lugar a un desbalance entre el aporte de materia orgánica al suelo por parte de las plantas y su descomposición, lo que resulta en grandes acumulaciones de turba que pueden alcanzar hasta 12 m de profundidad (Vitt, 2008; Finlayson y Milton, 2018).



Figura 6.3 Una turbera en el páramo del Parque Nacional Cayambe Coca. Fotografía: Patricio Mena-Vásquez

En el Ecuador, las turberas de páramo han permanecido extrañamente alejadas del imaginario colectivo y de las estrategias de investigación y conservación del país (Suárez et al., 2022a, 2022c). En algunos sitios se las conoce como *pojyos*, *moyas* o *ciénegas*. Sin embargo, ninguno de esos nombres está ampliamente difundido y arraigado en el país. Igualmente, en el ámbito institucional las turberas de páramo no aparecen en los mapas oficiales de vegetación o lo hacen como una categoría más de pajonales (herbazal inundable) que no refleja las características ecológicas que distinguen a estos humedales.

El conocimiento de la diversidad biológica asociada a las turberas de páramo es aún incipiente y no contamos con estimados sobre la proporción de especies de flora y fauna que están estricta o facultativamente asociadas a estos humedales. Sin embargo, hasta el momento se han identificado tres grandes tipos de turberas (turberas de almohadillas, turberas de juncos y ciperáceas, y turberas de gramíneas y musgos) que se distinguen principalmente por su tipo de vegetación y por los patrones de nivel freático que experimentan (Suárez et al., 2022b). En términos generales, los niveles más altos de diversidad de plantas parecen estar asociados a las turberas de gramíneas y musgos que se encuentran en las elevaciones intermedias e inferiores del páramo (~3200–4100 m). Por el contrario, las turberas de almohadillas y las de juncos y ciperáceas suelen tener comunidades menos ricas, en el primer caso por ocurrir en las zonas más altas de páramo, mientras que, en el segundo, por desarrollarse en sitios con niveles de inundación elevados y casi permanentes que promueven la dominancia de unas pocas especies con alta tolerancia a la inundación (Suárez et al., 2022b).

El estudio de la ecología de las turberas de páramo en el Ecuador ha estado concentrado en temas como la caracterización de su estructura (Hribljan et al., 2016), su dinámica de carbono (Hribljan et al., 2017; Sánchez et al., 2017; Suárez et al., 2021) y su función en la regulación hídrica (Mosquera et al., 2015). De estos estudios se destaca una enorme capacidad de almacenamiento de carbono que puede variar entre 300 y 2000 MgC ha⁻¹ en las turberas del sur del país, que se han desarrollado sobre rocas plutónicas y metamórficas, y entre 250 y 3000 MgC ha⁻¹ en las turberas desarrolladas sobre suelos volcánicos en el resto del país (Tabla 6.2) (Suárez et al., 2022b). A diferencia de las turberas de montaña en otras partes del mundo, las turberas de páramo pueden tener grandes cantidades de carbono almacenado en suelos minerales que se intercalan con, o subyacen a, las capas de turba (suelos orgánicos originados de la descomposición incompleta de la vegetación). Este patrón es especialmente marcado en las turberas desarrolladas sobre paisajes volcánicos en las que el carbono en suelos minerales en promedio puede alcanzar hasta un 10 % del carbono total de la turbera (Tabla 6.2) (más detalles en el Capítulo 2).

Tabla 6.2 Patrones de almacenamiento de carbono en turberas desarrolladas sobre rocas volcánicas, plutónicas y metamórficas en los páramos del Ecuador.

		MgC ha ⁻¹		
		Turba	Suelo mineral	Total
Plutónica/Metamórfica	Mínimo	202,1	50,2	294,9
	Promedio	786,8	101,0	831,7
	Máximo	1929,8	193,2	1997,7
Volcánica	Mínimo	119,8	36,7	245,0
	Promedio	938,9	377,9	1094,1
	Máximo	3035,6	1175,2	3121,1

El almacenamiento de carbono en los tres tipos de turberas también es muy variable, pero tiende a ser especialmente alto en las turberas de juncos y ciperáceas que se desarrollan en el fondo de los valles glaciares. En estos humedales, el almacenamiento promedio de carbono puede alcanzar entre 1000 y 3000 MgC ha⁻¹, mientras que las turberas de almohadillas y las de gramíneas y musgos pueden almacenar entre 250 y 1400 MgC ha⁻¹ (Suárez et al., 2022b). En términos generales, esta gran capacidad de almacenamiento de carbono en las turberas de páramo se explica por su alta productividad de raíces y por las bajas tasas de descomposición que resultan de las condiciones anaeróbicas en los suelos anegados. Por ejemplo, en algunas turberas de almohadillas de los páramos del norte del Ecuador se han reportado altísimas tasas de productividad de raíces que varían entre 1030 y 1080 g m⁻² año⁻¹ para almohadillas de *Plantago rigida*, y entre 2000 y 2800 g m⁻² año⁻¹ para almohadillas de *Distichia muscoides* (Suárez et al., 2021). A largo plazo, la alta productividad de estas turberas, combinada con bajas tasas de descomposición de materia orgánica, ha resultado en elevadas tasas de acumulación que, en promedio, alcanzan los 26 gC m⁻² año⁻¹.

Los vacíos de información sobre la estructura, la diversidad y el funcionamiento de las turberas de páramo son aún considerables. Entre los temas de investigación más urgentes se destacan los siguientes:

- la caracterización ecofisiológica de las especies que producen turba en los páramos;
- el análisis de la respuesta del ciclo de carbono a los cambios en el uso del suelo;

- la influencia del nivel freático y la cantidad de nutrientes sobre los patrones de productividad y descomposición de materia orgánica;
- la caracterización funcional de la fauna asociada a las turberas;
- los efectos del cambio climático sobre los patrones de acumulación de materia orgánica y el balance de carbono;
- el papel de las turberas de páramo en la regulación hídrica y la provisión de servicios ecosistémicos para poblaciones y comunidades locales;
- el impacto de actividades como la ganadería extensiva y capacidad de respuesta sucesional de las turberas (por ejemplo, a la exclusión del pastoreo).

Respuesta de las turberas a la restauración hidrológica

Las turberas son especialmente sensibles a los efectos de las actividades humanas en los páramos. Al formarse en áreas relativamente planas y con abundante agua, son sitios ideales para el desarrollo de agricultura y ganadería. Pero para viabilizar estas actividades, las turberas deben ser secadas mediante la excavación de canales que drenan el agua y bajan su nivel freático. De esta manera, el uso de las turberas normalmente requiere la eliminación completa o parcial de las principales características que les confieren su funcionamiento ecológico (alto nivel freático y suelos anegados) (Suárez et al., 2022a).

Si bien existen pocas iniciativas de restauración de turberas en el norte de los Andes, Suárez et al. (2022c) describen el proceso de restauración de una turbera de 21 hectáreas donde se cavaron múltiples zanjas de drenaje hace más de 100 años. La estrategia de restauración consistió en la instalación de diques de madera en los canales con el fin de frenar el flujo de agua en las zanjas y así promover la redistribución del agua en toda la turbera y el rehumedecimiento del suelo. En solo tres años desde el inicio de la restauración, el nivel freático incrementó (2018: 27 ± 3 cm; 2021: 7 ± 1 cm) y se ha estabilizado, manteniéndose consistentemente dentro de los primeros 10 cm del suelo. Esto, a su vez, ha resultado en un cambio en la composición de la vegetación, con el apareamiento de especies típicas de turbera (*Plantago rigida*, *Juncus arcticus* y *Eleocharis dombeyana*), lo que indica que la funcionalidad de la turbera se está recuperando. Aunque estos resultados parecen prometedores, todavía queda mucho por conocer sobre la implementación y desarrollo de este tipo de proyectos y sus implicaciones ecológicas y funcionales en las turberas. Desde esta perspectiva, se requieren estudios adicionales que exploren un uso más sostenible de las turberas y permitan su restauración a largo plazo (Suárez et al., 2022b).

Los bosques altoandinos: ecología y conservación de bosques de *Polylepis* y *Gynoxys*

La vegetación de bosque asociada a los paisajes de páramo en el Ecuador puede ser agrupada en dos categorías más o menos discretas. Por un lado, los bosques de transición entre el bosque montano alto y la vegetación abierta de páramo y, por otro, los bosques azonales que ocurren en parches discontinuos por encima del límite arbóreo. Estos últimos, desarrollados generalmente en áreas relativamente resguardadas como el fondo de quebradas, las bases de murallas, o contrafuertes rocosos, donde las condiciones ambientales de sombra, protección del viento y mayor humedad favorecen su establecimiento y desarrollo. Estos bosques albergan a un gran número de especies que no ocurren en ningún otro tipo de vegetación, lo que les convierte en un importante *hotspot* de biodiversidad (Chuncho y Chuncho, 2019).

Los géneros *Polylepis* y *Gynoxys* son elementos importantes tanto de los bosques de transición como en los bosques aislados. La diferencia es que, en los primeros estos árboles crecen en una mezcla con árboles de géneros como *Weinmannia*, *Hesperomeles* y *Miconia*, mientras en los bosques aislados tienden a dominar el estrato arbóreo. Los bosques de *Polylepis* se distribuyen en los Andes desde los 3500 hasta los 5200 m. En los páramos, generalmente, se ubican en la franja de vegetación altoandina en los territorios de Venezuela, Colombia, Ecuador y norte de Perú (Kerr, 2004). Basados en un concepto de especie que considera la distinción morfológica, climática y biogeográfica como indicadores de independencia evolutiva, se han reorganizado 45 especies de *Polylepis* (Boza y Kessler, 2022). En el Ecuador se han reportado once de esas especies, entre las cuales *P. simpsoniae* es nueva, *P. lanuginosa* es endémica para el país y *P. racemosa* es introducida (Capítulo 4). A estas especies se unen las especies nativas *P. incana*, *P. reticulata*, *P. longipilosa*, *P. humboldtii*, *P. loxensis*, *P. ochreatea*, *P. microphylla* y *P. pauta* (Boza et al., 2020; Boza y Kessler, 2022), distribuidas desde los 2700 hasta 4350 m en las cordilleras Oriental y Occidental de los Andes ecuatorianos (Romoleroux et al., 2016).

A pesar de los avances recientes, la taxonomía de *Polylepis* aún no está completamente resuelta. La mayoría de las clasificaciones se han centrado en muestras de herbario, sin tomar en cuenta la plasticidad fenotípica y su respuesta a las condiciones ambientales, que muchas veces dan lugar a la presencia de individuos de una misma especie con hojas o folíolos más grandes, mayor o menor presencia de pubescencia o diferente número de flores por inflorescencia (Boza

y Kessler, 2022). En este contexto, el estudio de este género aún requiere de enfoques taxonómicos más integrales e información adicional de campo.

Desde el punto de vista ecológico, los bosques de *Polylepis* (Figura 6.4) se caracterizan por generar condiciones ambientales particulares que modifican significativamente la diversidad, estructura y función del ecosistema. Por ejemplo, la alta densidad de troncos y el dosel denso crean microclimas dentro de los bosques que bloquean la radiación y el viento, incrementando así la humedad que es aprovechada por plantas epífitas como musgos y líquenes que cubren las ramas y el suelo en los estratos más bajos. Adicionalmente, el filtro ambiental de estos bosques permite que animales nativos puedan protegerse y aprovechar de condiciones más favorables. Como resultado de estas condiciones ambientales, los bosques de *Polylepis* podrían tener un impacto importante en la regulación hídrica; se ha reportado que en su biomasa aérea pueden almacenar hasta 183 MgC ha^{-1} (Fehse et al., 2002), mientras que sus suelos almacenan entre 500 y 700 MgC ha^{-1} (Romoleroux, 2019). Al mismo tiempo, el microclima de estos bosques ha permitido el desarrollo de comunidades de flora y fauna diversas, con altos niveles de endemismo (Simpson 1986; Kessler, 2006; Servat-Valenzuela, 2006; Mendoza y Cano, 2011).



Figura 6.4 Un bosque de *Polylepis* cf. *reticulata* en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo. Fotografía: cortesía de Pablo Corral Vega©

El estado de conservación de los bosques de *Polylepis*

Al igual que el resto del páramo, los bosques de *Polylepis* han estado bajo constante presión antropogénica, especialmente por la expansión de la frontera agrícola, el uso de leña y las actividades mineras (UNEP-WCMC, 2004). Estas actividades tienden a fragmentar los bosques o reducir su cobertura, generando menor densidad y tamaño de los árboles, y afectando a las comunidades de plantas y animales que están estrictamente asociados a estos bosques (Kessler, 1995). Estos impactos se ven agravados por el hecho de que las especies que forman estos bosques tienen poblaciones pequeñas y una limitada propensión para colonizar nuevos hábitats (Cierjacks et al., 2007; Bader et al., 2007b), lo que las hace cada vez más vulnerables y reduce su posibilidad de adaptarse a nuevas presiones como el cambio climático. Entre estas especies, Boza y Kessler (2022) clasifican a *Polylepis longipilosa* y *P. humboldtii* en peligro crítico, *P. lanuginosa*, *P. simpsoniae* y *P. microphylla* en peligro, mientras que *P. pauta*, *P. ochreatea* y *P. reticulata* están como vulnerables. Las poblaciones de todas estas especies son pequeñas, se encuentran severamente fragmentadas y, en la mayoría de los casos, fuera de áreas protegidas.

Una de las amenazas más claras para los bosques de *Polylepis* en el Ecuador es la fragmentación, que desemboca en la pérdida de diversidad genética y afecta a su adaptación a nuevos cambios. Aunque no se cuenta con información específica, algunos estudios palinológicos en Perú reportan una disminución significativa de los bosques de *Polylepis* tras la presencia humana desde aproximadamente hace 11.000 años (Hansen et al., 1984, 1994; White, 2013). Al mismo tiempo, como parte del paisaje altoandino, estos bosques posiblemente han experimentado impactos antropogénicos por más de 12.000 años (Rademaker et al., 2014) y aún son frecuentemente utilizados por las comunidades locales.

Además de la pérdida de cobertura, el impacto humano en los bosques de *Polylepis* se evidencia en bosques menos densos, árboles más pequeños (Sylvester et al., 2017) y la presencia de híbridos por la translocación de especies para programas de forestación, producción de leña y para el establecimiento de cercas vivas (Kessler, 1995). Debido a que los procesos de hibridación son comunes entre especies de *Polylepis*, tanto entre especies simpátricas como alopátricas, la identificación morfológica es muchas veces difícil. Esta falta de claridad taxonómica afecta su uso en los procesos de restauración o forestación, lo que ha llevado a la generación de potenciales áreas híbridas (Segovia-Salcedo et al., 2021). En el Ecuador se ha reportado la presencia extensiva de híbridos entre *P. ochreatea* y *P. pauta* en el norte del país, y posiblemente entre *P. incana* y otras especies del mismo complejo.

La situación de los bosques de *Gynoxys*

El género *Gynoxys* está formado por 138 especies distribuidas a lo largo de los Andes entre Venezuela y Bolivia. En el Ecuador se han reportado 33 especies (23 de ellas endémicas), que se distribuyen entre los 3000 y 4000 m. Generalmente crecen en suelos con alto contenido de humedad y materia orgánica (Figura 6.5), aunque también se las puede encontrar en laderas rocosas y en arenales del superpáramo.



Figura 6.5 Un bosque de *Gynoxys acostae* en la antigua vía a Papallacta, Parque Nacional Cayambe Coca. Fotografía: Patricio Mena-Vásconez

Tanto las especies del género *Polylepis* como las del género *Gynoxys* capturan una gran cantidad de agua proveniente de la lluvia y la niebla de los páramos, y son importantes para el ensamblaje de redes tróficas, como se detalla en el Capítulo 3. Los bosques de estas especies generan una densa cobertura vegetal y podrían modificar las tasas de evapotranspiración, creando así ambientes con mayores niveles de humedad y almacenamiento de agua, y menores tasas de erosión del suelo (Chiquín y Velecela, 2015). Sin embargo, todavía es necesario estudiar más a fondo la hidrología de las cuencas dominadas por estas especies. Por otro lado, en los bosques de *Gynoxys* se ha reportado la presencia de una comunidad diversa de polinizadores formada principalmente por abejas, dípteros y colibríes que se alimentan de sus flores. Entre estos están el colibrí pico espina dorsiazul, *Chalcostigma stanleyi*, una especie nativa con estado UICN de preocupación menor, y el azulito altoandino, *Xenodacnis parina*, que muestran una marcada predilección por zonas con presencia de *Gynoxys* (Aguilar-Ullauri, 2020; Iñiguez-Vela y Aguilar-Ullauri, 2021).

A pesar de que los bosques de *Gynoxys* están sujetos a las mismas amenazas descritas para *Polylepis*, algunas de sus especies pueden sobrevivir en lugares degradados, donde la capa superficial del suelo se encuentra notablemente erosionada (Jadán et al., 2021). Esta característica las hace estratégicas para planes de conservación y restauración de la vegetación (Chiquín y Velecela, 2015).

***Treelines*: ecología y dinámica del ecotono entre bosques andinos y páramos**

En términos generales, la propia definición de páramo establece que este ecosistema se ubica entre el límite actual o potencial del bosque cerrado y la línea de nieve permanente (donde esté presente). Por esto, es clave entender la naturaleza de este límite del bosque (*treeline*), dónde se encuentra y cómo es su dinámica. La explicación más sencilla sobre la actual posición del límite entre el bosque y el páramo tiene que ver con la temperatura: encima de esta línea el clima es demasiado frío como para que crezcan los árboles. Sin embargo, la variabilidad en la estructura y posición del límite entre el páramo y el bosque sugiere que hay muchos factores adicionales que influyen en este ecotono, como la alta radiación solar, la competencia, las condiciones del suelo y la capacidad de dispersión (Bader et al., 2007). En esta sección resumimos los principales (Sevink y Hofstede, 2013).

La gran mayoría de árboles no pueden crecer a altitudes mayores que el bosque andino debido a la severidad de las condiciones climáticas (Bader, 2007;

Bader y Ruijten, 2008; Rada et al., 2019). Sin embargo, existen en algunas especies adaptaciones morfológicas que les permiten tolerar las condiciones extremas de frío y radiación que predominan en el páramo. Los géneros más conocidos y estudiados de árboles que crecen por encima del límite de bosque cerrado son *Polylepis*, *Gynoxys* y *Buddleja*, que frecuentemente ocurren en el páramo, inclusive sobre los 4400 m (véanse la sección anterior y Luteyn, 1999). Estos y otros árboles de géneros como *Hedyosmum*, *Escallonia* y *Hesperomeles* forman parte de la biodiversidad natural del páramo y contribuyen a su belleza e importancia para la ecología y la sociedad (Sevink y Hofstede, 2013; Figura 6.6).



Figura 6.6 El límite entre el bosque andino y el páramo en la Estación Biológica Guandera (Carchi). Fotografía: Robert Hofstede

A nivel mundial, los ecotonos de la línea arbórea (*treeline*) varían desde líneas abruptas hasta zonas extendidas a lo largo de gradientes en las que los árboles son cada vez más pequeños o dispersos conforme aumenta la elevación, hasta desembocar en una vegetación abierta (Bader et al., 2021). En el caso de la alta montaña tropical, los patrones de temperatura están caracterizados por una casi nula estacionalidad anual, acompañada por amplias variaciones diarias que pueden alcanzar rangos de hasta 20 °C. Como resultado de estas condiciones, la ubicación del límite superior del bosque no es abrupta y más bien se extiende a lo largo de un cinturón altitudinal de varios centenares de metros donde el

bosque da lugar a una vegetación arbustiva y luego a una vegetación herbácea. En condiciones naturales, este cinturón (frecuentemente llamado subpáramo, Cuatrecasas, 1934, 1958) está formado por un mosaico de bosques, arbustales, y páramo herbáceo. Sin embargo, en áreas con impacto antropogénico, esta transición tiende a ser más abrupta (Llambí, 2015).

La elevación a la que ocurre el límite arbóreo varía considerablemente a escala local y regional. En los Andes del norte del Ecuador este límite suele ubicarse a mayor altitud (3500 y 4000 m), mientras que en el sur comúnmente se encuentra entre los 3000 y 3500 m (Hofstede et al., 1998; Sarmiento y Frolich, 2002; Moscol, 2010; Brunschön y Behling, 2010). Esta variabilidad, unida a las diferencias en el carácter de la transición (abrupta o gradual), ha dado lugar a un debate sobre el potencial rol que el ser humano podría haber tenido en el establecimiento de la posición actual del límite superior de bosque (Sevink y Hofstede, 2013). Conocer si el límite del bosque es natural o si su posición actual ha sido influida por efectos antrópicos es clave para entender la naturaleza del límite inferior de los páramos y su futuro bajo los efectos del cambio climático (Bader et al., 2021).

Uno de los procesos que podría influir sobre la actual posición de la línea arbórea es la 'paramización', es decir, el reemplazo de áreas de bosque andino con vegetación de páramo (Capítulos 1, 12). La paramización ocurriría como consecuencia directa de las quemadas extensivas en el páramo y la tala de bosques para el establecimiento de zonas de pastoreo o de cultivo, que eliminan la vegetación arbórea, y permiten la extensión del páramo sobre el límite superior del bosque andino (Hofstede et al., 1998; Sarmiento y Frolich, 2002; Llambí, 2015). El límite de bosque que se genera por este fenómeno tiende a ser más abrupto y permanente, porque la vegetación de páramo cubre el suelo con una capa gruesa de paja, limitando así la regeneración del bosque natural (efecto de retroalimentación positiva; Bader, 2007; Bader et al., 2007). La regeneración natural está aún más limitada cuando persisten los incendios y la presencia de ganadería extensiva, ya que estos fenómenos afectan directamente a la regeneración de especies leñosas (Verweij, 1995; Bueno y Llambí, 2015). Tonneijck (2009) y Moscol (2009) demostraron que a largo plazo (centenares de años), es posible que se establezca un bosque andino sobre la vegetación de páramo. Sin embargo, los patrones de disponibilidad de semillas podrían dar lugar a diferencias entre la ecología de los fragmentos de bosques residuales (relacionados a la paramización) y los fragmentos de bosque regenerados descritos por estas investigaciones.

Otro aspecto que influye en la posición y la estructura del límite del bosque es el cambio climático (Capítulo 12). La influencia principal del calentamiento global sería el movimiento hacia arriba del límite potencial del bosque (Cuesta et al., 2008; Young et al., 2011). Sin embargo, no existe consenso sobre si el límite

superior de bosque actual es un resultado de las condiciones climáticas en el pasado reciente (principios de siglo XIX), o si el límite ya se adaptó al cambio climático reciente y, por ende, diverge del límite 'natural' (Parmesan y Yohe, 2003). Igualmente, aún no existe acuerdo sobre la magnitud esperada y la velocidad del incremento en altitud del límite de bosque en los próximos años (Etter y Villa, 2000; Bader et al., 2021).

Por el mismo efecto de retroalimentación positiva, el límite de bosque podría ser relativamente estable a corto plazo, y podría ser necesario un cambio climático considerable para causar un incremento altitudinal en el límite del bosque (Bader et al., 2007). Otro elemento de cambio climático que puede influir en el límite de bosque es la mayor concentración de CO_2 atmosférico que afecta la competencia entre plantas con ciclos C_3 y C_4 , o sea entre especies leñosas (bosque) y gramíneas (páramo; Boom et al., 2001). En este contexto, las extrapolaciones lineales sobre el cambio climático y su relación con los cambios en la posición del límite del bosque no son necesariamente correctas.

Una aproximación alternativa para predecir cambios en el límite de bosque a más largo plazo y los cambios potenciales en la composición de la vegetación asociada es el estudio de los cambios históricos, tanto en altitud y composición de los cinturones altitudinales de vegetación. De los estudios paleoecológicos ya es conocido que los ciclos glaciares-interglaciares del Cuaternario han resultado en grandes cambios repetitivos en la posición del límite de bosque. Originalmente, estos cambios fueron atribuidos únicamente a los cambios de temperatura, pero recientemente se ha evidenciado, a través de estudios palinológicos de alta resolución, que la variabilidad en los patrones de precipitación también ha dado lugar a cambios complejos en la vegetación (Hooghiemstra y van der Hammen, 2004; Weng et al., 2006). Todo esto implica que el límite de bosque 'natural' es muy dinámico y puede ajustarse relativamente rápido a cambios en las condiciones climáticas y que está elevándose desde el inicio del cambio climático actual.

Ecología y dinámica de comunidades en superpáramos y zonas de retroceso glaciar

En las altas montañas del norte de los Andes, por encima de los 4000 m se encuentran los superpáramos, que son ecosistemas establecidos en los terrenos agrestes y de roca suelta recientemente liberados por el retroceso glaciar (Figura 6.7; Capítulo 4). En estos ambientes la supervivencia de los organismos se ve limitada por factores abióticos como el clima extremo, la topografía, suelos poco desarrollados y baja disponibilidad de recursos.



Figura 6.7 Superpáramo del Carihuairazo con humedal. Las plantas claras son *Senecio nivalis*. Fotografía: Robert Hofstede

Las áreas de superpáramo están experimentando rápidos cambios asociados con el incremento de la temperatura y el retroceso de glaciares que están sufriendo disminuciones significativas en su masa y extensión, como ha ocurrido en el Cotopaxi, el Carihuairazo, el Antisana, el Cayambe y el Chimborazo (Jordan et al., 2005; Vuille et al., 2008; Rabatel et al., 2013 y Capítulo 12). A medida que estos glaciares retroceden, se liberan nuevas zonas que amplían la extensión del superpáramo y, gracias a la acción del cambio climático, se vuelven disponibles para el inicio de nuevos procesos de sucesión primaria. Es en estas zonas en las que el establecimiento de organismos pioneros modificará lentamente el paisaje, facilitando así el desarrollo de nuevas comunidades biológicas cuya composición, estructura y funcionamiento apenas están siendo descritas.

En el Ecuador, los superpáramos se distribuyen a lo largo de las cordilleras Occidental y Oriental por encima de los 4000–4200 m. Su vegetación se

desarrolla sobre el suelo rocoso y arenoso de morrenas glaciares antiguas o sobre flujos de lava. Al mismo tiempo, al ubicarse en las cotas superiores del páramo, esta vegetación está expuesta a condiciones de bajas temperaturas, alta radiación solar, desecación y fuertes vientos, lo que favorece el establecimiento de especies de plantas de baja estatura y con adaptaciones fisiológicas y anatómicas que les permiten sobrevivir en estas condiciones. En estos ambientes, por ejemplo, son frecuentes las especies con altos niveles de pubescencia como *Senecio nivalis*, *S. canescens*, *Cerastium floccosum*, *Lupinus alopecuroides* y *Draba aretioides*.

Otro aspecto importante de las comunidades biológicas de los superpáramos se relaciona con sus patrones biogeográficos. Debido a que se desarrollan en los terrenos escarpados de las partes más altas de las montañas, las poblaciones de las especies del superpáramo pueden experimentar aislamiento geográfico y desconexión, dando lugar a que cada localidad tienda a desarrollar una composición de especies única, sobre todo de plantas e insectos, con un alto grado de endemismo. Por ejemplo, en el estudio desarrollado por Sklenář y Balslev (2005) en 18 superpáramos del Ecuador, se encontró que cerca del 29 % de las especies se encontraban restringidas a localidades específicas de superpáramo. Asimismo, dos tercios de las especies estaban distribuidas en menos de diez sitios y solamente el 2 % de ellas tenía una distribución amplia. Esto es consecuente con los patrones que se ven a mayor escala en los páramos del norte y en la puna, donde se ha reportado que la similitud florística entre cumbres a lo largo de los Andes disminuye con la distancia geográfica, siendo este efecto del aislamiento más marcado en los páramos que en las punas (Cuesta et al., 2017).

De igual manera, insectos como los escarabajos carábidos tienen una distribución restringida y exhiben patrones de microendemismo a lo largo de la cordillera debido a su baja capacidad de dispersión y alta sensibilidad a la humedad y temperatura locales (Moret et al., 2016, 2021). Específicamente, cerca del 60 % de las especies de carábidos tienen microendemismo y están restringidas a una sola cumbre (Murienne et al., 2022). Esta correlación entre la distancia y la similitud implica que cada superpáramo actúa como una isla desconectada del resto y promueve el desarrollo de patrones de endemismo entre los organismos que tienen mecanismos de dispersión limitados (Flantua et al., 2019; Tovar et al., 2020; Peyre et al., 2020).

Además de los factores limitantes asociados al aislamiento geográfico de los superpáramos, las especies tienen que lidiar con filtros ambientales comunes en la alta montaña como son la poca disponibilidad de espacio con condiciones ideales para su establecimiento y desarrollo (Suárez et al., 2015); los extremos rangos

térmicos diarios; los niveles altos de radiación (Sklenář et al., 2015; Chimborazo y Vuille, 2021); la variabilidad en la precipitación a escala local (Ilbay-Yupa et al., 2021), y las condiciones pobres del suelo (por ejemplo, baja capacidad de retención hídrica, bajo contenido de materia orgánica y nutrientes) (Khedim et al., 2021; Llambí et al., 2021). Para sobrellevar estas condiciones, las especies han desarrollado una serie de estrategias y adaptaciones, entre las cuales se destacan la utilización de microhábitats o refugios en medio de las morrenas glaciares o flujos de lava, interacciones interespecíficas de facilitación y mecanismos fisicoquímicos de tolerancia y evasión, que ayudan a disminuir la exposición directa a las condiciones ambientales.

Microhábitats y refugios en zonas periglaciares

Los microhábitats son áreas que se crean por la irregularidad del terreno y que brindan a las especies mejores condiciones para su establecimiento y desarrollo. En los ambientes extremos como el superpáramo, estos microhábitats proveen microclimas más constantes y con rangos térmicos más estrechos. En zonas descubiertas por el retroceso glaciar, como en el volcán Cotopaxi, se pueden encontrar especies creciendo a más de 4800 m debido a que ocupan los espacios entre las rocas de las morrenas glaciares y los flujos de lava, donde la radiación y la exposición al viento son menores. En estos lugares se ha encontrado una mayor abundancia de plantas (> 55 %) y más riqueza de especies, en comparación con los arenales expuestos (35 %) a la misma altitud (Suárez et al., 2015). Igualmente, en el volcán Guagua Pichincha hay entre 12 y 20 veces más cobertura de plantas en los flujos de lava que en los arenales. Suárez et al. (2015) sugieren que estas estructuras de la topografía a pequeña escala pueden ser claves en la disponibilidad de microhábitats para especies con nichos térmicos angostos y óptimos térmicos más altos (véase también Graae et al., 2018). Este efecto de la topografía a pequeña escala también ha sido reportado en zonas de retroceso glaciar en el Antisana, donde cerca de la mitad de las especies encontradas estuvieron asociadas a la presencia de rocas, y con un mayor efecto en áreas cercanas al glaciar (Anthelme et al., 2021). Una de las especies más comunes en las zonas de alta montaña es *Senecio nivalis*, que tiene uno de los rangos de distribución más altos, desde 4400 m hasta 5385 m en el volcán Chimborazo. A menudo, *S. nivalis* se encuentra como individuos solitarios en estas elevaciones (Sklenář et al., 2021a), pero en alturas menores se encuentra formando parches de varios individuos, lo que posiblemente indica que la capacidad de formar clones a mayores elevaciones se ve limitada por el estrés ambiental. Otras especies también tienen registros similares como *Xenophyllum rigidum*, *Azorella aretioides*, *Arenaria dicranodes*, *Draba obovata*,

Cerastium floccosum y *Baccharis caespitosa*, que en varios páramos se pueden encontrar sobre los 4900 m.

Las zonas liberadas por el retroceso glaciar también constituyen un espacio hacia donde las especies pueden extenderse, evitando así la contracción de su distribución o su potencial extinción (Anthelme et al., 2021; Capítulo 12). La colonización de estos espacios está caracterizada por especies pioneras que tienen dispersión por viento (por ejemplo, Asteraceae, Poaceae, líquenes, musgos) y formas de crecimiento en cojín, que favorecen interacciones positivas de facilitación y ayudan a la construcción de las comunidades de plantas (Bellard et al., 2012; Anthelme et al., 2014; Llambí et al., 2021). En glaciares como el del Carihuairazo, que han perdido cerca del 95 % de su área desde 1956, los primeros organismos en ocupar los suelos desnudos son líquenes, musgos y algas, probablemente provenientes del deshielo del glaciar (Rosero et al., 2021). Estos organismos forman biocostras que están asociadas a suelos inorgánicos poco desarrollados (Anthelme et al., 2022) y han sido frecuentemente reportadas como grupos pioneros en zonas de retroceso glaciar (Rosero et al., 2021; Llambí et al., 2021). Su éxito en las fases iniciales de la sucesión está dado por su capacidad para mitigar las condiciones microclimáticas (al reducir la variabilidad de la temperatura superficial del suelo y el número de días con temperaturas congelantes) y aumentar lentamente la fertilidad del suelo (Breen y Lévesque, 2008). Después del establecimiento de las especies pioneras y las biocostras, la sucesión primaria en estas zonas suele continuar con el arribo de especies de plantas vasculares como *Poa cucullata*, *Xenophyllum humile*, *Azorella aretioides*, *Arenaria dicranodes*, *Werneria pumila* y *Cerastium floccosum*, que se vuelven más abundantes a medida que la sucesión progresa. Estos cambios en la vegetación son acompañados por el arribo de invertebrados (entre ellos quironómidos, tardígrados, rotíferos y nemátodos), que tienen tamaños corporales pequeños o son fácilmente transportados por corrientes de viento (Cauvy-Fraunie et al., 2015; Moret et al., 2019; Rosero et al., 2021; Sklenář et al., 2021b). A medida que pasa el tiempo, las especies pioneras van desarrollando mejores condiciones del sustrato y mayor espesor de suelo a través de la incorporación de materia orgánica y nutrientes. Estas condiciones de suelo un poco más maduro permiten la sucesión de comunidades más complejas, con más especies y más grupos funcionales de plantas, invertebrados y microorganismos (Sklenář et al., 2010; Llambí et al., 2021; Rosero et al., 2021).

La sucesión primaria en zonas periglaciares se da a lo largo de una gradiente de estrés debido a la severidad de las condiciones del sustrato recién expuesto. Cuando las especies se encuentran en los extremos de esta gradiente, en donde las condiciones ambientales son más severas y la disponibi-

alidad de recursos más baja, las interacciones de facilitación planta-planta se intensifican (Anthelme y Dangles, 2012; Anthelme et al., 2014). Particularmente, especies de plantas formadoras de cojín como *Azorella aretioides*, *Arenaria dicranodes*, *Xenophyllum humile*, *Eudema nubigena* e *Hypochaeris* sp. pueden aumentar la riqueza local de especies (Cavieres et al., 2014). Por ejemplo, Sklenář (2009) reportó que la presencia de especies formadoras de cojines en morrenas de los llinizas incrementó hasta cuatro veces la diversidad de plantas a escala local, en comparación con el suelo desnudo. Algunas de las especies que crecen sobre los cojines son hospedero-específicas, como es el caso de *Calamagrostis* spp. y *Oritrophium peruvianum*, que crecen solamente en cojines de *X. humile* o *Lachemilla* sp., y *Poa* spp., que crecen en cojines de *Azorella* y *Arenaria*. Por otro lado, la interacción entre las especies no siempre es de facilitación y puede cambiar a medida que el estrés se vuelve mayor o menor. A lo largo de una gradiente de elevación, se ha encontrado que existe una transición desde relaciones de competencia o neutras en elevaciones bajas hasta efectos de facilitación a elevaciones mayores (4700 m). Anthelme y Dangles (2012) encontraron que, a 4700 m, el 50 % de las especies halladas a lo largo de la gradiente fueron facilitadas por *A. aretioides*, en comparación con sitios a menor elevación (4550 m: 12 % y 4400 m: 25 %). Además, hacia las elevaciones inferiores se perdió el efecto de facilitación y fue reemplazado por procesos de competencia o interacciones neutras en algunas especies de cojines.

Mecanismos de respuesta de las plantas

A pesar de que las especies llegan a ocupar estos refugios, todavía están expuestas a las temperaturas congelantes y la desecación. Esto ha favorecido el desarrollo de una serie de respuestas anatómicas y fisiológicas para sobrellevar las condiciones extremas. Por ejemplo, ciertos mecanismos físicos y químicos permiten a las plantas tolerar o evitar el daño celular provocado por el congelamiento. La tolerancia implica el congelamiento del espacio extracelular, generando estrés hídrico dentro de las células, pero evitando la formación de cristales de hielo. Este mecanismo es común en plantas herbáceas, gramíneas y cojines, siendo las dos últimas las más tolerantes y las que, a su vez, se distribuyen en las zonas más altas de los Andes (Squeo et al., 1991; Rada et al., 2019; Llambí et al., 2021). Este mecanismo también es común en especies de origen geográfico temperado del norte, ya que se desarrollaron para permitirles protegerse del congelamiento durante los largos inviernos en esas zonas. Sin embargo, algunas especies comunes de los Andes, entre ellas *Cerastium* spp., *Gentianella* spp. y *Lupinus* spp., también

presentan este mecanismo. Por otro lado, existen mecanismos físicos para evitar el congelamiento, como son la retención y el recubrimiento con hojas muertas y pubescencia, así como la nictinastia de las hojas que aísla a la planta de las temperaturas congelantes y pospone sus efectos dañinos durante periodos cortos de tiempo (Rada y Azocar, 2006; Rada et al., 2019). Este mecanismo es utilizado por rosetas caulescentes y acaulescentes, árboles y arbustos, que en general se distribuyen en elevaciones más bajas.

Existen otras características funcionales que también definen el grado de exposición que tienen las plantas a las temperaturas extremas de la alta montaña. En particular, las formas de crecimiento juegan un papel fundamental en la respuesta de las especies a la variación térmica y a los extremos en otras condiciones ambientales. En este sentido, la altura de la planta está relacionada con el gradiente térmico que existe desde el suelo hacia la atmósfera, el cual experimenta variaciones menores a medida que se aleja del suelo (Rada et al., 2019). Las especies de baja estatura son las que experimentan temperaturas más variables (por ejemplo, el rango térmico de *Lasiocephalus ovatus* (6 cm) es $-7,4$ a $27,5$ °C, mientras que los arbustos de mayor altura (como *Diplostephium rupestre*, *Chuquiraga jussieui*, *Loricaria antisanensis* y *Pentacalia peruviana*) tienen temperaturas foliares más estables (por ejemplo, el rango térmico de *C. jussieui* (90 cm) es $-6,9$ a 17 °C (Sklenář et al., 2016). Esta relación entre la altura de las plantas y el microclima se ha reportado en los páramos de la cara occidental del Antisana, donde hay una variación térmica mayor, pero es imperceptible en la cara oriental, donde la temperatura de las hojas de todas las formas de crecimiento es más alta que la del aire. De esta manera, la variación en el rango térmico foliar de las plantas contribuye a definir su distribución altitudinal, restringiendo las especies de menor estatura a microclimas más extremos y variables en los flancos más expuestos de las montañas (Sklenář et al., 2016; Squeo et al., 1996).

Estudios a futuro en los superpáramos y las zonas de retroceso glaciar

La mayoría de los estudios sobre las zonas periglaciares se han concentrado en la composición de especies y el monitoreo de los glaciares, con una reciente visión más integral hacia los efectos del deshielo sobre el proceso de sucesión ecológica. Sin embargo, todavía existen vacíos de información fundamentales que deberían ser tomados en cuenta para futuras investigaciones. Entre estos, los más urgentes incluyen:

Extender el monitoreo de glaciares a otras regiones del país para incrementar la comprensión de su respuesta al cambio climático.

- Entender la dinámica de la sucesión primaria en zonas periglaciares de manera comparativa para permitir la definición de las mejores estrategias de manejo adaptativo y conservación para estas comunidades.
- Implementar estudios multitaxones sobre el efecto del cambio climático sobre las interacciones entre especies (como competencia y facilitación).
- Desarrollar estudios acerca de los rasgos funcionales de los organismos que afectan su capacidad para establecerse y competir en los ambientes periglaciares. Por ejemplo, rasgos de hojas como forma, tamaño y pubescencia pueden indicar como las hojas crean un balance térmico y tener una ventaja competitiva.
- Entender el proceso de desarrollo del suelo en zonas de retroceso glaciar para complementar los estudios de sucesión primaria.

La interfase entre los ecosistemas terrestres y los ecosistemas acuáticos

La ecología de los ríos y lagunas que drenan los páramos merecen un apartado que va más allá de las posibilidades de este capítulo y que ha sido ampliamente revisada por Jacobsen (2008) y Jacobsen y Dangles (2017). En general, las comunidades de fauna de los riachuelos de páramo están dominadas por insectos, con muy baja representación de peces nativos. En términos de condiciones ambientales, son sistemas que se caracterizan por las bajas temperaturas del agua, las altas concentraciones de oxígeno y una muy baja estacionalidad. Sin embargo, existen importantes diferencias en la composición y la estructura de las comunidades que están relacionadas con factores como la química del agua y la estacionalidad del flujo asociada con los tipos de drenajes. En los ríos que nacen de los glaciares del Antisana, por ejemplo (Figura 6.8), se han reportado grandes diferencias en la composición y estructura de las comunidades de macroinvertebrados en función de la distancia hasta el glaciar y la elevación (Jacobsen et al., 2014).

No obstante la extensa literatura sobre la ecología de los ecosistemas acuáticos del páramo, existen vacíos importantes acerca de las interacciones entre los ambientes terrestres y acuáticos en zonas de montaña a nivel global (Körner et al., 2022) y, naturalmente, a nivel del trópico (Riveros-Iregui et al., 2018). Estudios recientes han revelado que las quebradas y los ríos de montaña son actores fundamentales en el ciclo global del carbono (Bastviken et al., 2011; Butman y Raymond, 2011; Raymond et al., 2013; Hotchkiss et al., 2015). En particular, los ríos de cabecera han sido el centro de investigaciones recientes



Figura 6.8 El páramo del volcán Antisana con los glaciares, un riachuelo y un humedal.
Fotografía: Patricio Mena-Vásquez

porque conectan los ecosistemas terrestres con los acuáticos, teniendo una mayor proporción de volumen de agua en contacto directo con suelos adyacentes (Benstead y Leigh, 2012; Argerich et al., 2016). Los ríos de cabecera transportan carbono que se ha originado por fotosíntesis en el ecosistema terrestre y lo emiten a la atmósfera desde la superficie acuática en forma de gases de efecto invernadero como el CO_2 y CH_4 , o lo transportan aguas abajo como formas orgánicas, inorgánicas o de partículas disueltas (Battin et al., 2009; Aufdenkampe et al., 2011). Esta transferencia de carbono del ecosistema terrestre al acuático es importante porque los ríos de cabecera comprenden más del 80 % de la longitud total de todos los canales perennes (Vannote et al., 1980; Downing et al., 2012; Allen et al., 2018); investigaciones recientes sugieren que el área superficial de estas corrientes es mucho mayor de lo que se pensaba anteriormente, particularmente en áreas con densas redes hídricas como la cuenca andino-amazónica, donde la superficie acuática de la red hídrica se ha subestimado hasta en un 67 % (Allen y Pavelsky, 2018).

Si bien la importancia de los ríos de cabecera en el ciclo global del carbono parece justificada hoy en día, las emisiones naturales de CO_2 y CH_4 de este tipo de cuencas hidrográficas están pobremente caracterizadas. Por ejemplo, los estudios que cuantifican flujos de CO_2 de superficies acuáticas se centran tradicionalmente en un solo sistema (es decir, humedales, ríos o lagos), manteniendo la larga tradición de separación intelectual entre las disciplinas que estudian lagos, ríos y humedales (Stanley y del Giorgio, 2018). El resultado es un claro desconocimiento del funcionamiento de los diferentes sistemas acuáticos y de la interfase entre ecosistemas terrestres y acuáticos, o de cómo los procesos hidrológicos afectan el flujo de carbono desde los sistemas terrestres hasta los cuerpos de agua. Hotchkiss et al. (2015) sugieren que, a escala continental, el papel relativo de los ríos como conductos para la salida de CO_2 terrestre depende de su tamaño, así como de su conectividad con el paisaje. Además, el mismo estudio sugiere que, para algunos ríos, la conectividad hidrológica entre ellos y las llanuras aluviales podría ser más importante que la magnitud del mismo caudal, el orden de los ríos u otras variables basadas en el tamaño. A escala de cuencas individuales, se sabe que la conectividad entre las corrientes y el suelo circundante controla el transporte de carbono disuelto hacia el río (Pacific et al., 2010). No obstante, la manera en que la conectividad hidrológica modula las emisiones totales de los gases de efecto invernadero en múltiples elementos del paisaje (es decir, en zonas altas, llanuras aluviales, humedales o arroyos) aún no está bien caracterizada.

Algunas observaciones recientes sugieren que la conectividad hidrológica entre ecosistemas terrestres y acuáticos puede ser el control principal sobre la magnitud y la forma del carbono desde diferentes puntos del paisaje. De hecho, al aumentar la humedad de suelo se promueve la generación y emisión de CO_2 de las zonas altas del paisaje, pero esta se reduce en las zonas de transición o en zonas bajas y humedales donde la respiración microbiana está limitada por la falta de oxígeno en zonas saturadas (Riveros-Iregui et al., 2012). Por el contrario, al disminuir la humedad de suelo aumenta la salida de CO_2 de las zonas bajas del paisaje o de los humedales al reducir la saturación y aumentar el oxígeno, pero se reducen la conectividad hidrológica y la transferencia de materia y energía desde el ambiente terrestre hacia el acuático (Senar et al., 2018). Al mismo tiempo, una mayor humedad en el suelo limita la salida de CO_2 , pero favorece la generación de CH_4 , el cual es mucho más potente en su efecto invernadero (Huttunen et al., 2003). Frecuentemente el CH_4 se emite en cantidades mayores que el CO_2 cuando el nivel freático alcanza la superficie del suelo o está muy cerca de ella (Wieder et al., 2006), y la magnitud de las emisiones de CH_4 varía con la fluctuación del nivel freático, particularmente en suelos ricos en carbono (Kellner et al., 2005; Couwenberg y Fritz, 2012).

Recientemente se ha demostrado que los ríos de páramo pueden tener un papel importante en la dinámica regional de carbono, algo que no había sido descrito anteriormente. Estos ríos de cabecera pueden emitir cantidades de CO_2 significativamente más grandes que los flujos desde los ecosistemas terrestres adyacentes, pero a través de patrones espacial y temporalmente complejos que dependen de factores ambientales como las características del flujo, la turbulencia y la velocidad del agua, y la disponibilidad de CO_2 disuelto proveniente desde los ecosistemas terrestres o las turberas (Schneider et al., 2020; Whitmore et al., 2021). Así, los riachuelos de páramo y su hidrología deben ser incorporados como un elemento esencial no solo desde el punto de vista hidrológico, sino también desde su rol como integradores de muchos procesos ecológicos a escala de cuenca.

La entrada de luz a los riachuelos de páramo es otra variable que fluctúa enormemente a escalas espaciales muy pequeñas, dependiendo del tipo de vegetación que los rodea y de la forma del canal. En ríos pequeños de cabecera, los pajonales pueden llegar a cubrir completamente el cauce, limitando las redes tróficas a fuentes de energía autóctonas (originadas a una distancia de la posición actual). Por otro lado, la compleja historia de vida de muchos macroinvertebrados, con larvas acuáticas y fases adultas terrestres, implica que deben existir importantes flujos de materia orgánica y energía ensamblados a través de redes tróficas que se solapan sobre estos ecosistemas. La magnitud de estos subsidios cruzados y como varían de acuerdo con las condiciones ambientales del páramo aún no han sido analizadas.

Tanto los ecosistemas acuáticos del páramo, como su interfase con los ambientes terrestres están amenazados por varias actividades antropogénicas entre las que se destacan la introducción de especies exóticas como la trucha (Vimos et al., 2015), la extracción de agua (total en muchos casos) (Rosero-López et al., 2022), la contaminación (Araújo et al., 2014), y el cambio climático. Aunque aún se necesita mucha información adicional en relación con este último factor, estudios fisiológicos y ecológicos sugieren que algunos organismos acuáticos de los ecosistemas de páramo podrían tener una mayor tolerancia a los impactos del cambio climático, en comparación con organismos de zonas bajas, especialmente porque están adaptados a los amplios rangos diarios de temperatura que caracterizan a las altas montañas tropicales (Shah et al., 2017). Sin embargo, esta mayor tolerancia no es homogénea entre los grupos y se ha demostrado que el incremento de la temperatura del agua podría afectar diferencialmente a insectos acuáticos, directamente mediante incremento de la mortalidad, o a través de efectos subletales mediados por cambios en los patrones de crecimiento.

Conclusiones

Más allá de la descripción individual de los tipos de ecosistemas presentes en el páramo del Ecuador, en este capítulo hemos querido resaltar una visión del páramo como un bioma, formado por múltiples ecosistemas que interactúan en el paisaje altoandino. Cada uno de estos tipos de ecosistemas tienen características estructurales y funcionales distintas, y en algunos casos están expuestos a amenazas antropogénicas diferentes. Por ejemplo, los incendios y la ganadería extensiva que afecta mayormente a los pajonales no influyen significativamente sobre las zonas periglaciares o sobre las turberas de páramo, mientras que el corte de drenajes y la extracción de turba afectan únicamente a estas últimas. De igual manera, la extracción de leña y la ampliación de la frontera agrícola normalmente están limitadas a las partes más bajas del páramo (línea arbórea, bosques de *Polylepis* y pajonales) que colindan con las áreas de ocupación humana. Desde esta perspectiva, creemos que esta visión de los páramos, desde el punto de vista de sus grandes tipos de ecosistema, no solo ofrece una visión más integradora del paisaje, sino que podría ser más informativa y útil para generar procesos de conservación y restauración.

En términos generales, la investigación y el manejo de los ecosistemas de páramo en el Ecuador se ha enfocado en los pajonales o en las zonas arbustivas y, en algunos casos, en los bosques de *Polylepis*. Este énfasis quizás se puede explicar por la gran extensión de los pajonales (la formación vegetal más extendida en los páramos ecuatorianos), y por la distintiva estructura y diversidad de los bosques de *Polylepis*. Sin embargo, el énfasis de la investigación en estas dos formaciones ha tenido dos consecuencias importantes. Por un lado, este enfoque tiende a enmascarar la diversidad ambiental de los páramos. Más allá de como un ecosistema abierto de pajonales, el páramo puede ser entendido como un mosaico de formaciones vegetales (pajonales, chaparros, turberas, bosques, zonas periglaciares) que no solo se diferencian en la composición de sus comunidades, sino que pueden tener patrones ecológicos y ecosistémicos fundamentalmente diferentes. En el caso del carbono almacenado en el suelo, por ejemplo, los valores típicos pueden variar entre 100 a 200 MgC ha⁻¹ en los suelos bien drenados de los pajonales, hasta más de 3000 MgC ha⁻¹ en las turberas. De igual manera, la diversidad de especies varía ampliamente entre los tipos de vegetación, dando lugar a redes tróficas notablemente diferentes.

Por otro lado, el énfasis limitado de la investigación en ecosistemas terrestres de páramo nos impide manejarlos de manera más eficiente. Por ejemplo, la literatura sobre los impactos antropogénicos en el páramo ecuatoriano está fuertemente sesgada hacia el estudio de los impactos de las quemadas, la agricultura

y la forestación, que afectan principalmente a los pajonales. Sin embargo, esta inclinación ha dejado de lado la evaluación de otros impactos que son más específicos, como la extracción de leña y los cambios en el uso del suelo que afectan a los bosques de *Polylepis*, o el drenaje y la desecación que afectan a las turberas. Desde esta perspectiva, esta revisión sugiere que un manejo más efectivo del páramo requerirá que lo miremos como un paisaje complejo e integrado por múltiples ecosistemas.

Este cambio de visión que proponemos aquí tiene varias implicaciones en términos de manejo y conservación.

Primero, requiere que comprendamos mejor la distribución, la estructura y el funcionamiento de estos ecosistemas, enfatizando en la exploración de las similitudes y las diferencias que deberían incorporarse para guiar el manejo del paisaje del páramo.

Segundo, se necesita mucha más investigación acerca de las interacciones entre estos ecosistemas y sobre cómo estas interacciones influyen sobre la capacidad del paisaje para proveer servicios ecosistémicos muy importantes. Por ejemplo, necesitamos comprender cómo estos ecosistemas se distribuyen a escala de cuenca y de paisaje, y cómo esa distribución afecta al almacenamiento de carbono y la regulación hídrica.

Y tercero, será esencial que los esquemas de conservación, manejo o restauración incorporen la idea de páramo como un paisaje con múltiples ecosistemas que funcionan y responden de diferente manera a las actividades antropogénicas y a los esfuerzos por mitigar sus efectos negativos.

CAPÍTULO 7

EL PÁRAMO ECUATORIANO: LA LEY QUE TENEMOS Y LA QUE DEBERÍAMOS TENER

Mónica Ribadeneira Sarmiento

Vista de la cordillera desde el Guagua Pichincha.
Fotografía: Robert Hofstede



Resumen

Desde las generalidades legales hasta el resumen de las iniciativas contemporáneas, este capítulo presenta el régimen aplicable a los páramos ecuatorianos. Se analizan los Convenios Ambientales multilaterales y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). El nivel internacional se complementa con el estudio constitucional y legal de la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, el Código Orgánico Ambiental y la Ley Orgánica de Tierras, y sus respectivos reglamentos. Además de su protección constitucional como uno de los ecosistemas frágiles, los páramos del Ecuador cuentan por decisión legislativa desde el 2019 con un día nacional en su honor (23 de junio).

Los instrumentos legales protegen y promueven el uso sostenible de los páramos y especialmente reconocen su servicio ambiental más evidente, la producción de agua; sin embargo, no son suficientes. Ello es debido a que ninguna ley arregla un problema intersectorial, resuelve la debilidad institucional, ni reemplaza a la voluntad política. Por ello, el capítulo presenta algunas reflexiones sobre la ley que deberíamos tener para proteger y usar sosteniblemente el páramo, pero también para atender sus problemas estructurales, especialmente su flanco más débil: los aspectos sociales, con la destacable mención de la imperiosa necesidad de aliviar la pobreza de sus olvidados y desatendidos habitantes.

El capítulo destaca entre los elementos del deber ser en el páramo la atención a los problemas de la inseguridad de la tenencia de la tierra y la necesidad de incluir espacios de participación para la sociedad civil; ello podría ser a través de recuperar iniciativas como el Grupo de Trabajo en Páramos del Ecuador (GTP), como prueba del reconocimiento del poder ejecutivo de que la pérdida de aliados de la sociedad civil no fortalece el rol de las autoridades, sino que lo debilita y les resta aliados técnicos.

Actualmente existen una iniciativa legislativa y otra ejecutiva relativas a los páramos. El Proyecto de Ley Orgánica de Justicia y Protección Integral para los Páramos fue presentado en la Asamblea Nacional en diciembre de 2021. Actualmente, el proyecto se encuentra en trámite y su conclusión dependerá de la voluntad y agenda legislativas. El Plan de Acción Nacional para la Conservación, Restauración y Uso Sostenible de los Páramos fue dispuesto por la declaratoria legislativa del 2019 antes mencionada y actualmente, tras un proceso de elaboración interna y validación de actores externos se encuentra *ad portas* de su formalización.

Summary

From legal generalities to a summary of contemporary initiatives, this chapter presents the regime applicable to Ecuador's páramos. It analyses multilateral environmental agreements, as well as the Sustainable Development Goals (SDGs). The international level is complemented with the constitutional and legal study of Ecuador's Organic Law on Water Resources, the Organic Environmental Code and the Organic Law on Land, and their respective regulations. In addition to their constitutional protection as one of the fragile ecosystems, Ecuador's páramos have, by legislative decision since 2019, a national day in their honour (23 June).

While the legal instruments that protect and promote the sustainable use of the páramos and especially recognise their most evident environmental service, the production of water, they are not sufficient. This is because no law fixes an intersectoral problem, never solves institutional weaknesses and never replaces political will. Therefore, the chapter presents some reflections on the law we should have to protect and sustainably use the páramo, but also to address its structural problems, especially its weakest flank: the social aspects, with the noteworthy mention of the imperative need to alleviate the poverty of its forgotten and neglected inhabitants.

This chapter highlights the need to address land tenure insecurity and the need for the participation of civil society. This could be done through initiatives such as the Páramo Working Group (GTP), as proof of the executive branch's recognition that the loss of civil society allies does not strengthen the role of the authorities, but rather weakens them and deprives them of technical allies.

Currently, there are one legislative and one executive initiative concerning the páramos. The Draft Organic Law on Justice and Integral Protection for the Páramos was presented to the National Assembly in December 2021 and is currently being processed and its conclusion will depend on the legislative will and agenda. The National Action Plan for the Conservation, Restoration and Sustainable Use of the Páramos, was mandated by the aforementioned 2019 legislative declaration and, after a process of internal elaboration and validation by external actors, is currently on the verge of being formalized.

Introducción

Los instrumentos legales son eso, instrumentos; así, sus virtudes y defectos dependen en gran medida de su aplicación y esta a su vez de las autoridades de ejecución. Leyes y autoridades tienen limitaciones para incluir a cabalidad aspectos sociales y ambientales particulares como los que requieren los páramos ecuatorianos.

Cuando la ley regula el comportamiento humano y lo limita a determinadas conductas o actividades, uno de sus propósitos es proteger bienes y recursos, para lo cual caben incluso las prohibiciones. En este capítulo se presentan los instrumentos legales que se refieren a los mandamientos, posibilidades y prohibiciones relativos a los páramos en el Ecuador.

También se incluye un análisis sobre dos iniciativas legales actualmente en marcha que son evidencia del interés normativo que últimamente han generado los páramos: un proyecto de ley y un plan de acción ministerial.

Generalidades legales

La primera nota que cabe es sobre la jerarquía normativa, es decir, el principio que supone que unas normas se subordinan a otras como consecuencia de sus diferentes rangos y entre todas las cuales existe y se mantiene un escalafón. Esta afirmación, que puede parecer una obviedad, es uno de los motivos más frecuentes de conflictos legales; cuando no se respeta el nivel al que corresponde una norma se la interpreta o aplica como superior o inferior, se trastorna y distorsiona la jerarquía legal. Otro conflicto evidente es la falta de aplicación o la aplicación parcial.

Debido a la facilidad y popularidad del esquema gráfico que planteó Kelsen (1881-1973), se olvida en ocasiones que no solo la jerarquía de las normas difiere, sino también el contenido de los instrumentos legales. En este esquema, la constitución se encuentra en la cúspide de una pirámide formada por instrumentos de menor nivel. En la Constitución, las normas son principalmente garantías; en la ley deben ser mandatos, permisos y prohibiciones;¹ para los reglamentos y otras normas quedan las instrucciones, los requisitos y los procedimientos.

Al llevar el enfoque teórico de la jerarquía y contenido de los instrumentos legales a los páramos, la Constitución debería garantizar su conservación, idealmente por sus propios méritos y no solo por ser el ecosistema en que se producen y conservan los recursos hídricos. En el siguiente nivel, ya sea un tratado internacional o directamente la ley nacional, se debería definir qué es un páramo

¹ Código Civil. Título Preliminar: Parágrafo 1.º. De la Ley. Artículo 1.

y especialmente enlistarse las actividades autorizadas, posibles y prohibidas en él. En el caso ecuatoriano sucede como consta en la Figura 7.1.

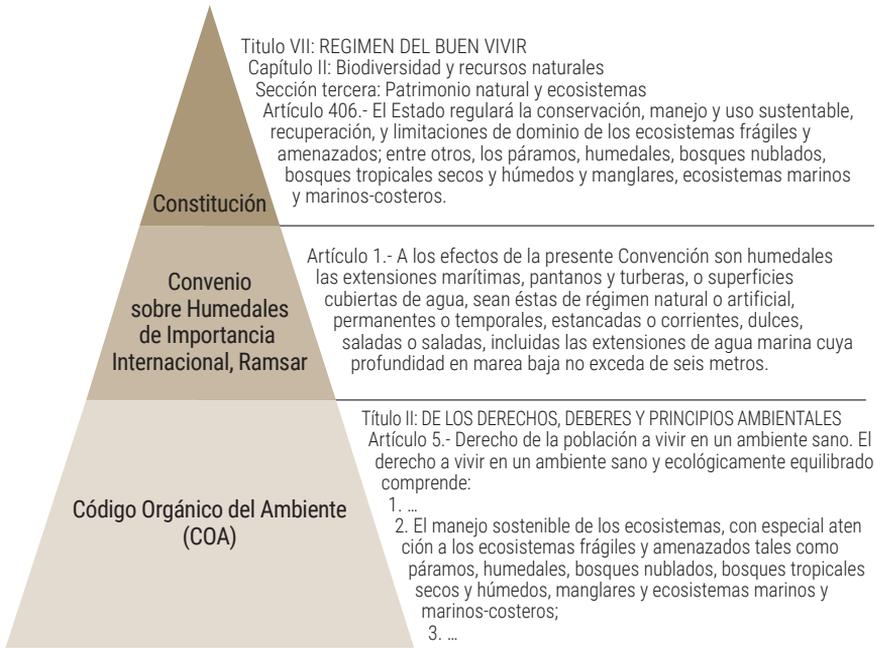


Figura 7.1 Ejemplos de disposiciones aplicables al páramo en la Constitución, Convenio de Ramsar y Código Orgánico Ambiental (COA).

La disposición de la Constitución sobre ‘ecosistemas frágiles’ (los páramos entre ellos) debería ser suficiente para su protección debido a su rango constitucional, es decir, del más alto nivel. La carta magna tiene muchas otras garantías relacionadas con el páramo desde el reconocimiento de los derechos de la naturaleza (Constitución de la República, 2008 del Ecuador, cap. VII, art. 71), pasando por el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y en equilibrio (Cap. II, art. 14; cap. VI, art. 66), hasta las normas relativas al beneficio ambiental (Cap. VII, art. 74) y al agua. En la práctica, esta protección no se aplica de modo absoluto y por ello los páramos nacionales enfrentan problemas e indefensión legal.

Debido a la importancia de los páramos, desde 2019 existe un día nacional en su honor, determinado en una resolución legislativa (Asamblea Nacional del Ecuador, RL-2019-2021-097); misma que es el antecedente del Plan de Acción Nacional para la Conservación y Uso Sostenible de los Páramos sobre la que se profundiza en la última sección de este capítulo.

Los páramos y la ley que tenemos

Instrumentos Internacionales

Todos los instrumentos internacionales que se analizan a continuación tienen una estructura similar de generación y de aplicación, salvo los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Los instrumentos legales internacionales fueron generados en cumbres y reuniones internacionales, generalmente denominadas convenciones. En ellas los países negociaron el texto final del instrumento que dependiendo del grado de obligatoriedad cambia de denominación: si se trata de un documento legalmente vinculante que permite modificaciones y enmiendas al texto principal puede tratarse de un protocolo o tratado (por ejemplo el Protocolo de Kioto o el Tratado Internacional sobre los Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura); también existen compromisos internacionales denominados convenios, como los que se analizan en este apartado. Estos convenios son obligatorios para los países que adoptan y ratifican oficialmente su texto a nivel nacional, a partir de lo cual existen obligación de acción, reporte oficial y monitoreo, y seguimiento del cumplimiento de las obligaciones de los países; esto último generalmente se efectúa con apoyo de una secretaría internacional y de reuniones periódicas de los países que se denominan conferencia de las partes (COP por sus siglas en inglés).

Por otro lado, los ODS son un documento internacional blando como se profundizará más adelante y al ser metas a nivel global que orientan políticas públicas no requieren de instrumento legal de ratificación nacional, aunque sí existe reporte de avance.

Convención² sobre los humedales de Importancia Internacional, especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas (1971)

De la conferencia reunida en la ciudad de Ramsar (Irán) en 1971 resultó el instrumento también conocido como la Convención de Ramsar (Registro Oficial 33, 1992), cuyo texto original fue modificado el 3 de diciembre de 1982 y promulgado en el Ecuador en 1992.

La Convención de Ramsar (1992) define las zonas que se consideran humedales y requiere que estas sean descritas y delimitadas para ser incluidas en la Lista de Humedales de Importancia Internacional. Los países signatarios pueden agregar a esta lista nuevos sitios, extender sus límites o eliminarlos.

² *Stricto sensu* convenio es el instrumento legal y convención la reunión en que se acuerda el primero; se suelen usar indistintamente. Aquí, se sigue la traducción formal usada por los secretariados de las convenciones.

Este instrumento tiene un aspecto singular que es proteger los humedales por su relación con la fauna (acuática, concretamente aves) y no por sí misma, ello permite que pueda actuar en conjunto con otros instrumentos legales (por ejemplo, las declaratorias de áreas protegidas, planes de ordenamiento, reglamentos de uso, entre otros) y con otros instrumentos de gestión (por ejemplo, los planes de manejo y zonificaciones específicas como la costera).

Desde sus inicios, la Convención de Ramsar definió a los humedales (Convención de Ramsar, art. 1), y en 2002 reconoció la importancia de los páramos a través de la Resolución VII.39 sobre Los Humedales Altoandinos como Ecosistemas Estratégicos (Convención de Ramsar, 2002, resolución VIII.39).

Al momento, en el Ecuador la lista de sitios Ramsar (2000) localizados en el páramo son:

- Reserva Ecológica El Ángel
- Sistema Lacustre Yacuri
- Sistema Lacustre del Compadre
- Parque Nacional Cajas
- Complejo Llanganati
- Complejo de Humedales Ñucanchi Turubamba.

Convenio sobre la Diversidad Biológica (1992)

El Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) reconoce el aporte vital de la diversidad biológica en el desarrollo económico y social de la humanidad. Nació en la Conferencia de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo, también conocida como la Cumbre para la Tierra, que se celebró en Río de Janeiro de 1992; el CDB entró en vigor el 29 de diciembre de 1993. El CDB establece derechos soberanos para los países en donde se encuentran los recursos de la diversidad biológica que antes eran considerados como “patrimonio de la humanidad de libre acceso”. El CDB cambió la tradición legal internacional al introducir una aproximación que concilia la necesidad de la conservación con el desarrollo y propone consideraciones de equidad y de responsabilidad compartida. Esta modificación permitió: reconocer a la diversidad biológica un valor estratégico; regular su apropiación, acceso y uso; y negociar adecuadamente la distribución de beneficios derivados de su uso. Estos tres objetivos están estrechamente interrelacionados y reconocen que no habrá recursos biológicos ni genéticos disponibles a menos que se conserven adecuadamente, lo cual requiere su uso sostenible (CDB, art. 1). Estos son la conservación de la diversidad biológica; el uso sustentable de sus recursos y desde sus objetivos; y la distribución justa y equitativa de beneficios del acceso a los recursos genéticos.

El CDB brinda un marco internacional para la conservación y el uso sostenible de los ecosistemas (el páramo entre ellos) porque favorece la formación y consecución de compromisos de la comunidad con ambos fines. El texto de CDB también es propicio para reconocer la riqueza cultural y natural de los páramos, así como la necesidad de que su manejo sea estratégico.

El texto de CDB es apropiado para alentar iniciativas que, reconociendo la diversidad biológica, permitan usar y aprovechar los valores ecológicos, genéticos, sociales, económicos, científicos, educativos, culturales, recreativos y estéticos del páramo. De otro lado, siendo el páramo el escenario de variados usos, el CDB permite trabajar en ellos con un enfoque de conectividad bajo la guía de los objetivos del CDB y de esta forma enlazar áreas de páramo que ostentan protección y una categoría de manejo (nacional o internacional) con páramos en los que existe un uso humano más intenso.

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (1992)

Nacido también en la Conferencia de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo, o Cumbre para la Tierra, que se celebró en Río de Janeiro de 1992, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) es un instrumento legal que tiene por objetivo la regulación de los niveles de concentración de gases de tipo efecto invernadero en la atmósfera, para evitar que los cambios resultados del incremento del clima atenten contra temas estratégicos globales como la disponibilidad y producción de alimentos.

Hay temas claves en esta convención como sus principios orientadores que incluyen la necesidad de cooperación internacional y la asistencia adecuada a los países en desarrollo para proteger el equilibrio climático para las generaciones presentes y futuras.

Varios de los compromisos que emergen de este instrumento legal tienen relación con los páramos: uno de ellos es la disposición relativa a formular y ejecutar programas para el control del cambio climático; siendo los páramos ecosistemas particularmente sensibles al cambio climático, constituyen escenario ideal para dichas acciones. Igual sucede con la obligación de incorporar políticas adecuadas para el control del cambio climático en los instrumentos de planificación nacional, así como en la necesidad de contar con políticas de educación y capacitación que aumenten la conciencia pública en relación con el cambio climático. Estas dos últimas obligaciones deben hacerse efectivas en los planes de conservación y uso sostenible de los páramos que, como se verá más adelante, determinan para los casos de páramos intervenidos con actividades agrarias el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca

(MAGAP) definirá el instrumento de manejo bajo los lineamientos del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), y para los páramos no intervenidos será el MAATE el que coordinará con el GAD del nivel que corresponda (Código Orgánico Ambiental, art. 101).

Con la aceptación del Acuerdo de París para la CMNUCC (2015), todos los países reconocen su corresponsabilidad en reducir emisiones y adaptarse a los efectos del cambio climático. Para ello, cada país elabora su documento de Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) que encarnan los esfuerzos del país para reducir las emisiones nacionales y adaptarse a los efectos del cambio climático. Ecuador presentó su primera NDC en el 2019.³

Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (1992)

La convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación es el tercer instrumento legal alumbrado en Río de Janeiro de 1992 en el marco de la Convención para la Tierra o Conferencia de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo. Su objetivo primordial es prevenir y reducir los efectos de la degradación de la tierra a través de medidas técnicas que resulten de acuerdos de cooperación, asistencia y asociación internacionales.

A escala global, los procesos de desertificación se han agravado por las variaciones climáticas; preocupa que suceda en ecosistemas de alta vulnerabilidad como los páramos, en los que, además, por sobreexplotación y uso inadecuado de las tierras por deforestación, pastoreo excesivo y malas prácticas de riego se deteriora la productividad de la tierra.

La convención determina medidas que pueden promover el desarrollo integrado de las tierras de las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas para prevenir y reducir la degradación de las tierras, rehabilitar las tierras parcialmente deterioradas y restaurar las tierras desérticas. En vista que el convenio se aplica a través de programas de acción nacionales, subregionales y regionales, existe gran enlace con la gestión de los páramos que, como se verá al analizar los instrumentos nacionales, se rige por lineamientos de los ministerios de Agricultura y Ambiente (dependiendo del tipo de intervención del páramo) (República del Ecuador, NDC, 2019), pero se aplica a nivel subnacional por los GAD provinciales, metropolitanos, municipales y parroquiales.

Otro aspecto de convergencia entre esta convención y los páramos son las comunidades locales; este instrumento legal reconoce su papel clave para la formulación y la ejecución de programas de acción e intervención. Como se analiza

³ <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Primera%20NDC%20Ecuador.pdf>

en otros capítulos de este libro, el rol de los actores locales es clave para la conservación y el uso sostenible de los páramos. Un tercer aspecto de encuentro entre los páramos y este instrumento internacional es el papel que se espera desempeñe la cooperación internacional entre países desarrollados y países en desarrollo; se espera que los países afectados por la desertificación puedan crear un entorno propicio para que las propias poblaciones locales puedan incrementar su resiliencia, y contrarresten los procesos de degradación de las tierras.

Objetivos de Desarrollo Sostenible (2015)

En 2015, la Asamblea General de las Naciones Unidas decidió 17 metas globales que deben ejecutarse en el periodo 2015-2030 y que dan continuidad a los antiguos Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM). Estos se centran en una agenda social, en tanto que los nuevos ODS abordan temas transversales del desarrollo sostenible como el género, el crecimiento económico y la inclusión social. En tal sentido, son metas de políticas públicas a nivel global que orientan acciones de todos los actores (gobiernos, instituciones, comunidades y empresas, entre otros) para proteger el planeta y erradicar la pobreza y asegurar la prosperidad y bienestar.

Evidentemente, el principal ODS relativo a los páramos es el dedicado al agua limpia y al saneamiento; aunque también mantiene conexión con los ODS dedicados a la salud y bienestar, la acción por el clima, y la vida de los ecosistemas terrestres. Indirectamente, al considerar al páramo como ecosistema clave para la regulación hídrica se puede identificar relación con el fin de la pobreza, el hambre cero, las ciudades y comunidades sostenibles, y la producción y consumo responsables.

Por ser un instrumento de tipo programático más que legal, los ODS no tienen la estructura de los otros convenios analizados en este apartado (secretaría y conferencia de países miembros, por ejemplo). Para verificar el avance y cumplimiento de los ODS, se trabaja vía revisiones periódicas a nivel nacional y subnacional tal como estipula en la Agenda 2030; el último informe del Ecuador data de 2019 (SENPLADES, 2022).

Instrumentos regionales

Acuerdo Regional sobre el Acceso a la Información, la Participación Pública y el Acceso a la Justicia en Asuntos Ambientales en América Latina y el Caribe (2018)

Este instrumento, también conocido como Acuerdo de Escazú por la ciudad en que se adoptó, es el último hito global en materia de la participación de la sociedad civil en el desarrollo sostenible. Debido a su carácter regional concede gran

importancia a los estándares a ese nivel, a la promoción y creación de capacidades, especialmente a través de la cooperación sur-sur. Debido a la edad del acuerdo y al escaso tiempo de implementación que ha transcurrido es poco lo que se puede decir de su funcionamiento; sin embargo, se hace constar que establece una estructura institucional de apoyo y que ofrece algunas herramientas enfocadas en la formulación de políticas y la toma de decisiones.

De momento, no hay una acción concreta de vinculación entre este instrumento y los páramos de la región; sin embargo, es notable lo promisorio de su texto como marco de acciones de conservación y uso sostenible de los páramos; ello porque este acuerdo tiene por objeto luchar contra la desigualdad y la discriminación y garantizar los derechos de las personas a un ambiente sano, con especial atención a las personas y grupos en situación de vulnerabilidad, características todas ellas presentes en las poblaciones de los páramos. Es indiscutible que para garantizar la conservación y uso sostenible de los páramos a la par de los derechos ambientales de las poblaciones locales, los países de la región que cuenten con este ecosistema encuentran en el texto del Acuerdo de Escazú un marco de actuación coordinada a nivel regional que pone la creación de capacidades y la cooperación entre iguales al servicio de este ecosistema.

Instrumentos nacionales

Los estudios legales tradicionalmente enumeran los instrumentos y explican su contenido; sin embargo, en ocasiones ello no permite entender los conflictos y especialmente las limitaciones de estos instrumentos. Por ejemplo, la lista cronológica de los instrumentos legales aplicables al páramo sería: Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (2014); Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales (2016); Código Orgánico del Ambiente (2017); Constitución de la República del Ecuador (2008).

Sin embargo, esta lista por sí sola no evidencia que la primera y la segunda ley contaron con reglamentos de aplicación un año después de su promulgación y que el reglamento para el COA requirió de dos años. Más importante aún es que las garantías constitucionales de carácter ambiental vigentes desde el 2008 permanecieron casi una década sin desarrollo hasta que el COA las normó. Si a este desfase temporal le agregamos la actual iniciativa legislativa (proyecto de Ley Orgánica de Justicia y Protección Integral para los Páramos, sección final de este capítulo) se obtendría un gráfico como el de la Figura 7.2.

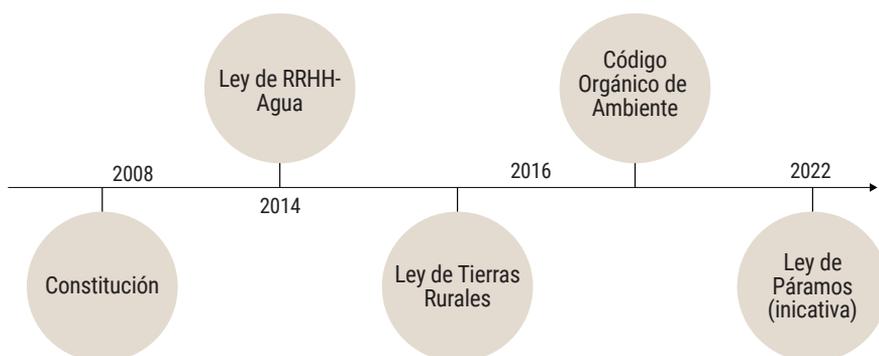


Figura 7.2 Cronología del régimen legal aplicable a los páramos en el Ecuador.

Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (2014)

La Ley Orgánica de Recursos Hídricos y su reglamento fueron declarados inconstitucionales por la forma en 2022 mediante sentencia 45-15-IN/22 de la Corte Constitucional. Esta sentencia da plazo de un año a partir de su publicación para que se elabore una nueva ley (actualmente el proyecto está en elaboración) y también establece que la ley y su reglamento estarán vigentes hasta que se apruebe la nueva. Con independencia de la declaratoria de inconstitucional, a continuación, se presenta el análisis del cuerpo legal vigente.

La Ley de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua califica al agua como patrimonio nacional estratégico de uso público, de dominio inalienable, imprescriptible e inembargable, elemento vital de la naturaleza y fundamental para garantizar la soberanía alimentaria.

Esta ley garantiza el derecho humano al agua; además, regula y controla la gestión integral, preservación, conservación, y restauración de los recursos hídricos, su uso y aprovechamiento. Esta ley establece que los recursos hídricos son parte del patrimonio estatal y que su competencia exclusiva se ejercerá concurrentemente entre el gobierno central y los gobiernos autónomos descentralizados (GAD).

Si bien esta ley no define claramente a los páramos (Ley de Recursos Hídricos, Uso y Aprovechamiento del Agua, 2014, art. 8), hay varias disposiciones relativas a este ecosistema que lo mencionan directamente (Tabla 7.1).

Tabla 7.1 Principales disposiciones relativas al páramo de la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua.

Artículo	Contenido
12	<p data-bbox="322 389 937 414">Establece la protección, recuperación y conservación de fuentes.</p> <p data-bbox="322 442 1078 547">Reconoce la corresponsabilidad en la protección, recuperación y conservación de las fuentes de agua y del manejo de páramos del Estado, los sistemas comunitarios, las juntas de agua potable y las de riego, los consumidores y usuarios. Igualmente garantiza la participación de estos actores en su uso.</p>
36	<p data-bbox="322 564 1074 644">Define que el Estado y sus instituciones en el ámbito de sus competencias son los responsables de la gestión integrada de los recursos hídricos de las cuencas hidrográficas.</p> <p data-bbox="322 671 1034 751">Ello implica que estas autoridades están obligadas a conservar y manejar sustentablemente los ecosistemas altoandinos, en especial los páramos, los humedales y cualquier ecosistema que almacene agua.</p>
64	<p data-bbox="322 764 1072 869">Establece que la naturaleza tiene derecho a que se respeten sus fuentes de agua y sus zonas de captación, regulación, recarga y afloramiento, así como los cauces naturales del agua, en particular, los nevados, los glaciares, los páramos y humedales.</p>

La Ley de Recursos Hídricos crea el Sistema Nacional Estratégico del Agua bajo el liderazgo de la Autoridad Única del Agua. Esta es la responsable de la gestión con enfoque ecosistémico y por cuenca o sistemas de cuencas hidrográficas, y deberá coordinar con otros niveles de gobierno según sus competencias. También es la responsable del Plan Nacional de Recursos Hídricos y por la aprobación de los planes de gestión integral de recursos hídricos por cuenca hidrográfica como base de la planificación hídrica nacional. La ley repite la declaración de la Constitución de que el derecho humano al agua es fundamental e irrenunciable, y que ninguna persona puede ser privada, excluida o despojada de él.

Consecuencia de lo anterior es la prohibición de la privatización del agua y de cualquier forma de apropiación o de posesión sobre esta. Incluye una serie de prohibiciones que le dan un marcado sentido antiprivatización. Declara que la prestación es exclusivamente pública o comunitaria y que solo por excepción hay espacio para la participación de la iniciativa privada y de la economía popular y solidaria. Las excepciones son solo dos: la declaratoria de emergencia de autoridad competente; y el desarrollo de subprocesos cuando la autoridad no tenga condiciones técnicas o financieras; ello podrá ser máximo por 10 años. La ley establece que las formas de protección del dominio hídrico público (singularmente de las fuentes de agua) son servidumbres de uso público; zonas de protección hídrica; y zonas de restricción.

La Ley de Recursos Hídricos determina que las Juntas (que son organizaciones comunitarias sin fin de lucro) se encuentran bajo la Autoridad Única del Agua a la que deben solicitar autorizaciones y entregar información (Ley de Recursos Hídricos, Uso y Aprovechamiento del Agua, 2014, art. 47). A las comunas, comunidades, pueblos y nacionalidades indígenas, pueblo afroecuatoriano y montubio, la ley les reconoce derechos colectivos sobre el agua y respeto a los sistemas y prácticas de la gestión comunitaria (Ley de Recursos Hídricos, Uso y Aprovechamiento del Agua, 2014, art. 48).

Reglamento a la Ley de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (2015)



Figura 7.3 Autoridades del Sistema Nacional Estratégico del Agua.

Este reglamento desarrolla el Sistema Nacional Estratégico del Agua creado en la ley (Figura 7.3). Cuando se promulgó la actual ley y su reglamento, la autoridad nacional de agua era la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA). La SENAGUA fue fusionada con el Ministerio del Ambiente en el 2020 para formar el Ministerio de Ambiente y Agua (MAAE; actualmente MAATE).⁴

⁴ El 4 de marzo de 2020, mediante el Decreto Ejecutivo N°1007, se fusionó al entonces MAE y a la Secretaría Nacional del Agua (Senagua) creando el Ministerio de Ambiente y Agua; que más tarde se denominó Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica.

En materia de las atribuciones de los GAD, existen enlaces con las competencias del Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD) para los consejos regionales (Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización, 2019 art. 34, lit. h) y para los GAD municipales (art. 55, lit. d). Este instrumento clasifica al agua entre los sectores (art. 111). El COOTAD determina también los niveles de gestión para las cuencas hidrográficas (art. 132), así como las normas sobre riego rural (art. 134) y gestión ambiental (art. 134).

Este instrumento legal reconoce los dos destinos clásicos del agua: consumo humano, riego, aunque no establece condiciones especiales para ninguno de estos usos cuando se efectúe en el páramo. Este reglamento contiene 2 disposiciones relacionadas con las aguas que circulan por los cauces y los ecosistemas asociados, para cuya protección establece una zona de protección hídrica en la que se condicionarán el uso del suelo y las actividades (Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua, art. 63). Esta zona de protección hídrica no superará 100 m de ancho medidos a partir del cauce o la máxima extensión ordinaria de la lámina de agua en los embalses superficiales, que podrán variar por razones topográficas, hidrográficas u otras a determinar por el MAATE (Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua, art. 64).

El reglamento toma de la ley las formas de protección del dominio hídrico público y dispone que vía autoridades de demarcación hidrográfica se limiten las fuentes de agua. Es interesante anotar que, en materia de la protección de las mencionadas fuentes, en caso de aprovechamiento del agua en minería y actividades hidrocarburíferas o en el caso de que la autorización solicitada pueda afectar a fuentes de agua o zonas de recarga de acuíferos, la autoridad deberá intervenir y condicionar la autorización otorgada y prevista en la respectiva licencia ambiental.

Cuando el reglamento se expidió, esta última tarea suponía un ejercicio de coordinación institucional, ya que la licencia ambiental, antes de la fusión de las autoridades de agua y ambiente, le correspondía al entonces Ministerio del Ambiente (MAE); después de la fusión de 2020, esta coordinación no es interinstitucional sino interdepartamental.

Código Orgánico del Ambiente (2017)

El Código Orgánico del Ambiente (COA) fue promulgado en 2017.⁵ Está organizado en ocho libros: uno preliminar, otro dedicado al régimen institucional, el siguiente al patrimonio natural (el más extenso de todos), que precede a los libros dedicados a la calidad ambiental, al cambio climático y la zona marino-costera,

⁵ El COA incluía una *vacatio legis* de un año, de modo que empezó a regir en febrero de 2018.

para concluir con los libros dedicados a los incentivos ambientales y a la reparación integral de daños ambientales y régimen sancionador.

El COA (2017) reconoce a los páramos en varias normas como:

1. Uno de los derechos de la población (art. 5, num. 2).
2. Un elemento relevante al considerar la declaratoria de un área protegida (art. 40, num. 2).
3. Un integrante del patrimonio forestal (art. 89, num. 2); patrimonio sobre el cual, el COA dispone que el MAATE ejerza la rectoría, la planificación, la regulación, el control y la gestión.

Las normas aplicables a este patrimonio ocupan todo un capítulo (COA, 2017, cáp. 5, arts. 99-108), que incluye entre otras, las siguientes disposiciones:

- La declaración de interés público de la conservación, protección y restauración de los páramos; razón por la cual se prohíbe su afectación, la tala y el cambio de uso de suelo (art. 99).
 - Que las normas especiales para su protección, uso sostenible y restauración considerarán las características ecosistémicas de regulación hídrica, ecológica, biológica, social, cultural y económica (art. 100).
 - La obligatoriedad para todos los GAD de establecer planes de apoyo a la conservación de dicho ecosistema bajo los criterios del MAATE (art. 100, inc. 2).
 - El reconocimiento de las herramientas e instrumentos aplicables a su gestión dependiendo de su grado de intervención. Si se trata de páramos intervenidos con actividades agrarias el MAGAP definirá el instrumento de manejo bajo los lineamientos del MAATE; si, por otro lado, se trata de páramos no intervenidos será el MAATE el que coordinará con el GAD (art. 101).
 - El contenido mínimo de los planes e instrumentos dedicados a la gestión del páramo (art. 102).
 - El reconocimiento del páramo como ecosistema frágil (art. 105, num. 2)
- Es oportuno destacar que los ecosistemas frágiles sí son definidos en el COA (Glosario de términos).
4. Un área que causa y es destino de incentivos económicos.⁶

⁶ Ecosistemas frágiles. Son zonas con características o recursos singulares muy susceptibles a cualquier intervención de carácter antrópico, que producen en el mismo una profunda alteración en su estructura y composición. Son ecosistemas frágiles, entre otros, los páramos, humedales, bosques nublados, bosques tropicales secos y húmedos y manglares, ecosistemas marinos y marinos-costeros. Código Orgánico Ambiental. Artículo 284.

5. Un ecosistema cuyo incendio, destrucción y afectación constituye infracción muy grave (COA, art. 318, num. 4).

También relevantes para el páramo como zona de regulación de agua son las disposiciones del COA que establecen facultades de control de parámetros ambientales y aplicación de normas técnicas del agua a favor de los GAD provinciales (art. 26, num. 8) y de los metropolitanos y cantonales (art. 27, num. 10).

La autora critica dos aspectos en el COA. El primero, su error de técnica legal cuando, en lugar de desarrollar la norma constitucional, la copia y omite parcialmente su mandato, restando parte de la garantía (Tabla 7.2). El segundo crítica, aunque se refiere más al agua que al páramo, merece una crítica relacionada con la confusión que puede generar. Se trata de la incongruencia del COA que propone la recuperación de recursos hídricos (COA, 2017, art. 5, num. 4). Como es bien sabido, es posible la recuperación de las cuencas hidrográficas a través de su manejo porque, en un sentido netamente físico, son espacios demarcados por límites topográficos, donde la precipitación escurre hacia un solo punto; por esto, la cuenca en sí permanece y lo que cambia y se degrada son los recursos que en ella existen (agua especialmente). En este mismo sentido, el COA no define cuencas hidrográficas, aunque su manejo sea mencionado como uno de los objetivos del Estado en materia del patrimonio natural (art. 30, num. 7). Ribadeneira Sarmiento (2019) anotaba que este es un vacío del COA como *corpus* ambiental.

Tabla 7.2 Comparación entre el art. 406 de la Constitución y el art. 4 del COA.

Constitución	Código Orgánico Ambiental
<p>Artículo 406.- El Estado regulará la <i>conservación, manejo y uso sostenible, recuperación, y limitaciones de dominio</i> de los ecosistemas frágiles y amenazados; entre otros, los páramos, humedales, bosques nublados, bosques tropicales secos y húmedos y manglares, ecosistemas marinos y marinos-costeros</p>	<p>Artículo 5.- Derecho de la población a vivir en un ambiente sano. El derecho a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado comprende:</p> <p>2. El manejo sostenible de los ecosistemas, con especial atención a los ecosistemas frágiles y amenazados tales como páramos, humedales, bosques nublados, bosques tropicales secos y húmedos, manglares y ecosistemas marinos y marinos-costeros;</p>

Reglamento al Código Orgánico del Ambiente (2019)

El Reglamento del COA contiene algunas disposiciones relativas a los páramos, entre ellas, las siguientes:

1. Se reconoce que el páramo es un ecosistema proveedor de servicios y beneficios ambientales, concretamente de aprovisionamiento, regulación y soporte (COA, 2017, art. 249).
2. Se establece que se expedirá una norma técnica para definir los mecanismos de la gestión del páramo (art. 261); los principios que deberá aplicar esta norma técnica consideran:
 - la sostenibilidad ambiental del páramo;
 - el derecho de las comunidades de los páramos a realizar sus actividades sociales, económicas, ambientales y culturales;
 - la función hídrica y la captura de carbono que los páramos desempeñan;
 - el fomento de la restauración ecológica;
 - las intervenciones de las autoridades deberán enmarcarse en los planes de manejo,
 - la necesidad de regeneración de estos ecosistemas.
3. Se reconoce que una de las funciones de los bosques y vegetación protectores es la conservación de los ecosistemas frágiles (el páramo entre ellos) (art. 285, lit. e).

Es interesante anotar que el reglamento incluye incentivos aplicables a la restauración del páramo (art. 798). Concretamente se determina que en el Plan Nacional de Inversiones Ambientales se desarrolle la estrategia financiera para generar incentivos especializados, cuya implementación deberá cumplir con las fases que se requieran para restaurar, de acuerdo con criterios técnicos homologados, reportables y verificables.

Varios de estos reconocimientos contrarían la técnica legal porque siendo declaraciones corresponden al nivel legal, no al reglamentario. A un reglamento, como se explicó al iniciar el capítulo, corresponde desarrollar la garantía o derecho con procedimientos, requisitos y similares. Curiosamente, en la lista de prohibiciones, concretamente en la disposición inadecuada de sustancias químicas en el SNAP y en el dominio público no constan los páramos (art. 525); la falta de esta inclusión podría debilitar acciones legales sobre estos ecosistemas.

Finalmente, es pertinente hacer una referencia a la disposición del Reglamento al COA que fue una de las preguntas del referendo de febrero de 2023. Esta norma se refiere a la integración de las áreas de protección hídrica en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP) (art. 141). En el referendo se preguntó si ante la exclusión constitucional de las áreas de protección hídrica del SNAP los votantes estaban de acuerdo con incorporar un subsistema de protección hídrica a este sistema por vía de enmienda. Que el 55 % de los votantes (Consejo

Nacional Electoral, 2023) haya negado esta posibilidad es definitivamente una llamada de atención de lo mucho que queda por hacer para entender la importancia de la protección de fuentes hídricas en el país.

Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales (2016)

La Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales (LOTRTA) norma el uso y acceso a la tierra rural, su propiedad y sus funciones social y ambiental, para lo cual regula su posesión, propiedad, administración y redistribución. Se garantiza la propiedad de las tierras comunitarias, el reconocimiento, adjudicación y titulación a favor de comunas, comunidades, pueblos y nacionalidades indígenas, pueblos afro y montubios.

Establece que la regularización de tierras rurales es de competencia exclusiva de la autoridad agraria nacional, el MAGAP. La citada ley dispone que la adjudicación se realizará a favor de personas naturales de la agricultura familiar campesina; personas naturales de la economía popular y solidaria; y organizaciones campesinas legalmente reconocidas que se encuentren en posesión ininterrumpida por un lapso mínimo de cinco años.

Otra nota destacable es que la ley exceptúa de ser utilizadas para la producción agrícola, pecuaria, forestal, silvícola o acuícola, actividades recreativas, ecoturísticas o de protección agraria las áreas de protección y conservación hídrica, a más de las áreas reservadas de seguridad, las del SNAP, bosques y vegetación protectores públicos, privados y comunitarios, patrimonio forestal del Estado y las demás reconocidas o declaradas por la Autoridad Ambiental Nacional. Véase el cuadro acompañante.

Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales

Artículo 3.- Posesión y propiedad ancestral.– Para efectos de esta Ley, se entiende por tierra y territorio en posesión y propiedad ancestral, el espacio físico sobre el cual una comunidad, comuna, pueblo o nacionalidad de origen ancestral, ha generado históricamente una identidad a partir de la construcción social, cultural y espiritual, desarrollando actividades económicas y sus propias formas de producción en forma actual e ininterrumpida. La propiedad de estas tierras y territorios es imprescriptible, inalienable, inembargable e indivisible, su adjudicación es gratuita y está exenta del pago de tasas e impuestos.

El uso y usufructo sobre estas tierras no pueden modificar las características de la propiedad comunitaria incluido el pago de tasas e impuestos.

Esta ley tiene disposiciones relativas al avance de la frontera agrícola que podrían perjudicar a los páramos. Concretamente, estas establecen la obligación del Estado de limitar, regular y controlar la ampliación de la frontera agrícola para que el páramo entre otros ecosistemas frágiles no se afecte (Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales, 2016, art. 7, lit. k); de otro, establece reglas para fijar estos límites (LOTRTA, 2016, art. 50). Una de las reglas es la relativa al sometimiento de las actividades productivas al respectivo plan de manejo, y otra, muy específica determina que no se permitirá el avance de la frontera agrícola en los páramos no intervenidos sobre los 3300 m, al norte del paralelo tres latitud sur, y sobre los 2700 m, al sur de dicho paralelo, y en áreas protegidas ni áreas alta diversidad biológica o que generen servicios ambientales.

Este instrumento declara de interés público y prioridad nacional la protección y uso del suelo rural por su relevancia para la producción de alimentos, el derecho a la alimentación y a la soberanía alimentaria.

La ley reconoce la agricultura familiar campesina como modalidad productiva, agropecuaria, de recolección, acuícola, forestal o silvícola; sin embargo, no se complementa con disposiciones que reconozcan que el páramo no solo es un área sino una realidad social y cultural que combina funciones económicas, ambientales, sociales y culturales para las comunidades rurales y especialmente indígenas.

Merced a la Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales se crean: el Fondo Nacional de Tierra como instrumento de política social para el acceso equitativo a la tierra; y el Sistema de Información Pública Agropecuaria. A la autora le parece que está pendiente enlazar a ambos instrumentos en la conservación y manejo del páramo, así como para que los planes de uso y gestión del suelo de los GAD municipales y metropolitanos conozcan adecuadamente la importancia y las necesidades específicas de los páramos.

Reglamento a la Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales (2017)

Este instrumento legal desarrolla los principios, finalidades, lineamientos de la política agraria de tierras y los derechos vinculados a la propiedad de la tierra rural y a los territorios ancestrales. Se dispone que el MAGAP organice y administre el Registro de Tierras Rurales. Esta disposición es relevante a los páramos ya que esta autoridad debe expedir el informe técnico de cambio de la clasificación de suelo rural de uso agrario a suelo de expansión urbana o zona industrial.

Relevante a los páramos es que, por disposición de este reglamento, en el catastro rural deberá constar como restricción: que la zona no cuente con infraestructura pública de riego o productiva permanente; que el suelo no tenga

aptitud agrícola o tradicionalmente no se haya dedicado a actividades agrícolas; y que esta área no este incluida en territorios comunales o ancestrales.

En vista de que la Autoridad Agraria Nacional debe elaborar y presentar proyectos de desarrollo rural dirigidos al fortalecimiento social productivo ante el Consejo Nacional de la Producción, sería ideal contar con un apoyo concreto para que los actores de la agricultura familiar campesina y de los agricultores de las comunidades, comunas, pueblos o nacionalidades pudieran elaborar y presentar iniciativas que busquen la conservación de los páramos.

Discusión sobre el Régimen Legal

El régimen legal aplicable a los páramos en el Ecuador tiene varias fortalezas. Una de ellas es la disposición constitucional que consagra al páramo como ecosistema frágil (Constitución de la República del Ecuador, 2008, art. 406); a esta hace eco la disposición del COA (art. 5, num. 2), aunque modifique su alcance y aquella relativa a la declaración del área protegida que contengan páramo entre sus ecosistemas no arbóreos (art. 89, num 2). Otra disposición relevante está en la Ley de Tierras y es la que se refiere a las limitaciones del avance de la frontera agrícola hacia el páramo (LOTRTA, 2017, art. 13 y 50).

Pese a las garantías y normas mencionadas, en el campo diariamente se constata que los páramos son víctimas de alteración, contaminación y uso abusivo. Ello sucede, en gran medida, porque las fortalezas del régimen legal no son capitalizadas debido a cierto grado de conflicto y debilidad en las instituciones que deben aplicar el régimen legal descrito, ya sea directa o coordinadamente como se ejemplifica a continuación.

El marco institucional de los páramos ecuatorianos lo integran varias instituciones que deben coordinar políticas y acciones bajo el liderazgo de MAATE y MAG. Mientras que al primero por disposición de la Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales le corresponde velar por el cumplimiento de las funciones social y ambiental de los páramos intervenidos, al segundo le corresponde la conservación de los páramos no intervenidos con uso agropecuario. Aparentemente la norma es clara, pero vale preguntar ¿qué tan intervenido debe estar un páramo para que se considere intervenido?, ¿cuál es el grado de intervención?, y aún, ¿cómo se mide la intervención?; a la falta de certeza ante estas preguntas le sigue un conflicto de competencia positiva (ambas autoridades intentando intervenir en el mismo lugar) o uno negativo (ninguna autoridad interviene).

La clarificación de aspectos como el mencionado, son sin duda necesarios para que el marco legal de los páramos y su gestión se efectúe en términos adecuados de coordinación; casos de coordinación digna de réplica han sucedido

en el pasado y son experiencias dignas de recuperar, por ejemplo, entre el Parque Nacional Cajas y el Programa de Manejo de Cuencas (MICPA) de la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable y Saneamiento de Cuenca (ETAPA). Ambas instituciones mantuvieron, durante varios años, una línea de coordinación institucional en torno a la conservación y sensibilización en favor del área protegida, aunque sus logros en materia de la identificación y sanción de infracciones hayan sido limitados.

Sobre el seguimiento y la imposición de sanciones por infracciones y delitos ambientales, hay que reconocer que se trata de un aspecto problemático; hay aspectos como el control del cambio de uso del suelo de los páramos y la extensión de la frontera agropecuaria que son particularmente difíciles pese a que las normas del COA dispongan que los páramos son patrimonio forestal y establezcan como delito por ejemplo su tala o incendio. La impunidad, en general, y la falta de conclusión de los procesos administrativos y judiciales iniciados ante infracciones o delitos resultado de actividades antrópicas no autorizadas o permitidas le hacen poco favor a la conservación de los páramos. Aunque a los idealistas les gustaría que la ley se cumpliera solo por su finalidad y porque garantizan el bien común, es innegable que la imposición de sanciones incentiva el cumplimiento de las reglas.

En este capítulo no se presenta el análisis completo de toda la normativa secundaria relativa a los páramos. Sin embargo, se deja constancia que en el Ecuador los procesos de ordenamiento territorial distan de considerar las particularidades naturales de los páramos. En la práctica la normativa secundaria en los GAD no necesariamente promueve la conservación de la calidad de los páramos ni incrementa la capacidad local para fortalecer, y aplicar principios y estrategias de manejo participativo en el uso sostenible de páramo, porque indudablemente no extender la frontera agropecuaria tiene un alto costo político para los GAD, tanto como imponer limitaciones de uso en los páramos.

Siguiendo con los GAD, su actuación sirve también para ejemplificar la falta de aplicación y cumplimiento de las atribuciones de las autoridades en materia del control del uso del agua. Un ejemplo de esta situación son varias concesiones mineras otorgadas en los páramos y que los GAD municipales autoricen intervenciones incoherentes con la conservación de este ecosistema. La verificación de que las zonas de carga y recarga hídrica estén libres de actividades mineras, le corresponde al MAATE tras la fusión con SENAGUA. La situación se resume en que el GAD concede el permiso y al MAATE le corresponde la verificación y sanción; si los permisos fueran concedidos solamente cuando en términos legales correspondiera, la autoridad ambiental podría concentrarse en políticas públicas y rectoría en lugar de pesquisar actividades productivas. Por otro lado,

no es menos cierto que autoridades nacionales y GAD han aprobado planes de forestación y reforestación con especies exóticas y que la cota de delimitación fijada frente a los sistemas actuales de producción supera con creces la cota aplicable a los páramos.

Un tema adicional en materia de institucional y que requiere atención de las autoridades con competencias sobre los páramos como área de regulación y conservación de agua, es la necesidad de fortalecimiento a las Juntas del Agua, a fin de que puedan desarrollar sus funciones como una verdadera instancia local de participación en el esquema institucional establecido. Debe reiterarse lo obvio: varios de los problemas que existen en los páramos podrían ser resueltos al amparo del actual régimen legal si las autoridades actuaran en estricto apego a las mismas. Sin embargo, no es menos cierto que los regímenes legal e institucional de los páramos enfrentan dificultades de naturaleza multisectorial. Un claro ejemplo de ello son los problemas de tenencia de la tierra, tema inconcluso en el país y cuyas consecuencias son cotidianas en zonas rurales como los páramos.

Los páramos y otras zonas rurales fueron divididos por los procesos de reforma agraria que se ejecutaron en el Ecuador. De ello resultó una combinación variopinta de extensas propiedades y un gran número de pequeñas unidades productivas; esta situación desde hace tiempo se considera indeseable por razones de equidad y eficiencia, tanto productiva como social. Muchas de las comunidades indígenas y campesinas que manejan los páramos no tienen certeza jurídica sobre su propiedad comunal ni claridad sobre sus límites; igual puede decirse de algunos propietarios privados. La falta de certeza y la franca inseguridad de los derechos de propiedad modifican varias decisiones de los titulares y condicionan su comportamiento generando múltiples percepciones. Ante la ausencia de estudios sobre estas últimas, el proyecto pionero Prindex aplicó una encuesta en 140 países, uno de ellos, Ecuador, para generar información y proporcionar datos globales sobre la propiedad y la percepción de seguridad de las personas sobre sus hogares y predios productivos. Con base en este estudio es posible estimar que cerca de 1 de 5 adultos a nivel global sufren de inseguridad acerca de sus derechos a la tierra y a la propiedad; de ellos, 91 millones están en América Latina y el Caribe. En la región existe una brecha de género particularmente amplia: en promedio el 25 % de hombres siente inseguridad frente a un superior 36 % de mujeres. El promedio de Ecuador es de 19 % de inseguridad respecto de las propiedades productivas y del 18 % sobre sus hogares y viviendas (Feyertag et al., 2020).

Aunque el país carezca de un catálogo actualizado de la extensión de páramos que enfrentan problemas de tenencia de la tierra, es interesante anotar que la ley reconoce el problema y plantea alternativas. Tal sucede en la Ley Orgánica

de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales, una de cuyas normas establece que la regulación de la posesión de viviendas en páramos en áreas estatales corresponderá al Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda en coordinación con los GAD (LOTRTA, 2017, art. 58). Por otro lado, esta ley reconoce los actuales asentamientos humanos y contiene un interesante principio de doble regulación ambiental a la propiedad privada: de un lado la prohibición de ampliar la frontera agrícola y de otro lado, la obligación de contar con un instrumento de manejo para las actividades productivas agrarias en los páramos y otros ecosistemas frágiles (art. 13). También existe una disposición relativa al control de la expansión urbana de predios rurales que destaca que los GAD no pueden invadir áreas de páramo en sus instrumentos de planificación (art. 113)

A más de los problemas de tenencia, existen problemas en las delimitaciones y traslapes de los límites de las propiedades en los páramos, aspecto que se vuelve problemático no solo en la relación entre propietarios individuales o comunitarios sino también cuando, por temas de conservación, se intenta integrar a los páramos en los subsistemas del SNAP. Estos traslapes y errores son frecuentes en la cartografía de límites y de los catastros nacionales, provinciales y municipales.

Por otro lado, para que el régimen legal vigente pueda contribuir con la conectividad con fines de conservación es necesario que haya herramientas de enlace con otros niveles subnacionales. Si bien es cierto que las áreas del SNAP que incluyen sitios Ramsar y otras áreas especiales para la conservación de la biodiversidad, como los bosques y vegetación protectores y las áreas de protección hídrica articulan acciones a favor de los páramos. La articulación entre páramos y los instrumentos de planificación de los gobiernos provinciales y regionales requiere la implementación de instrumentos legales de nivel administrativo, mismos que al corresponder a ámbitos de diferentes autoridades regresan el tema a la arena de la coordinación interinstitucional, tan necesaria como poco utilizada.

En materia de mecanismos de incentivos es necesario anotar que, aunque el marco legal incluya incentivos para impulsar la conservación de los páramos no todos están en marcha. Por un lado, está en pie el Programa Socio Bosque y algunos fondos de agua mantienen líneas de conservación de páramo; ambos funcionan relativamente, pero existen otros incentivos que no se han aplicado como por ejemplo el incentivo económico que contiene la Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios (LOTRTA, 2017, art. 50); esta disposición se refiere a programas para que las comunidades del páramo financien su conservación y restauración. Es imperativo replicar y multiplicar los procesos que promuevan el cambio de uso y las actividades de restauración en los páramos; de igual manera debería suceder con las iniciativas de desarrollo económico local asociadas a la producción sostenible, turismo y otras que generen ingresos locales sin impacto negativo.

Un tema importante son las actividades mineras en el páramo, porque de un lado, según la ley en torno a los acuíferos se deben delimitar zonas de restricción para ciertas actividades, y las zonas de carga y recarga hídrica deben ser zonas libres de actividades mineras (LOTRTA, 2017, art. 13). La aplicación de la Ley de Minería (2018) y la vigencia de las concesiones mineras anteriores a la normativa analizada en este capítulo (y aún, otras recientes) contradicen las prohibiciones mencionadas (Capítulo 10).

Otro tema es la necesidad de fortalecer el sistema de información para que permita la sistematización, recopilación y acceso a información actualizada sobre los páramos, y evidentemente para que difunda y eduque al público sobre la importancia del páramo y de los servicios ambientales que produce. Actualmente existe el Sistema Nacional de Monitoreo de la Biodiversidad que maneja el Instituto Nacional de Biodiversidad (INABIO) y también el Sistema Nacional de Indicadores Ambientales (SNIA) que sirven para recopilar información y evaluar el avance de las metas ambientales. Sin embargo, la autora considera que si más de 4 millones de ecuatorianos consideran que no es necesario constituir un sistema de protección para las fuentes hídricas (resultado del referendo de febrero de 2023), parece obvio que la información que se dispone sobre páramos no genera conciencia pública.

Idealmente, la gestión de páramos debería incluir un espacio de participación de la sociedad civil y comunidades como fue en su momento el Grupo de Trabajo en Páramos del Ecuador, que permita articular actores, capitalizar intervenciones, planificar y priorizar estrategias y generar una adecuada gestión de los páramos (Barragán y Núñez, 2006). De un lado porque ello correspondería a una aplicación de los principios de Escazú ya mencionados y de otro lado porque la participación no es solo un derecho de las mencionadas comunidades, sino que ha probado ser una excelente estrategia de trabajo para reconocer el rostro humano del páramo; asumir la dependencia páramos-comunidades-ciudades; disminuir y evitar la exclusión social y el racismo; así como para luchar contra la pobreza rural.

Los páramos y la ley que deberíamos tener

En opinión de la autora, en el país existe una fe casi inquebrantable en los instrumentos jurídicos; tal parecería que todos los problemas se arreglan con una ley nueva o con una reforma de una existente. Esta fe se ha convertido en una práctica perversa: se producen muchas normas legales, pocas se implementan realmente, y peor aún, casi en ningún caso la implementación se evalúa. El páramo no escapa a esa realidad.

En este punto se separan las opiniones; frente a la disyuntiva, hay quienes consideran que se requiere una nueva ley y quienes abogan por una real implementación del régimen legal. El primer grupo sostiene que se requiere un nuevo marco legal que proteja los páramos. Se esperaría que este marco determine el abanico de usos permitidos desde la protección estricta hasta el manejo permisivo con reglas especiales dependiendo de actores, tipos de uso y vulnerabilidad ambiental. Idealmente, este marco debería reducir al máximo y penalizar las actividades antrópicas que alteren o dañen este ecosistema de modo que realmente se puedan aplicar reglas de compensación por pérdida de biodiversidad.

La autora se decanta por el segundo grupo porque los objetivos y preocupaciones expresadas por el primer grupo constan en los instrumentos legales vigentes; su falta de aplicación se debe a la debilidad institucional. La autora considera que para proteger los páramos no necesariamente se requiere una nueva ley sino de un refuerzo institucional que permita que las normas actuales se apliquen efectivamente y que esa aplicación sea evaluada desde la óptica de la eficiencia de las normas y de las capacidades institucionales. Tras esta evaluación se podría decidir sobre consideraciones y argumentos objetivos entre una nueva ley, una colección de reformas y un refuerzo estratégico al régimen institucional vigente.

En todo caso, opiniones aparte, lo que al momento de escribir este capítulo existe no es una evaluación de la eficiencia del régimen legal para conservar los páramos sino, dos iniciativas, de un lado, una legislativa, y de otro, un proceso nacional para definir el Plan de Acción Nacional para la Conservación, Restauración y Uso Sostenible de los Páramos (diciembre de 2022).

Proyecto de Ley Orgánica de Justicia y Protección Integral para los Páramos

Esta iniciativa legislativa fue presentada en la Asamblea Nacional el 22 de diciembre de 2021 y se encuentra en trámite.⁷

Hasta el momento, el Proyecto de Ley Orgánica de Justicia y Protección Integral para los Páramos atiende los siguientes temas: enfoque estratégico; responsabilidad objetiva; planificación y uso del suelo; reconocimiento de los habitantes del páramo; reconversión o sustitución de actividades prohibidas; situación de los predios en los páramos; sistema de monitoreo de la situación de los páramos; fondo nacional de protección integral de los páramos; y responsabilidad social y empresarial. El texto del proyecto incluye temas indudablemente sensibles como la

⁷ La iniciativa del Proyecto de Ley Orgánica de Justicia y Protección Integral para los Páramos fue del Asambleísta José Luis Vallejo Ayala de la provincia del Carchi

declaratoria de utilidad pública de ciertas zonas de páramos; los usos extractivos, especialmente minería; los derechos de comunidades y titulares, entre otros. Si estos temas no son tratados adecuadamente en el marco de la consulta prelegislativa, podrían generar resistencia al trámite del proyecto de ley.

El proyecto de ley será debatido y acordado por los nueve asambleístas de la Comisión de Biodiversidad, cuyo informe debe ser sometido al Pleno de la Asamblea en un primer debate; ello dependerá de la agenda legislativa. Después del mencionado debate, el proyecto pasará a la consulta prelegislativa a los actores locales e interesados, tiempo durante el cual se suspende el plazo ordinario. Es de esperarse que este proceso de consulta sea riguroso en cumplimiento de una de las sentencias de la Corte Constitucional de 2022.⁸

Plan de Acción Nacional para la Conservación, Restauración y Uso Sostenible de los Páramos

La declaratoria de la Asamblea Nacional que estableció que los 23 de junio se conmemora el Día Nacional de los Páramos, también dispuso al MAATE elaborar el Plan de Acción Nacional para la Conservación, Restauración y Uso Sostenible de los Páramos a través de un proceso participativo (Asamblea Nacional, 2019, Resolución Legislativa 2019-2021-097). Para cumplir esta resolución, el MAATE concretó varias alianzas y sumó apoyos entre organizaciones e individuos para desarrollar un plan bajo su liderazgo.

Durante 2022 se efectuaron siete talleres regionales.⁹ En ellos se reunieron varios actores locales para dialogar sobre la situación de los páramos y sus problemas y compartir soluciones e iniciativas. A esto se sumó un taller nacional en la ciudad de Quito, en 2023, con instituciones públicas y actores de organizaciones no gubernamentales, academia y empresas privadas.¹⁰ Estos aportes fueron integrados en un borrador articulado en torno a los siguientes líneas temáticas y temas transversales: conservación, uso sostenible y bioeconomía, restauración, investigación, monitoreo y control integrado, gobernanza,

⁸ La Corte Constitucional en sentencia 45-15-IN/22 del 28 de enero del 2022 resolvió que la Ley de Recursos Hídricos y su Reglamento son inconstitucionales por la forma, concretamente por contrariar el Art. 57, numeral 17 de la Constitución (derecho de las comunas, comunidades, pueblos y nacionalidades indígenas a la consulta previa, libre e informada de planes y programas de prospección, explotación y comercialización de recursos no renovables que se encuentren en sus tierras).

⁹ Los 7 talleres se ejecutaron en 2022 en Riobamba, El Ángel, Salcedo, Macas, Oyacachi, Loja y Azogues.

¹⁰ El Taller Nacional para la construcción participativa del Plan de Acción Nacional para la Conservación, Restauración y Uso Sostenible de los Páramos se llevó a cabo el 16 de febrero de 2023 en Quito.

sostenibilidad financiera, y educación ambiental y comunicación. Se espera que el Plan de Acción sea lanzado en 2023.

Comentario final

El Ecuador cuenta con un marco legal desde la Constitución hasta instrumentos emitidos por los GAD; en dicho marco pueden existir algunas incoherencias, vacíos y hasta contradicciones, pero el marco legal existe y está vigente. Lo que el Ecuador no tiene es la aplicación del mencionado marco legal; hace falta que las autoridades nacionales apliquen las normas vigentes para que se consolide una política nacional que oriente la gestión de los páramos y que traspase la gestión gubernamental y ministerial y llegue cotidianamente a los páramos. En la opinión de la autora, parecería que la preocupación se dirige hacia tener más instrumentos legales en lugar de tener y hacer mejor implementación.

Siendo así, son loables las iniciativas del legislativo y del ejecutivo. Por cierto, no deja de ser interesante que, después de tanto olvido, simultáneamente exista un interés político a doble nivel (legislativo y ejecutivo). Ideal sería que ambas iniciativas fortalezcan a las instituciones responsables de la gestión de los páramos ecuatorianos. Ese sería el mejor reconocimiento a este importante ecosistema y la mejor forma de llegar al siguiente Día Nacional de los Páramos celebrando su importancia y avanzando realmente hacia la implementación de medidas que aporten y mejoren su gestión y conservación.

Agradecimientos

Ramiro Carrión, Patricio Mena-Vásconez, Javier Rojas, Danilo Silva y Manolo Morales, profesionales con amplia experiencia en proyectos de conservación y desarrollo, compartieron generosamente sus opiniones sobre la eficacia del régimen legal aplicable a los páramos.

Rusbel Chapalbay (Comisión de Biodiversidad de la Asamblea Nacional) y Ángel Onofa y Felipe Tapia (MAATE) brindaron invaluable información relativa al proyecto de Ley Orgánica de Justicia y Protección Integral para los Páramos y del Plan de Acción Nacional para la Conservación, Restauración y Uso Sostenible de los Páramos, respectivamente.

A todos ellos se agradece por su colaboración y aportes que enriquecieron la reflexión legal que consta en este capítulo.

11047

TRAVAXOS PAPAALLAIMITAPA

En punto haucay cusqui quilla



Trabajos: Tiempo para cavar papas. Guamán Poma de Ayala (1615). Dominio público



CAPÍTULO 8

HISTORIA, REALIDAD SOCIAL Y RESISTENCIAS TERRITORIALES CONTEMPORÁNEAS EN LOS PÁRAMOS ECUATORIANOS

Rossana Manosalvas | Emilie Dupuits | Patricio Mena-Vásconez

Mama y guagua.

Fotografía: Robert Hofstede



Resumen

A lo largo de la historia, los páramos han sido definidos, percibidos y valorados de manera distinta por parte de variados actores y sectores de la sociedad. En los últimos treinta años, los páramos —como paisajes culturales, socioecosistemas altoandinos o territorios hidrosociales— han cobrado una relevancia creciente, no solo a nivel académico, sino en las políticas y visiones locales y nacionales de desarrollo, así como en la percepción de la gente. Estos ecosistemas han sido reconocidos especialmente como la fuente principal de agua para las grandes y medianas urbes, la agricultura y la hidroenergía, y, a la vez, como el territorio ancestral de comunidades indígenas que se han enfrentado históricamente a estas presiones externas.

La diversidad de visiones, conceptualizaciones y valoraciones que tienen los distintos actores determinan imaginarios, a veces contrapuestos, sobre cuáles deberían ser los usos y los no usos del páramo, quiénes deberían tener acceso a los recursos y los beneficios, y, en definitiva, quiénes deberían tomar las decisiones sobre ellos. En este capítulo presentamos una reseña de las principales interacciones humanas con el territorio del páramo, que iniciaron hace aproximadamente 10 000 años, para luego pasar a revisar las propuestas actuales para manejar, aprovechar, conservar y apreciar el páramo que provienen de los distintos actores.

El análisis empieza con un resumen de la historia socioambiental de los páramos desde un punto de vista de paisajes culturales y continúa con los roles del Estado, los pueblos indígenas y las comunidades mestizas, para terminar con el papel de actores privados recientes como la minería y la floricultura industrial. El capítulo concluye con las posibilidades de cogobernanza para los páramos ecuatorianos en el futuro, como territorios no solo naturales sino como el resultado de las complejas y a veces inequitativas interacciones sociedad humana-naturaleza.

Summary

Throughout history, páramos have been defined, perceived, and valued differently by a variety of actors and sectors in society. In the last 30 years, páramos, as cultural landscapes, high Andean socio-ecosystems or hydro-social territories, have gained increasing relevance, not only at the academic level, but also in local and national development policies and visions, as well as in people's perceptions. These ecosystems have been recognised especially as the main source of water for large and medium-sized cities, agriculture, and hydropower, and at the same time as the ancestral territory of Indigenous communities that have historically confronted these external pressures.

The different visions, conceptualisations, and values held by the various actors determine sometimes conflicting imaginaries about what the uses and non-uses of the páramo should be, who should have access to the resources and benefits, and, ultimately, who should make decisions about them. In this chapter we present an overview of the main human interactions with the páramo territory over the last 10 000 years, and then go on to review proposals to manage, use, conserve, and appreciate the páramo that come from the different actors.

The analysis begins with a summary of the socio-environmental history of the páramo from a cultural landscape perspective and continues with the roles of the state, Indigenous peoples, and mestizo communities, and ends with the role of recent private actors such as mining and industrial floriculture. The chapter concludes with the possibility of co-governance for Ecuador's páramos in the future, taking into account not only the territories' natural systems but also socio-natural interactions, which can be complex and unequal.

Introducción

Los páramos como territorios en disputa: la diversidad de actores, intereses y valoraciones alrededor del páramo



Figura 8.1 La gente del páramo y la ciudad (en este caso, Quito) percibe y valora el paisaje de los altos Andes de manera diferente. Robert Hofstede y Ministerio de Turismo Ecuador (Flickr, licencia CC BY-SA 2.0)

A lo largo de la historia, los páramos han sido definidos, percibidos y valorados de manera diferente por parte de los distintos actores. Esto incluye aquellos que interactúan directamente con ellos: comunidades indígenas y campesinas, propietarios privados, empresas privadas, haciendas, pequeños predios y autoridades locales interesadas. A ellos se suman los actores externos de los valles y las ciudades que se benefician de sus servicios ambientales, sobre todo hídricos (Figura 8.1). Fueron sitios de caza y recolección de frutos en las épocas preincaicas y luego se consideraron yermos y poco útiles por los conquistadores. Según las crónicas, se repartieron a cada fundador “cincuenta caballerías [...] no hubieron [sic] quienes quieran tierras por ser de tan rígido temperamento aquel paraje [...] ninguno ha subsistido como fundador ni ha hecho planta” (Cisneros, 1987, p. 164). Tanto en la Colonia como en la época republicana, los páramos se convirtieron en sitios de refugio para las poblaciones indígenas y campesinas que fueron empujadas hacia arriba (Recharte y Gearheard, 2001) por la falta de los dos medios básicos de subsistencia: la tierra y el agua (Manosalvas et al., 2021).

En los últimos 30 años, los páramos —como paisaje cultural, socioecosistemas altoandinos o territorio hidrosocial— han cobrado una relevancia creciente, no solo a nivel académico por su relación con la producción hídrica (Correa et al., 2020), sino en las políticas y visiones locales y nacionales de desarrollo. Estos ecosistemas han sido reconocidos como la fuente principal de agua para las grandes y medianas urbes, la agricultura industrial y la hidroenergía (Mena-Vásconez et al., 2017, Manosalvas et al., 2021).

Las dificultades para encontrar consensos alrededor de la gobernanza e institucionalidad para el páramo

Son las diversas visiones, conceptualizaciones y valoraciones que tienen los distintos actores las que determinan también imaginarios sobre cuáles deberían ser los usos y los no usos del páramo, quiénes deberían tener acceso a los recursos y los beneficios, y, en definitiva, quiénes deberían tomar las decisiones sobre ellos. Por ello, es importante establecer claramente estas diversidades de pensamiento y de posicionamiento en un marco de respeto y diálogo de saberes y de valores, encontrar los posibles consensos para seguir proveyendo de agua a las poblaciones, páramo abajo, al tiempo que las poblaciones parameras alcancen y mantengan una vida digna (véase, por ejemplo, Mena-Vásconez et al., 2017 para el caso del agua de riego) en el marco de una cogobernanza (Megens et al., 2022).

A continuación, haremos una breve reseña de las principales interacciones humanas con el territorio del páramo a lo largo de la historia de ocupación para luego pasar a revisar las propuestas desde el Estado, desde los pueblos y

nacionalidades indígenas, comunidades mestizas y actores privados, incluyendo comunidades mestizas, para manejar, aprovechar, conservar y apreciar el páramo.

La historia socioambiental de los páramos ecuatorianos

En este capítulo analizamos los páramos dentro del concepto de 'paisajes culturales', es decir, como el resultado de una larga interacción entre los ecosistemas y las actividades humanas que han terminado produciendo un paisaje diferente al original, pero no homogéneo ni degradado en términos funcionales (véase, por ejemplo, Jones, 2003). Hay evidencia de que muchos de los pajonales que usualmente se asocian con un páramo básicamente natural son el resultado de la relación ser humano-naturaleza que ha transformado los paisajes en lo que vemos en la actualidad y que comenzó al menos hace unos 10 000 años (Lægaard, 1992; White, 2013).

El tener una perspectiva de paisaje cultural no implica que todos los páramos sean tales. Hay páramos de pajonal que, en efecto, después de una intervención humana antigua siguen siendo ecosistemas saludables, y también zonas de pajonales fuertemente degradadas. Por otro lado, hay páramos, especialmente hacia la vertiente oriental, donde la actividad y el impacto humanos han sido muy limitados. El mosaico resultante incluye áreas que no han dejado de ser 'naturales' (en el sentido de que no son ciudades o campos agrícolas plantados ni sitios yermos), pero que sí tienen una clara presencia de acciones humanas de larga data (Coppus et al., 2001; Recharte y Gearheard, 2001; Mera, 2001).

En este contexto, un estudio de hace un poco más de 20 años determinó que, en términos de la salud del ecosistema del páramo (diversidad, resiliencia, capacidad de ofrecer servicios ambientales), en el Ecuador se puede hablar de una 'C invertida' (Coppus et al., 2001; Mena-Vásconez, 2001; Hofstede et al., 2002). Los páramos del extremo norte (páramos de frailejones), del extremo sur (páramos aislados y propios de un volcanismo antiguo) y de la vertiente oriental (páramos particularmente agrestes y húmedos) están en mejor estado que aquellos en el centro y hacia el occidente, que en general son más accesibles y menos húmedos y, por tanto, más expuestos a una intervención humana. Esto ayuda a comprender la generación del variado y dinámico mosaico que incluye paisajes culturales sobre la base biofísica de la C invertida relacionada, principalmente, con el relieve y el clima (Figura 8.2).



Figura 8.2 El páramo en el Ecuador es un mosaico de zonas con poco impacto de las actividades humanas, otras donde la presencia humana ha generado paisajes culturales y unas terceras donde se han producido paisajes fuertemente intervenidos. Fotografías: Patricio Mena-Vásconez

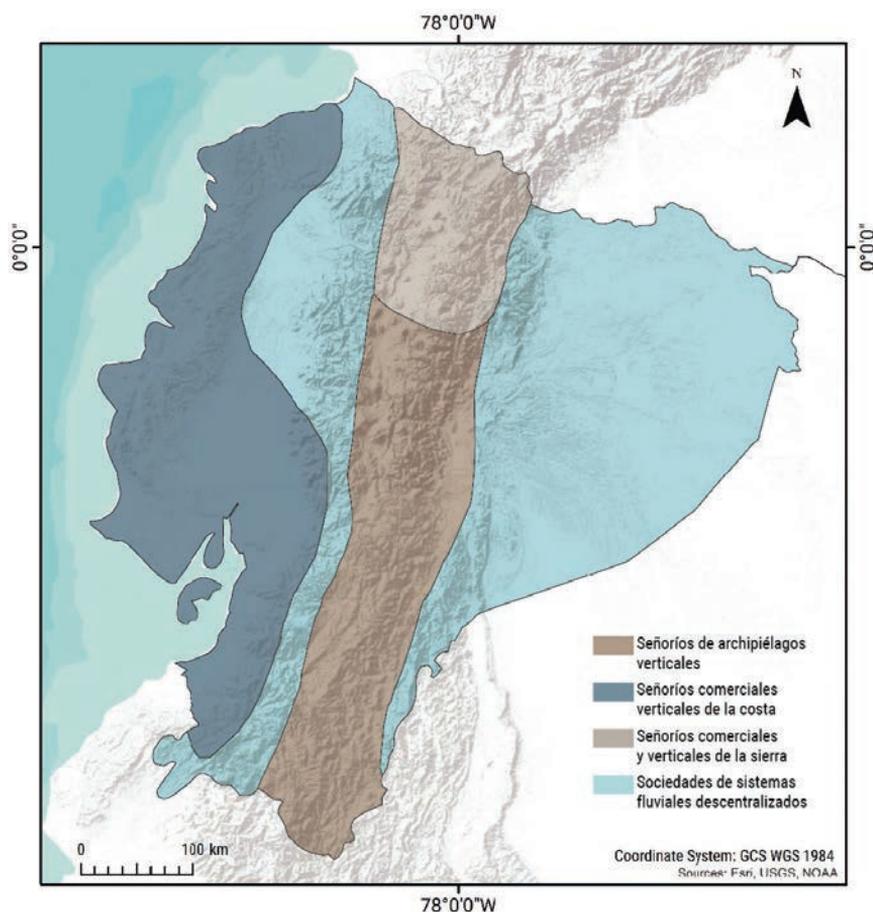


Figura 8.3 Señoríos étnicos en la Sierra sobre el actual territorio del Ecuador. Fuente: adaptado de Ramón, 2006

La interacción natura-cultura inició hace aproximadamente 10 000 años con la llegada de grupos humanos al inicio del Holoceno, cuando, tras comenzar el retiro de los hielos del último periodo glacial, los páramos estaban a una altura menor que ahora (White, 2013). No se conoce mucho detalle, pero de acuerdo con las evidencias, la actividad humana fue localizada y restringida a la recolección libre de alimentos salvajes y la caza, el ejercicio de rituales y su uso como lugares estratégicos de hospedaje y observación (Athens, 1980; Molano, 2002). Más tarde, estos grupos humanos se consolidaron en señoríos étnicos más permanentes o cacicazgos que crecieron desde el 500 d. C. hasta el enfrentamiento a la invasión del Imperio Inca, seguido por la Conquista Española (Ramón 2006). En la época republicana se dio una continuidad al sistema de haciendas que se sobrepuso a

las comunas y posteriormente los procesos de modernización económica también cambiaron la configuración de este territorio (véase, por ejemplo, Larrea, 2006; Sherwood, 2009) en los siglos XIX y XX. La identidad de los pueblos y nacionalidades indígenas en el Ecuador actual se basa en el reconocimiento de estos orígenes y sus subsecuentes procesos de diversificación intra e intercultural (Figuras 8.3 y 8.4).

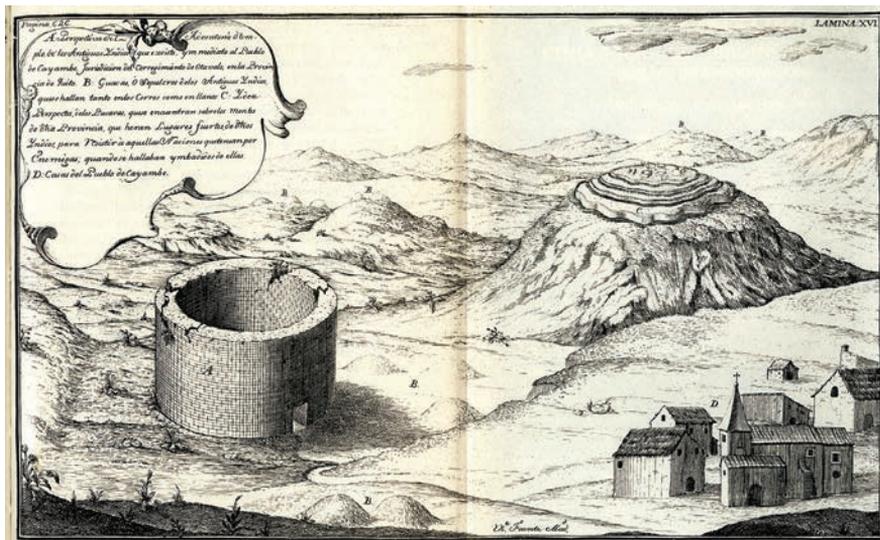


Figura 8.4 Una ilustración en Ulloa y Juan (1748) con la fortaleza de Pambamarca y sus alrededores en Cayambe en la época virreinal que muestra la ocupación temprana de las tierras altas de los Andes, incluyendo los páramos. Grabado: Ulloa y Juan (Wikipedia, licencia CCO 1.0)

La corta estancia de los Incas en el Ecuador antiguo (ca. 1460-1532; Meyers, 1998) impidió un impacto agudo de parte de esta cultura en los páramos; pero la introducción de camélidos, como las alpacas (*Vicugna pacos*), y el desarrollo de nuevos sistemas de riego alimentados por el agua de las alturas andinas en sitios como el moderno Licto, Chimborazo y Cayambe, Pichincha, así como en las tierras altas del valle de Chota, iniciaron un proceso creciente de intervención humana en los sistemas hídricos naturales (Zapatta y Mena-Vásconez, 2013; Knapp, 1988; Bray y Echeverría, 2014; Mena-Vásconez et al., 2020).

La llegada de los españoles trajo tanto elementos como prácticas que siguen teniendo consecuencias profundas en los páramos. Los cultivos tradicionales de las alturas andinas (papas *Solanum tuberosum*, ocas *Oxalis tuberosa*, mashuas *Tropaeolum tuberosum*, mellocos *Ullucus tuberosus*, chochos *Lupinus mutabilis* y quinua *Chenopodium quinoa*) gradualmente fueron dando paso a cereales

Europeos como la cebada, la avena y el trigo, y otros pastos y hortalizas extranjeras. Pero el impacto más grave y directo sobre el páramo fue el arribo de ganado vacuno, caballos, ovejas y cerdos. La intensificación y cantidad de ganado lanar en la época colonial dejó como legado páramos con suelos muy degradados en Cotopaxi y Chimborazo (Larrea, 2006). Hoy, el páramo sigue siendo un paisaje dominado por procesos naturales que evolucionó sin presencia masiva de herbívoros grandes, como sí lo han hecho las sábanas africanas o las praderas norteamericanas. Por otro lado, las especies de ganado introducido tienen adaptaciones que evolucionaron en sus lugares de origen pero que resultaron nocivas para el páramo. Las vacas y caballos son pesados y con sus cascos compactan el frágil suelo, despojándolo de su estructura esponjosa; las ovejas se alimentan de la paja nativa y a veces arrancan los cogollos y desnudan el suelo por completo; los cerdos también remueven la vegetación desde las raíces. Estas prácticas pecuarias fueron de la mano con actividades deletéreas como la deforestación, el desecamiento de humedales y la quema. Se podría decir que el mayor impacto de la Conquista española y el periodo colonial fue el cambio de un modelo conceptual del microverticalismo de las tierras altas andinas a un enfoque horizontal venido del manejo de las mesetas de Castilla, entre otras regiones planas cultivadas de la Península Ibérica. En la agricultura tradicional en el Carchi se trabajó en una 'microverticalidad' (Meyer, 1993), entendida en referencia al manejo de productos agrícolas en espacios (ecológicos) verticales, no como un concepto estático ni esencialista, sino como un conocimiento dinámico, basado en la racionalidad ecológica (Toasa, 2011; Auqui, 2016).

El impacto de estas prácticas se exacerbó a lo largo de la Colonia y República. Los páramos fueron parte de las haciendas, lo que se siente hasta nuestros días cuando todavía hay inmensas propiedades privadas que contienen importantes extensiones del ecosistema. Por un lado, fueron los sitios donde se mantuvieron los rebaños de las especies foráneas, y, por otro, estuvieron entre las tierras a las que se relegaron las comunidades indígenas dentro de diversos mecanismos de usurpación y subyugación. Pero, al mismo tiempo, se fueron convirtiendo en un símbolo de lucha, identidad y poder de las poblaciones andinas originarias (Acosta, 2006; Becker y Tuttilo, 2009).

La llegada de la República (1830) no mejoró las condiciones de vida de las poblaciones indígenas y campesinas marginadas (Becker y Tuttilo, 2009). Las tierras de páramo de las haciendas cambiaron de dueño en algunos casos, antes pertenecientes a órdenes religiosos a nuevos y grandes terratenientes. Unas pocas se deshicieron y pasaron a ser parte de comunidades, muchas veces con procesos de venta injustos y prolongados. La Revolución Liberal y las reformas agrarias tampoco cambiaron la situación de fondo de acumulación y despojo de

la tierra y del agua a las que estaban sometidas las poblaciones indígenas, y más bien parcelaron y comenzaron un proceso de minifundización de muchos de los páramos que tenían una propiedad colectiva. Al declinar del sistema de hacienda a mediados del siglo XX, la estructura tradicional de la comunidad andina sufrió transformaciones esenciales y el sistema de agricultura vertical fue reemplazado por una agricultura de monocultivos y extensiva distribuida horizontalmente, que en ambientes montañosos ha probado ser vulnerable a las epidemias de plagas y enfermedades (Sherwood, 2009). Una extensión indeterminada, pero seguramente notable, también está ocupada por propietarios mestizos individuales, que no pertenecen a organizaciones sociales específicas. La declaración de áreas protegidas, durante la segunda mitad del siglo XX (1970-2000), enfocada en la conservación de la biodiversidad, generó en muchas ocasiones conflictos por la escasa o nula participación de los habitantes locales en la decisión y por conflictos sobre los derechos de uso de las tierras que persisten hasta hoy (Ortiz, 2009). Al menos 30 % del Sistema Nacional de Áreas Protegidas se sobrepone con propiedades individuales o comunales (Himley, 2009).

Posiblemente, el elemento más sobresaliente en los últimos 30 años sea el reconocimiento cada vez más fuerte de la relación del páramo con la provisión de agua para los valles y las ciudades (Manosalvas et al., 2021; Mena-Vásconez et al., 2017; Duarte-Abadía et al., 2023). Desde la propia Constitución (2008) se establece esta relación y la denominación de 'ecosistema frágil', lo que ha ayudado a crear conciencia entre la gente que, a pesar de estar lejos del páramo, utiliza este servicio ambiental fundamental en tierras más bajas para agua de riego, consumo humano e hidroenergía (Manosalvas et al., 2023). Sin embargo, falta mucho para que esta conciencia se haya traducido en una alianza o sinergia entre los diversos actores vinculados al páramo. Es difícil saber cuánto las personas de los campos y las ciudades han internalizado que hay gente en los páramos que muchas veces sobrevive en condiciones precarias que le obligan a desarrollar actividades que precisamente afectan este servicio ambiental. Tampoco se conoce a ciencia cierta cuánto se ha captado que, para mantener una buena cantidad y calidad de agua, hay que colaborar de manera eficaz en la conservación de sus fuentes en los páramos (véase, por ejemplo, Flores et al., 2012).

Por su parte, las poblaciones indígenas y campesinas no siempre tienen las oportunidades, el conocimiento y el financiamiento para evitar actividades reñidas con la salud del ecosistema. Son pocos los casos donde ha habido planes y programas participativos de páramo con los habitantes locales que vayan más allá del objetivo primario de conservar el agua para las tierras bajas y, por otro, que hayan tenido seguimiento y continuidad (Crespo, 2012).

En los últimos tiempos, es sobresaliente la relación que se ha establecido entre el páramo (como ecosistema de montaña) con el cambio climático global (Capítulo 12). Su vínculo con la provisión de agua se refleja también en que el cambio climático podría afectar la capacidad de almacenar y distribuir agua de los suelos de los páramos (Capítulos 2 y 3). Algunas ciudades dependientes de sus páramos como Quito ya piensan en el cambio climático y mencionan sus efectos sobre los páramos y, por ende, sobre su propia provisión hídrica (SAMDMQ, 2020).

Del otro lado, para el sector indígena-campesino el páramo se ha convertido en uno de los íconos de lucha y reivindicación. Esto se ha manifestado, por ejemplo, en hechos como la toma del sistema de riego de Tabacundo, basado en los páramos del volcán Cayambe y construido por la gente local a principios del siglo XX. Esta revuelta de 2006 culminó con el establecimiento de una organización indígena de segundo grado, CODEMIA, que ha manejado el sistema durante los últimos 15 años, siendo el único caso de este tipo en el país (Hidalgo, 2010).

En resumen, la diversidad intrínseca de los páramos ecuatorianos en términos biofísicos también se ha manifestado en términos sociales a lo largo de los siglos de ocupación humana. En algunos casos, el ecosistema se ha mantenido casi prístino, más que nada por las condiciones orográficas y climáticas extremas imperantes; en otros se ha establecido un paisaje cultural dinámico, y en otros se ha generado un panorama profundamente alterado y homogenizado.

El rol del Estado en el páramo a nivel nacional y subnacional

Programas de conservación y uso sostenible de los páramos

Los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) cantonales y provinciales tienen ciertas competencias sobre el uso sostenible y conservación de las zonas de páramo en el país. La Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua¹ (LORHUAA), o Ley de Aguas, en el artículo 12 establece que la protección, la recuperación y la conservación de las fuentes de agua y del manejo de páramos es responsabilidad del Estado y que la Autoridad Única del Agua, los GAD, los usuarios, las comunas, pueblos, nacionalidades y los propietarios de

¹ Ley Orgánica de Recursos Hídricos Usos y Aprovechamiento del Agua, que se encuentra actualmente impugnada pero se mantiene hasta que se apruebe una nueva (<https://www.fao.org/faolex/results/details/es/c/LEX-FAOC165480/>).

predios donde se encuentren fuentes de agua serán responsables de su manejo sostenible e integrado, así como de la protección y conservación de dichas fuentes. Lastimosamente, por falta de conocimiento sobre las dinámicas específicas de cada páramo, esta responsabilidad se ha traducido, especialmente en programas de forestación y aforestación, que ejecutan muchos GAD provinciales, sin que se conozcan todavía los impactos negativos que puedan tener estos programas sobre el ecosistema en el mediano y largo plazo (Segovia-Salcedo, 2011).

Para cumplir con la función de la protección de fuentes, los GAD pueden conformar mancomunidades y consorcios. Por ejemplo, el Consorcio Andino para la Cosecha y Siembra del Agua² fue creado en 2020 y agrupa a las prefecturas de Imbabura, Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua y Chimborazo, las que trabajan en conjunto por el cuidado de los páramos en beneficio de la población de las cuatro provincias. Uno de los principales objetivos del consorcio es el inventario hídrico de las cuatro zonas, aparte de gestionar recursos financieros ante organismos internacionales.

Los GAD tienen la autonomía de crear Áreas de Conservación y Uso Sustentable³ (ACUS) de importancia local, en alianza con comunidades o propietarios privados, con el fin de conservar la biodiversidad y desarrollar actividades sustentables para garantizar el mantenimiento de los servicios ecosistémicos que benefician a la vida humana. Las ACUS incluyen aquellos predios de propiedad de los GAD, las comunidades o las personas naturales o jurídicas que aporten a la conservación de la biodiversidad. Un ACUS puede mantenerse bajo esta categoría o puede optar por convertirse en un área protegida dentro del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP).

Un ejemplo es el Área de Conservación y Uso Sustentable-Municipal Íntag Toisán (ACUS-MIT), creada en 2019 mediante una ordenanza del Concejo Municipal de Cotacachi. Esa decisión sigue la ordenanza que declaró a Cotacachi como Cantón ecológico en 2008 por su valor ambiental, hídrico y cultural (Dupuits, 2021). El ACUS-MIT, con 126.967 ha, tiene como objetivo la protección, el manejo sustentable y la restauración de las fuentes de agua, las zonas de recarga hídrica, los bosques, los páramos y las zonas agroproductivas. El ACUS-MIT tiene su propio comité de gestión conformado por representantes del municipio de Cotacachi, la Asamblea de Unidad Cantonal, las juntas parroquiales y los representantes de las 21 microcuencas que existen en Íntag.

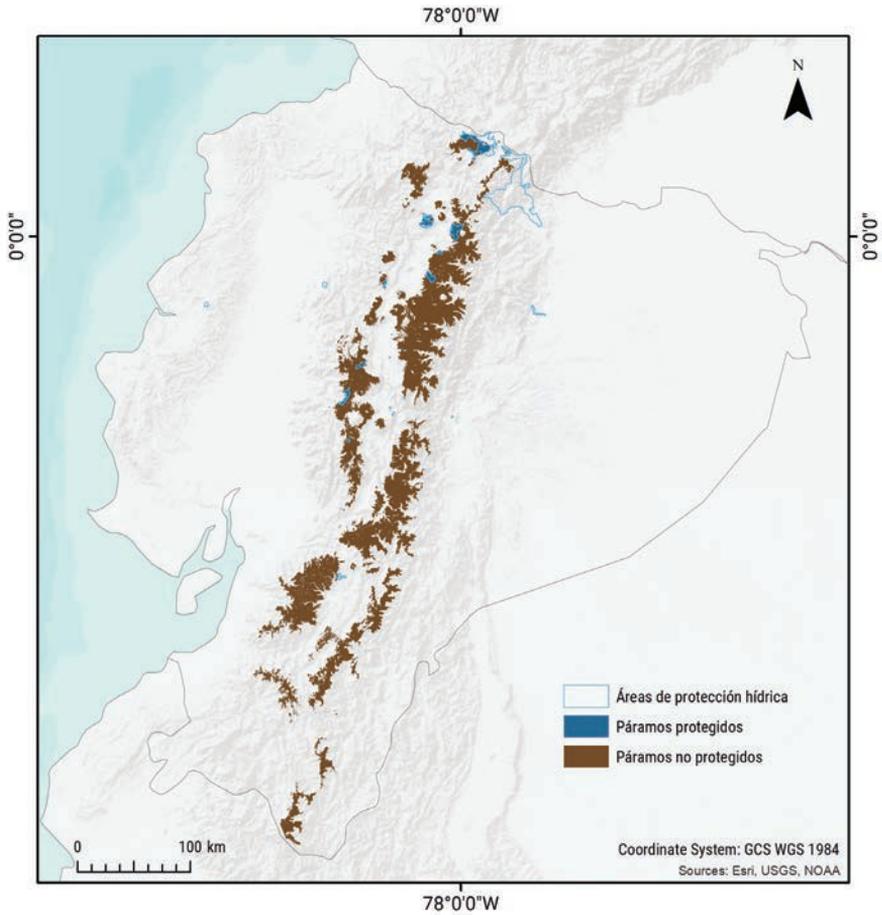
² Consorcio Andino del Agua eligió a su primer presidente (<https://www.diariolosandes.com.ec/consorcio-andino-del-agua-eligio-a-su-primer-presidente/>).

³ Acuerdo Ministerial 83 Registro Oficial Suplemento 829 de 30-ago.-2016. Procedimientos para la declaración y gestión de áreas protegidas.

Políticas y programas de conservación estatales sobre el páramo

La Ley de Aguas reconoce el papel de las organizaciones comunitarias en la gestión y conservación de los recursos y servicios hídricos. En este marco, la antigua Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA) y ahora el MAATE ha estado apoyando la creación de Áreas de Protección Hídrica (APH) “como los territorios donde existen cuencas hidrográficas declaradas de interés público para su mantenimiento, conservación y protección, que abastecen el consumo humano o garantizan la soberanía alimentaria. Serán parte del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP)” (SENAGUA, 2019). Uno de los objetivos es declarar APH en las cuencas amenazadas por actividades agroindustriales y mineras (*El Telégrafo*, s.f.). Hasta la fecha, en el país se han establecido 14 APH que cubren una superficie de 61 729,18 ha de ecosistemas nativos, con el objetivo de garantizar la dotación de agua como elemento esencial para la vida de los seres humanos y la naturaleza (*El Telégrafo*, s.f.). Su importancia para el páramo se ilustra por el hecho que 12 de las APH incluyen un total de 40 128 ha de páramo (Figura 8.5). La meta que tiene el gobierno actual es alcanzar las 250 000 ha bajo la categoría de APH (Óscar Rojas, Viceministro de Agua, MAATE, com. pers.). A pesar de que la intención es buena, muchas de estas APH han sido declaradas sobre páramos, pero lastimosamente no se ha cumplido con el proceso de consulta previa a las comunidades dueñas de las tierras ni los propietarios privados, lo que ha llevado a oposiciones por parte de las poblaciones locales, que en muchos casos ya tenían la intención de declarar APH sobre sus tierras. Un ejemplo claro de rechazo hacia la declaración de APH por el Estado es el APH del territorio Kayambi, declarado en 2018, pero cuestionado por los pueblos por la falta de consulta (Dupuits y Mancilla García, 2022). Lo mismo ocurrió en la comuna La Esperanza, en la provincia de Carchi, donde se hizo la declaratoria de APH sin consulta, a pesar de que la comunidad ya tenía esa intención y estaba en el proceso de hacerlo (Susan Poats, Grupo Randi Randi, com. pers.).

Otras iniciativas de conservación de los páramos y su financiamiento son los fondos de agua como el Fondo para la protección del Agua de Quito (FONAG), que tiene más de veinte años. Sin embargo, la contribución que hacen los usuarios a través de un porcentaje de la tarifa no es suficientemente conocida por la población, lo que impide una concientización ciudadana alrededor del cuidado de las fuentes hídricas en general, y de los páramos, en específico. Los fondos de agua son considerados exitosos y se ha replicado la experiencia de FONAG a otros cuatro fondos en el país que están en zonas de páramo. Los Fondos han creado programas de monitoreo, educación y productivos en las áreas de influencia, pero hay algunos estudios que se preocupan por la exclusión de los



Nombre	Área APH	Área de páramo	%
Chini-Déleg	2119,74	507,35	24 %
Kayambi	9920,56	9564,18	95 %
Mojanda	6097,03	4124,08	68 %
Mojandita Curubí	549,73	110,34	20 %
Norte del Ecuador	30 542,72	16 170,60	53 %
Ponce Palaguillo	4260,63	3968,70	93 %
Quinllunga de San Simón-Guaranda	556,58	521,05	94 %
San Isidro	1071,98	1071,98	100 %
San Jorge de Patate	215,13	18,90	9 %
Santa Elena	166,50	166,50	100 %
Simiátug	4092,78	3905,32	95 %

Figura 8.5 Áreas de Protección Hídrica en el Ecuador y su relación con los páramos. Dirección de Información Ambiental y del Agua, MAATE

actores en la toma de decisiones y en su gobernanza (véanse posiciones diversas al respecto en, por ejemplo, Zyla, 2018; Rodríguez de Francisco, 2013; Wiegant et al., 2022; Duarte-Abadía et al., 2023).

Otro incentivo estatal para la conservación de los ecosistemas de páramo es el Programa Socio Bosque (PSB), creado mediante Acuerdo Ministerial 169 en 2008; es un esquema de conservación que, si bien entrega incentivos económicos por superficie que buscan mejorar las condiciones de vida de los propietarios al tiempo de mantener los ecosistemas, ha tenido resultados mixtos (Hayes et al., 2022). En la actualidad, el subcapítulo Páramo tiene 257 convenios suscritos que abarcan 52 423,64 ha. Además, bajo el mismo esquema, existen 45 convenios que incluyen una asociación bosque-páramo y que mantienen 78 525,33 ha bajo conservación.⁴

Un esquema de conservación reconocido internacionalmente, aplicado a los páramos y que expresamente incluye la relación naturaleza-cultura son las Reservas de Biosfera, sitios reconocidos por la UNESCO que innovan y demuestran la relación entre el ser humano con la naturaleza en el afán de conjugar conservación y desarrollo sostenible. Actualmente, el Ecuador cuenta con siete Reservas de la Biosfera. Una de ellas es El Macizo del Cajas, que se encuentra en el sur occidente del Ecuador y es parte de la red mundial de Reservas de Biosfera (Loaiza, 2022). Cuenta con una extensión de casi un millón de hectáreas e incluye zonas de páramos, humedales, manglares y ecosistemas marinos en las provincias de Azuay, Cañar, El Oro y Guayas. Otro ejemplo ilustrativo es la Reserva de Biosfera del Podocarpus-El Cóndor que fue creada en el 2007. Está ubicada entre las provincias de Loja y Zamora, con una extensión aproximada de 1 140 000 ha, y es el punto de concentración de diversos ecosistemas y una importante fuente de recursos hídricos para grandes comunidades de Ecuador y Perú.

Políticas de desarrollo agrícola y ganadero en el páramo (MAG)

Un marco jurídico que tiene influencia sobre la regulación de actividades productivas en zonas de páramo es la Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales (2016).⁵ Esta regula la posesión, la propiedad, la administración y la redistribución de la tierra rural como factor de producción para garantizar la soberanía alimentaria, mejorar la productividad, propiciar un ambiente sustentable y equilibrado, y otorgar seguridad jurídica a los titulares de derechos. Además, garantiza la propiedad de las tierras comunitarias, el reconocimiento, la adjudicación y la titulación de tierras y

⁴ Ecosistema Páramo: Socio Bosque (<https://www.ambiente.gob.ec/programa-socio-bosque/>).

⁵ Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales (<https://www.asambleanacional.gob.ec/es/multimedios-legislativos/37677-ley-organica-de-tierras-rurales-y>)

territorios de comunas, comunidades, pueblos y nacionalidades indígenas, pueblo afroecuatoriano y pueblo montubio, de conformidad con la Constitución, convenios y demás instrumentos internacionales sobre derechos colectivos.

Hay que resaltar que el art. 50 habla sobre el límite de ampliación de la frontera agrícola:

No se permitirá el avance de la frontera agrícola en los páramos no intervenidos que se encuentren sobre los 3300 metros de altitud sobre el nivel del mar, al norte del paralelo tres latitud sur, y sobre los 2700 metros de altitud, al sur de dicho paralelo; y en general, en áreas naturales protegidas y particularmente en los territorios con alta biodiversidad o que generen servicios ambientales.

Esta delimitación es sumamente importante de consensuar entre poblaciones que habitan en el páramo y cuyas necesidades de tierra y agua no pueden ser negadas, así como la de conservar los servicios ecosistémicos del páramo. Son estas dos visiones las que necesitan compaginarse.

Además, es claro que una visión que se le atribuye al agua y al territorio se vincula con el enfoque productivo hacia la soberanía y seguridad alimentarias, que es defendido tanto por las comunidades campesinas como por las autoridades gubernamentales a nivel local. Por ejemplo, en Cangahua, Pichincha, se desarrolla el proyecto Territorio Demostrativo Cangahua⁶ que tiene el propósito de lograr el desarrollo productivo de la zona con enfoque de derechos, sostenibilidad ambiental y equidad de género, apoyado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). El objetivo del proyecto es diversificar la producción con el uso de prácticas agroecológicas y tecnologías sostenibles.

Algunos ejemplos de políticas de desarrollo local para las poblaciones de páramo

Existen varios programas estatales que buscan responder a las necesidades socioculturales de las poblaciones de páramo. Por un lado, el Ministerio de Educación y Cultura fomenta políticas de educación ambiental que involucran la participación de habitantes del páramo ecuatoriano. El Programa *Tierra de Todos*,⁷ en alianza con el Fondo de Agua de Quito (FONAG), se enfoca en el reconocimiento de la importancia del páramo como ecosistema clave para el cuidado del agua

⁶ Proyecto de Territorios Demostrativos se presenta en Cangahua, cantón Cayambe, Ministerio de Agricultura y Ganadería.

⁷ Acuerdo MINEDUC-00011-A/2018. Programa de Educación Ambiental "Tierra de Todos".

como un bien común.⁸ Tiene como objetivo promover y fortalecer la cultura y la conciencia ambientales en la comunidad educativa a través de la formación de ciudadanos y ciudadanas ambiental y socialmente responsables, y comprometidos con el bienestar de las generaciones presentes y futuras. Además, el 23 de junio se celebra el Día Nacional de los Páramos como una oportunidad para abrir espacios de aprendizaje y reflexión para fortalecer la conciencia ambiental en toda la sociedad (más detalles en el Capítulo 7).

El Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI) tiene un rol importante en la promoción de la vivienda sostenible en las ciudades que dependen de las fuentes de agua del páramo, así como en el desarrollo de proyectos de acceso al agua potable en las comunidades del páramo. Por ejemplo, el proyecto regional de agua potable Pesillo-Imbabura nace de una lucha histórica en los años noventa por los pueblos indígenas de dos provincias (Imbabura y Pichincha) para acceder al agua potable en un contexto de alta escasez del recurso hídrico por la presión causada por los usos productivos, agropecuarios e industriales (Hidalgo et al., 2017; Dupuits, 2021). El proyecto involucra a 156 comunidades con pequeños sistemas de agua, a su vez organizados en 14 juntas regionales, en alianza con los cinco cantones de Ibarra, Antonio Ante, Otavalo, Pedro Moncayo y Cayambe. El proyecto beneficiará a cerca de 300 000 personas, con una dotación de 200 l por habitante y día. Sin embargo, una vez concluido el canal, la administración ha sido entregada a los GAD y se ha eliminado la posibilidad de una cogobernanza en el manejo y administración del canal con comunidades indígenas que establecieron sus derechos de propiedad en base a los cientos de mingas, su fuerte organización y sus luchas por lograr el financiamiento y ejecución de este proyecto (Megens et al., 2022).

Pueblos indígenas, campesinas y campesinos como guardianes del páramo

Organización local y nacional (indígena y campesina)

Desde su creación en 1986, la Confederación de Nacionalidades Indígenas del Ecuador (CONAIE) es la organización representativa a nivel nacional de las nacionalidades, pueblos, comunidades, centros y asociaciones indígenas del país.⁹

⁸ <https://educacion.gob.ec/mineduc-y-fonag-celebran-el-dia-nacional-de-los-paramos/#:~:text=Este%2023%20de%20junio%20se.estos%20ecosistemas%20tropicales%20de%20altura>

⁹ www.conaie.org/quienes-somos.

Tiene como objetivos consolidar a los pueblos y nacionalidades indígenas del Ecuador, luchar por la tierra, los territorios indígenas y los recursos naturales, y promover una educación propia (intercultural bilingüe) y la identidad cultural de los pueblos indígenas. La mayor forma de organización social promovida es la autogestión sobre el territorio, la tierra y los recursos comunes, en articulación con sus demandas respecto a los páramos y el agua. Otros principios claves son la participación social mediante el establecimiento de una democracia participativa, la descentralización del poder y los recursos económicos, la solidaridad y la equidad.

Una de las principales organizaciones dentro de la CONAIE, que también contribuyó a su creación, es la Confederación de Pueblos de la Nacionalidad Kichwa del Ecuador (ECUARUNARI), que agrupa a la mayoría de los pueblos indígenas de la Sierra del país. Se constituyó formalmente en la comunidad de Tepeyac, provincia de Chimborazo, en junio de 1972. Sus antecedentes se encuentran en las luchas campesinas que tuvieron lugar en haciendas y comunidades en demanda del cumplimiento de la primera Ley de Reforma Agraria en el 1964.¹⁰ Sus principales misiones son luchar por el derecho a la tierra, el derecho a la educación bilingüe, por autoridades propias en provincias y zonas de mayoría indígena, respeto a la cultura indígena, y la mejora de las comunidades y la economía indígena.

La CONAIE ha venido desarrollando propuestas claves a nivel nacional para la protección comunitaria de los páramos. Por ejemplo, frente a la inconstitucionalidad de la Ley de Agua del 2014, la CONAIE diseñó una propuesta para una nueva Ley de Agua que integra las demandas comunitarias e indígenas. La propuesta de Ley de Agua de la CONAIE está estructurada en 11 títulos, que desarrollan temas como la organización y gestión comunitaria de los recursos hídricos, el derecho a la consulta y la resolución de conflictos.¹¹

Otra organización con importancia en el páramo es la Confederación Nacional de Organizaciones Campesinas, Indígenas y Negras (FENOCIN). FENOCIN agrupa a 60 uniones de organizaciones de segundo grado, con más de 1300 organizaciones y 2200 comunidades de base, 500 mil familias, con presencia en 20 provincias.¹² Empezó como confederación de campesinos (FONOC), pero en 1988 se reconoció la importancia de la presencia indígena al interior de la Federación, resolviéndose cambiar su denominación por Federación Nacional de Organizaciones Campesinas-Indígenas, con las siglas FENOC-I; en febrero de 1997 se decidió la incorporación de la letra N, con lo

¹⁰ <http://www.llacta.org/organiz/ecuarunari/>

¹¹ <https://www.lahora.com.ec/pais/proyecto-ley-agua-recursos-movilizacion/>

¹² <https://www.fenocin.org/informacion-institucional/quienes-somos/>

que la Federación pasó a denominarse FENOCIN, para reconocer su carácter pluriétnico e intercultural. La FENOCIN tiene como objetivo principal incidir en las políticas nacionales, regionales y locales para impulsar el desarrollo sostenible y la soberanía alimentaria con equidad e identidad, y promover la interculturalidad como nueva forma de vida para lograr el Sumak Kawsay y la transformación del país.

Propuestas locales de manejo, uso y conservación de páramos

Con base en las organizaciones de segundo grado que representan a las comunidades indígenas y campesinas del país, actores no indígenas o mestizos, y de manera individual e independiente se han propuesto varias iniciativas pioneras de conservación y manejo comunitario de los páramos y el agua que se reflejan en planes de desarrollo municipales y planes de vida de comunidades indígenas en Carchi, Imbabura, Cotopaxi, Bolívar, Chimborazo, Tungurahua, Azuay y Loja. En el Ecuador, los páramos son las únicas áreas en las montañas altoandinas donde la propiedad comunal de la tierra existe junto con otras formas de tenencia pública (como son las áreas protegidas) y grandes propiedades privadas (Medina y Mena-Vásquez, 2001).

Un ejemplo de un páramo con propiedad comunitaria es la experiencia del Comité de Páramo Nukanchik Urku (CPNU) en Cayambe. El CPNU fue creado en 1995 como una iniciativa intercomunitaria que administra 4380 ha de páramo para mejorar la disponibilidad del agua, tanto para riego como para consumo humano (López-Sandoval y Maldonado, 2019). Ha desarrollado reglas para la gestión colectiva de los recursos, manteniendo un alto nivel de autonomía frente a las iniciativas gubernamentales de conservación (Boelens et al., 2014; Hayes et al., 2017). El páramo de Nukanchik Urku ('Nuestra Montaña' en Kichwa) está ubicado en la parroquia de Cangahua, en la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Cayambe Coca. Los residentes, en su mayoría indígenas del pueblo Kayambi, están organizados en comunas y asociaciones que fueron reconocidas legalmente después de la entrada en vigor de las Reformas Agrarias del Ecuador (1964 y 1973) (Figura 8.6). En los últimos años, gracias a los esfuerzos del Comité de Páramo, se ha reducido en alguna medida la presión sobre las tierras agrícolas y de pastoreo en los páramos con base en los cambios en las estrategias de subsistencia, el conocimiento de la conservación del páramo, los cambios históricos en el uso de la tierra y el reconocimiento de la autoridad comunitaria (Dupuits y Mancilla García, 2022), que hace cumplir los derechos territoriales y de agua (véase Boelens y Seeman, 2014).



Figura 8.6 Asamblea comunitaria del comité de páramos Nukanchik Urku. Fotografía: Cecilia Puertas

Otro ejemplo de iniciativa comunitaria de conservación del páramo es la declaratoria por la antigua Secretaria del Agua (SENAGUA) en el 2018 del Área de Protección Hídrica (APH) en el territorio Kayambi. Tiene una superficie total de 9702 ha y beneficia a cuatro comunas, tres comités de desarrollo e indirectamente a todos los habitantes del cantón Cayambe. Está conformado por áreas de páramo en la frontera con las áreas protegidas del Parque Nacional Cayambe Coca, lo que lo convierte en un corredor de conectividad y una zona de amortiguamiento clave. Uno de los objetivos del APH Kayambi es valorar el trabajo voluntario y recíproco de los comuneros y comuneras, llamados *Urku Kamas* o Guardianes del Páramo, para la protección del ecosistema vital.

La declaratoria del APH Kayambi se hizo, inicialmente, a partir de los derechos constitucionales de la jurisprudencia indígena y del conocimiento de las comunidades sobre su territorio hídrico (Villacís y Cachipiendo, 2021). Eso se ha convertido en una demanda de la CONAIE en el proceso actual de reforma de la Ley de Agua. Pues plantea la posibilidad de que los pueblos y nacionalidades en su jurisdicción puedan establecer APH basados en el derecho comunitario y los mecanismos complementarios para proteger los recursos hídricos en territorios de jurisdicción indígena (Solís, 2020). Sin embargo, algunos líderes indígenas denunciaron la transformación de la propuesta inicial en una herramienta legal

alejada de las demandas políticas y territoriales del pueblo Kayambi (Dupuits y Mancilla García, 2022). Algunos líderes incluso pidieron la derogación de la APH debido a las tensiones políticas y la desconfianza. Si bien la APH Kayambi todavía existe, carece de la legitimidad suficiente para generar un diálogo entre las autoridades y las comunidades.

Finalmente, como se ha mencionado, un mecanismo para la conservación de páramos en el Ecuador son los Fondos de Agua. El Fondo de Páramos Tungurahua y Lucha contra la Pobreza¹³ (FMPLPT) es un mecanismo financiero provincial diseñado para apoyar la protección, la restauración y la conservación del ecosistema de páramo como principal fuente de agua de Tungurahua, y el mejoramiento de la calidad de vida de comunidades indígenas y campesinas que habitan junto a él. Nació en el 2008 por iniciativa del gobierno provincial, varias organizaciones indígenas y campesinas representadas por sus movimientos provinciales MIT-MITA-AIET, ONG y organizaciones de cooperación. En este fondo, los movimientos indígenas tienen voz y voto en la toma de decisiones del Consejo Directivo. Desde hace 14 años opera como el mecanismo financiero que canaliza los esfuerzos y los recursos de instituciones públicas y privadas hacia las comunidades, a través de la implementación de Planes de Manejo de Páramo.

Reconocimiento de los habitantes de páramo y sus valores como los principales actores para su manejo y conservación

En las últimas décadas, a nivel internacional se ha producido un cambio desde la visión del páramo como zona de conservación estricta hacia el reconocimiento del rol de los habitantes del páramo en su manejo y conservación (Hofstede et al., 2014). Una manera de reconocer a los habitantes del páramo como un actor clave para su manejo y conservación es promover y lograr el reconocimiento de sus valores pluriculturales, además de sus valores ambientales, ecosistémicos y sociales.

Por un lado, existe un valor cultural del agua y el páramo ligado a principios de reciprocidad y las capacidades socioorganizativas de las comunidades indígenas y campesinas. La reciprocidad es uno de los valores centrales en la reproducción de la organización comunitaria y la conservación del agua en el páramo andino (Manosalvas et al., 2021). Por otro lado, esos valores pueden entrar en dinámicas de negociación o resistencia con la visión tecnicista, económica o político-jurídica de los servicios ecosistémicos defendida mayoritariamente por los actores públicos o privados.

¹³ <http://www.fondotungurahua.org.ec>

Un ejemplo concreto para el reconocimiento de los valores diversos sobre el páramo es la propuesta de un Fondo Plurinacional del Agua, lanzada en el 2018 por la Confederación del Pueblo Kayambi, junto con un comité técnico integrado por la Fundación Kawsay, el Instituto de Ecología y Desarrollo de Cayambe (IEDECA) y el Gobierno Municipal de Cayambe (GADIP). Esta propuesta tiene como objetivo integrar centros urbanos, industrias florícolas y empresas privadas en la conservación de los ecosistemas de páramos, así como redistribuir los beneficios para el desarrollo social de las comunidades indígenas y la resiliencia comunitaria. Inicialmente denominada *Reciprocidad del Agua*, esa propuesta es innovadora al priorizar la dimensión clave de la reciprocidad, la participación y el fortalecimiento socioorganizativo de las comunidades en el mecanismo de conservación del agua.

Para la construcción del Fondo Plurinacional del Agua fue necesaria la colaboración de actores con visiones complementarias o antagónicas sobre el agua y el páramo (Dupuits y Mancilla García, 2022). Para conocer la situación del agua en el territorio, se desarrollaron estudios tecnocientíficos que puedan ser reconocidos como legítimos por los diferentes actores involucrados. Sin embargo, el componente socioorganizativo y el valor de la reciprocidad quedaron marginados al momento de estudiar la prefactibilidad del fondo, modelos de gestión y planes financieros, contribuyendo a crear rechazo y desconfianza por parte del pueblo Kayambi. Por lo tanto, el reconocimiento de los valores pluriculturales de los páramos va de la mano con procesos de negociación con otros valores basados en conocimientos tecnocientíficos y ambientales.

Nuevos actores privados en el páramo: la minería y la floricultura

La taxonomía de los actores en el páramo y su análisis puede ser una tarea compleja porque los posibles criterios para determinarla son muchos y variados.¹⁴ Sin embargo, aquí nos referiremos a los actores humanos e institucionales y, específicamente, a los actores independientes o ‘privados’ de la sociedad civil, es decir, no estatales.

La categoría de actores privados es compleja. Se puede decir que la propiedad comunitaria es privada pero no individual (Corea et al., 2003). Aunque hay familias rurales que tienen las escrituras individuales y podrían llamarse por tanto actores privados. En algunos casos los propietarios privados corresponden a haciendas e industrias agrícolas.

¹⁴ Hasta se podrían incluir los actores no humanos (los *actants* de Latour [por ejemplo, 2017] o ‘más-que-humanos’ [Haraway, 2016]), como el agua, las vacas, el suelo o el calentamiento global.

En resumen, ha habido cambios legales, climatológicos, socioeconómicos, políticos e institucionales relacionados con el ecosistema de páramo. Las reformas agrarias (1964, 1973) y la modernización de la agricultura han marcado un cambio de época en los valles y páramos de la Sierra, se ha acentuado la privatización de la tierra, la creación de los ‘productores’ y ‘consumidores’ en la agricultura y alimentación, así como las relaciones inequitativas entre lo urbano y lo rural, debido a las altas demandas de agua, entre otros (Manosalvas et al., 2021). Aquí se mencionan dos actores del sector privado que han cobrado relevancia en los últimos veinte años, que corresponden al sector de la floricultura y la minería.

Quienes se dedican a las actividades florícolas son actores indirectos porque estas no se llevan a cabo en el páramo propiamente dicho. Muchas de ellas eran haciendas que han ido dejando sus actividades agropecuarias desde hace unos 40 años para dedicarse especialmente al cultivo de rosas de exportación. Las rosas aprovechan precisamente aguas que, en buena parte, vienen de sistemas de riego nacidos en los páramos. Esta característica ya ha causado más de un conflicto con las comunidades que reclaman agua desde un punto de vista de soberanía alimentaria y autodeterminación, frente al discurso modernista y de eficiencia de la agroindustria (Mena-Vásquez et al., 2016). La mencionada toma de la acequia Tabacundo, a cargo hasta entonces del municipio de Pedro Moncayo, por parte de la organización comunitaria de segundo grado CODEMIA en 2006, es un hito en este sentido (Hidalgo, 2010).

Figura 8.7 Las pequeñas florícolas de exportación manejadas por familias campesinas en la zona de Cangahua, Cayambe, se entremezclan con el paisaje tradicional y ya alcanzan los pajonales tras el *boom* de esta actividad debido principalmente a la pandemia del covid-19. Fotografía: Patricio Mena-Vásquez



Sin embargo, acelerando drásticamente un fenómeno que ya había empezado hace aproximadamente una década, tras la pandemia ha habido una explosión de pequeñas florícolas familiares en las comunidades de zonas como Cayambe y Tabacundo, algunas de las cuales están el borde mismo de los pajonales de sitios como Mojanda y Cangahua (Figura 8.7). Este fenómeno, dentro de las variadas connotaciones político-ecológicas que tiene, hace que las actividades florícolas estén adquiriendo una relación mucho más directa con el ecosistema que deberá analizarse (Mena-Vásquez et al., *in prep.*).

Las florícolas industriales utilizan certificaciones para cumplir con la responsabilidad ambiental y social que pregonan más allá de las exigencias oficiales. Existen diversas normas de responsabilidad en las cuales los efectos sobre la calidad del agua son uno de los criterios centrales. Sin embargo, estos estándares incluyen solamente las instalaciones mismas y, en el mejor de los casos, sus inmediaciones. En otras palabras, no consideran el paisaje más amplio, y, por tanto, las fuentes de las que proviene el agua. En las mencionadas certificaciones se habla de la calidad del agua, pero no se incluyen consideraciones ecosistémicas. Así, un elemento esencial para la existencia misma de esta agroindustria, el páramo, queda totalmente fuera (Mena-Vásquez et al., 2018, Mena-Vásquez et al., 2020, Vos et al., 2019).

El páramo también es víctima del extractivismo. Las concesiones mineras amenazan a este territorio y a su gente (Capítulo 10). La minería es vista por los gobiernos como una de las más prometedoras salidas a la persistente crisis económica del país. La Constitución, en el artículo 406, declara que los páramos son ecosistemas “frágiles y amenazados” y, en el artículo 407, que en las “zonas declaradas como intangibles” no se permite actividad extractiva de recursos no renovables (incluida la minería), a no ser que la Presidencia y la Asamblea declaren estas actividades como de interés nacional.

Esta ambigüedad hace que el páramo (y otros ecosistemas) queden en una especie de limbo que permite que en ellos se realicen de hecho actividades extractivas no renovables de diverso tipo (oro, suelo, rocas, etc.; Figura 8.8), lo que ya ha generado episodios como los de Quimsacocha y Río Blanco, así como procesos de consulta popular en la provincia del Azuay y en el Distrito Metropolitano de Quito (Puertas, 2017).

Por último, según Narváez (2011, p. 263), “los páramos son frecuentemente áreas con paisajes y elementos naturales atractivos. Sabemos, en términos generales, que va en aumento el interés de las personas por visitar las zonas naturales y las áreas protegidas, incluyendo el páramo. Lamentablemente, no se tienen datos exactos sobre cuánta gente visita específicamente este ecosistema en el Ecuador”. En efecto, para el (eco)turismo, una actividad realizada

tanto por empresas privadas como por comunidades, no hay estudios que demuestren no solo sobre la visitación sino sobre los ingresos que esta actividad bien manejada genere, ni tampoco sobre los impactos que pueda estar teniendo en los páramos.



Figura 8.8 Minería en los páramos del Ecuador: camión de transporte de piedras en el Parque Nacional Antisana. Fotografía: Esteban Suárez Robalino

Conclusiones: el futuro de los páramos como territorios sacionaturales

Existe un gran vacío en cuanto a las investigaciones y propuestas de políticas y manejo que miren al páramo como un paisaje cultural, un socioecosistema o un territorio hidrosocial (Mosquera et al., 2023). Hay poco entendimiento sobre las contribuciones ecológicas de los páramos y las consecuencias sociobiológicas para los humanos. Es evidente, que, en un país tan complejo, cultural, socioeconómica y políticamente hay una enorme necesidad de propuestas más integrales para el manejo de los páramos y el desarrollo sostenible para sus habitantes.

Esta integralidad debe partir desde el concepto mismo de páramo y luego acompañar a los procesos de establecimiento de su marco legal, propuestas de políticas, así como en la planificación concreta y real. Lo ideal, entonces, es que los aspectos históricos, sociales y culturales no sean capítulos aparte en

los planes de páramos, sino que surjan de una construcción colectiva, diversa, heterogénea y transdisciplinaria.

La recuperación de las prácticas ancestrales y de los saberes de pueblos indígenas debe ser combinada con la ciencia y la tecnología, para que podamos encontrar nuevas formas en el uso y manejo, así como de cogobernanza sobre estos territorios, donde se hagan pilotajes de propuestas innovadoras.

Hasta ahora, muchas de las iniciativas de conservación de páramo que vienen del Estado, de las empresas de agua o de las comunidades indígenas y campesinas parecen divergir en cuanto a su enfoque y parecen ser construidas 'de espaldas' a los otros actores. Se deben buscar las oportunidades sociales y políticas para lograr espacios de diálogo inclusivo entre los distintos saberes y valores del páramo (Figura 8.9).



Figura 8.9 Las iniciativas de conservación de los páramos ecuatorianos deben basarse en un diálogo inclusivo entre los distintos valores y saberes de todos los actores. Fotografía: Robert Hofstede

—CAPÍTULO 9

AGRICULTURA Y PÁRAMOS EN EL CENTRO-NORTE DEL ECUADOR: CULTIVO DE LAS TIERRAS ALTAS, AMENAZAS AMBIENTALES Y OPORTUNIDADES PARA EL FUTURO

Stephen Sherwood | Myriam Paredes | Pedro Oyarzún |
Ross Borja

Cultivo de cebolla larga en Cangahua, Cayambe, Pichincha.
Fotografía: Robert Hofstede





Resumen

Ante una crisis alimentaria en las ciudades y una población precaria creciente en el campo, como estrategia de desarrollo rural, el Estado ecuatoriano invirtió en desarticular las haciendas menos productivas y poner en manos de las familias rurales la tenencia de la tierra. Con la Ley de Reforma Agraria y Colonización de 1964, el Ecuador introdujo un proyecto ambicioso de ‘modernizar’ el sector rural a través de la imposición del uso de la moneda y la integración al mercado comercial, junto con una agresiva promoción de conocimientos y tecnologías expertas.

A pesar de un marcado éxito inicial que aumentó la producción por área, a través de los últimos 60 años la biodiversidad de los campos agrícolas se ha reducido. Esto responde a la lógica de priorizar los cultivos alimentarios más comerciales dependientes del uso de variedades formalmente seleccionadas, fertilizantes y plaguicidas sintéticos y la mecanización del suelo, para compensar por una producción más orientada a los mercados que a cuidar las ecologías y los ecosistemas. Para identificar las dinámicas actuales del agro de las tierras altas de los Andes y sus implicaciones para la conservación de los páramos, en este capítulo utilizamos una serie de investigaciones para examinar tres tendencias concurrentes: la agricultura familiar de papas comerciales en Carchi, la producción industrial de flores en el norte de Pichincha, y la agricultura comunal en Chimborazo.

Tradicionalmente, la actividad agropecuaria de las haciendas, comunidades indígenas y familias campesinas se ha basado en los cultivos que toleran las condiciones extremas de las zonas altas de la Sierra, incluyendo el pastoreo de ganado de engorde y leche, la producción de papas y otras raíces y tubérculos y ciertos granos, cereales y legumbres. En los últimos 60 años, luego de la reforma agraria, ha habido una continua exclusión social de los pequeños productores familiares a los beneficios de la sociedad y una acelerada degradación ambiental. Con el cambio climático, la frontera agrícola de la Sierra parece estar avanzando hacia los pisos superiores. Además, encontramos la llegada de un nuevo actor al escenario de la agricultura de altura: la agroindustria. Con la crisis bancaria de 1999, muchas zonas rurales de la Sierra han experimentado una emigración, generando múltiples dinámicas como escasez y feminización de la mano de obra, y abandono y consolidación de tierras por propietarios locales e inversionistas dedicados a la producción comercial de verduras europeas, árboles y flores. Si bien esta actividad ha generado empleo asalariado, también nuevos riesgos socioambientales.

Hay que resaltar la llegada de contramovimientos influyentes a lo largo de la Sierra, incluyendo los temas de agroecología y consumo responsable. Estos se

han organizado para la rehabilitación de áreas degradadas y la creación de sistemas alimentarios “más sanos, saludables y sostenibles”, mostrando que una co-producción de alimentos socialmente justos y ambientalmente amigables no solo es posible, sino que ya existe, aunque sea solo en los márgenes sociales del país. Concluimos que un futuro más promisorio para la protección de los páramos depende de una sociedad más comprometida y capaz de balancear sus deseos por el crecimiento económico y la prioridad de rehabilitar, y restaurar los ecosistemas de los que todos dependemos.

Summary

Faced with urban food crises and growing rural population, the Ecuadorian state invested in dismantling the less productive haciendas and transferring land tenure to rural families. With the 1964 Agrarian Reform and Colonisation Law, Ecuador introduced an initiative to ‘modernise’ the rural sector by imposing the use of currency and integration into the commercial market along with an aggressive promotion of expert knowledge and technologies. Despite an initial marked success in increasing production per area, over the last 60 years the biodiversity of agricultural fields has been reduced. This responds to the logic of prioritizing more commercial food crops dependent on the use of formally selected varieties, synthetic fertilisers and pesticides, and soil mechanisation, to compensate for production that is more market-oriented than caring for the ecologies and ecosystems on which agriculture and agri-food systems ultimately depend. To identify the current dynamics of Andean highland agriculture and their implications for páramo conservation, in this chapter we use a range of research to examine three concurrent trends: family farming of commercial potatoes in Carchi, industrial flower production in northern Pichincha, and communal agriculture in Chimborazo.

Traditionally, the agriculture of haciendas, indigenous communities and peasant families has been based on crops that tolerate the extreme conditions of the highlands, including the grazing of cattle for beef and milk, the production of potatoes and other roots and tubers, and certain grains, cereals, and legumes. In the last 60 years after the agrarian reform, there has been a continuous social exclusion of small family farmers from the benefits of society and accelerated environmental degradation. With climate change, the agricultural frontier of the Sierra seems to be migrating to higher elevations. In addition, we see the arrival of a new actor on the highland farming scene: agro-industry. With the banking crisis of 1999, many rural areas of the Sierra have experienced emigration, generating multiple dynamics such as labour shortages and feminisation, and the abandonment and consolidation of land area

by local landowners and investors dedicated to the commercial production of European vegetables, trees and flowers. While this activity has generated salaried employment, it has also generated new socio-environmental risks.

It is worth noting the arrival of influential counter-movements along the Sierra, including agroecology and responsible consumption. These have organised for the rehabilitation of degraded areas and the creation of 'healthier and more sustainable' food systems, showing that a socially just and environmentally friendly co-production of food is not only possible, but already exists, even if only on the social margins of the country. We conclude that a more promising future for the protection of the páramos depends on a more committed society capable of balancing its desire for economic growth with the priority of rehabilitating and restoring the ecosystems on which we all depend.

Introducción

El mayor desafío [de protección a los páramos] es mejorar la resiliencia de los sistemas naturales y humanos a los efectos del cambio climático a través de sistemas integrados.

Conclusión del Segundo Congreso Mundial de Páramos, Loja, 2009

Hace 15 años, representantes de diferentes instituciones públicas y privadas, organizaciones, y personas naturales vinculadas al cuidado de los páramos en el mundo se reunieron en Loja, Ecuador, a fin de posicionar al páramo como un ecosistema estratégico y fuente de agua dulce y promover la definición de compromisos y planes de acción conjuntos para su conservación y manejo sostenible (Maldonado y De Bièvre, 2011). Frente al reconocimiento público creciente de la degradación ambiental y los efectos crecientes del calentamiento global, los participantes hicieron una llamada internacional para:

- aumentar la protección y el uso sostenible de los ecosistemas de páramo;
- mejorar la coordinación de las acciones de adaptación y mitigación a nivel local, nacional y regional;
- facilitar la integración de la experiencia y el conocimiento de las comunidades locales en la toma de decisiones a nivel nacional y regional;
- integrar enfoques intersectoriales en la gestión sostenible;
- mejorar las capacidades de los actores locales y los tomadores de decisiones. Se espera que estas acciones también contribuyan a la mejora del bienestar humano.

Este capítulo resume las particularidades modernas que han dado forma a la agricultura y el desarrollo rural en las zonas de páramo del centro-norte del Ecuador. Siguiendo a Messerli e Ives (1997) y Sarmiento (2012), entendemos la frontera entre la actividad agropecuaria de montaña y el páramo como un territorio construido y dinámico. Los incendios provocados por los humanos, los desmontes agrícolas, los pastos de altura y las rutas comerciales a través de las montañas pueden ser mucho más importantes que los factores climáticos para establecer y mantener las zonas andinas tropicales, en particular las grandes extensiones de pastizales. De igual forma, la agricultura moderna es mucho más que las limitaciones geofísicas de una finca o las decisiones de la familia rural. También inciden en la constitución de un territorio socioambiental y ecológico las necesidades y los gustos de la gente que se alimenta (Arce et al., 2015).

Dado el estado precario del agro, los sistemas alimentarios y las áreas naturales de las tierras altoandinas, nos preguntamos, ¿cuál es la historia moderna del agro en las tierras altas del Ecuador? Dada la apropiación histórica de la modernización agrícola en los años sesenta y su subsecuente intensificación, ¿cuáles son las mayores tendencias y amenazas socioambientales en las tierras altas y las zonas de páramo y qué oportunidades existen para fomentar una agricultura que responda a las demandas alimentarias del país, mientras asegure la protección de los páramos y los ecosistemas en general?

Los páramos andinos

La agricultura en las tierras altas del Ecuador

En el concepto administrativo del Estado, la Sierra del Ecuador tiene una superficie de 65 000 km², ocupa aproximadamente 25 % del territorio del país y tiene el 45 % de la población nacional (INEC, 2010). La región se caracteriza por la presencia de dos cordilleras paralelas, con una separación promedio entre 100 y 120 km. En la parte central se localizan los valles interandinos y las cuencas, con un promedio de 40 a 60 km de ancho y que varían entre 1600 y 3000 m, de topografía suave y con un clima templado, separadas unas de otras por elevaciones transversales de 3000 a 3400 m (Gondard, 1988).

Situados tanto al norte como al sur de la línea ecuatorial, los Andes del Ecuador reciben una intensa radiación solar durante todo el año (Pourrut, 1994). La precipitación tiende a aumentar a mayores altitudes y distancias desde el piso del valle interandino (Knapp, 1991), mientras que la temperatura está inversamente correlacionada con la altitud. Las variaciones de temperatura de la región situada a gran altura en la línea ecuatorial no son estacionales, sino diarias, con temperaturas que varían entre 20 °C durante el día y 6 °C durante la noche. La topografía genera cuatro zonas ecológicas marcadas: 1) entre 2600 y 2900 m, con un promedio de temperatura entre 11 a 22 °C; 2) entre 2800 y 3600 m y temperatura entre 10 y 13 °C; 3) de 3600 a 4200 m y temperatura entre 0 y 10 °C, y 4) arriba de los 4200 m y temperatura alrededor de 0 °C.

La geología está dominada por una larga historia de actividad volcánica con depósitos piroclásticos que han dado lugar a la formación de suelos volcánicos (Andisoles, Entisoles, Inceptisoles e Histosoles), cuyas características varían según el uso del suelo, el manejo, la altitud y el clima (Zehetner et al., 2003; Moreno et al., 2018). Basados en material piroclástico, los suelos provienen de una serie de volcanes ubicados a lo largo de las cordilleras, seguido de procesos

de glaciación. Estos suelos son relativamente jóvenes, se derivan de cenizas volcánicas y piedra pómez (Zebrowski y Sourdat, 1997) y comúnmente presentan horizontes de acumulación de arcilla sumamente compacta que impone dificultades con la circulación de agua.

Debido a las bajas temperaturas en las zonas arriba de los 3600 m, la formación de suelo acumula horizontes superficiales formando una capa oscura de uno a tres metros compuesta por altas cantidades de materia orgánica (10-25 % por volumen) (Zebrowski y Sourdat, 1997; Zehetner et al., 2003). Clasificados como Andosoles y popularmente conocidos como suelos negros andinos, estos suelos tienen baja densidad aparente y una alta capacidad de retención de agua, y son particularmente arables (Moreno et al., 2018; Capítulo 2). Sin embargo, no son los suelos más aptos para la agricultura a largo plazo pues, generalmente, tienen un pH de 3,5-4,5 y se caracterizan por altos valores de acidez intercambiable y dependiente del pH. La cantidad de cal que debería agregarse para alcanzar valores óptimos de pH para la agricultura (6,5 a 7) es tan grande que esta tarea resulta imposible y poco razonable desde la perspectiva técnica y económica. Debido a estas condiciones, quienes tratan de convertir el páramo a cultivo agrícola se ven en la necesidad de drenar el agua para fomentar condiciones más aeróbicas, permitiendo una transición a una nueva sucesión de plantas capaces de estimular el funcionamiento de una microbiota en la rizosfera por medio de exudados de la raíz (Bais et al., 2006). Condiciones aeróbicas permiten que los microorganismos endófitos (principalmente bacterias y hongos en simbiosis con las plantas) puedan estimular el desarrollo de diversas fitohormonas y sustancias antiestrés a favor de una transición hacia la agricultura.

No obstante, las zonas altoandinas se caracterizan por ser ecosistemas altamente frágiles. Al ser perturbadas, especialmente por el sobrepastoreo y por el uso de tractor y labranza en zonas de pendiente, dentro de una década de cultivo aflora por debajo del horizonte superficial material compuesto por arena y cascajo y luego un subsuelo basado principalmente en ceniza cementada, llamado en kichwa *cangahua*, que significa “tierra dura y estéril” (Podwojewski y Germain, 2005). Compuesto de ceniza de riocacita, rica en sílice y baja en óxidos de metales alcalinos, el subsuelo de los páramos es generalmente alto en minerales y tiene una alta densidad aparente debido a la baja acumulación de carbono y materia orgánica y, por tanto, muy bajo en vida microbiana y agregados. En términos de contenido mineral, esta ceniza cementada es rica en los nutrientes que las plantas necesitan para el crecimiento.

Sin embargo, en la *cangahua* estos elementos están principalmente encerrados en cristales, y por ello, no están disponibles para las plantas. Estos sistemas de suelo con alto endurecimiento superficial se encuentran comúnmente en los

flancos medio e inferior de los volcanes (ahora extintos o inactivos). Debido a una degradación progresiva de los suelos, el cultivo en cangahua predomina en los valles interandinos, cubriendo más de la mitad de la tierra en la que sobreviven familias rurales de origen indígena y campesino. A través de la sierra andina, la cangahua está aflorando cada vez más en zonas altas en los bordes y dentro de los páramos, como producto de formas de ganadería y agricultura que sistemáticamente degeneran los ecosistemas.

Según Peyre et al. (2021), que estudiaron el área de páramo en toda la región norandina (Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela), los límites del páramo remanente no son completamente claros, pues se trata de una región seminatural con un 12 % de uso intensivo de la tierra y un 65 % de mezcla entre vegetación natural, principalmente matorrales, comunidades de plantas rosetas y pastizales. Además, estudios en zonas específicas del Ecuador a través del tiempo han encontrado que no solo ocurren transiciones del páramo hacia el uso agrícola, sino también desde la agricultura hacia la recuperación del páramo, con múltiples factores impulsores que interactúan en las localidades estudiadas (Ross et al., 2017; Guarderas et al., 2022).

Para comprender las consecuencias socioambientales de las dinámicas modernas de la agricultura en los páramos, es necesario apreciar el concepto de territorio como una conjunción entre espacio, poder y localidad, como explicado por López-Sandoval, Robertsdotter y Paredes (2017). El territorio permite analizar el uso y significado de los páramos, como parte de múltiples espacios de vida de una población. En estos, las poblaciones locales desarrollan relaciones de producción y reproducción, con un particular sentido histórico, espiritual, político y ecológico, lo que marca las formas de uso y los balances de poder. Estas características permiten entender los territorios como procesos dinámicos cuya expresión se identifica mediante cambios en el paisaje, así como en las relaciones sociales (Deleuze y Guattari, 1980). Es posible que el páramo para una comunidad tenga una función ecológica exclusiva en los ciclos del agua para riego y uso doméstico, sin embargo, puede ser que la división de la tierra y reducción de las áreas disponibles para el cultivo en los pisos ecológicos más bajos cambie las prioridades de la comunidad y esta comience a producir en zonas de páramo antes protegidas. Esto indica la interdependencia de los espacios que pertenecen a un mismo territorio y su vulnerabilidad al cambio en función de las prioridades de la población que sufre presiones internas o externas al territorio. Por esta razón, al estudiar la agricultura en el páramo es necesario entender la historia y transformación de todo el territorio del cual esta forma parte para los actores locales. Como lo expresara Gondard (1984, 36): “La agricultura [...] se expande o se contrae con los mismos movimientos de la sociedad rural”.

La agricultura andina tradicional

La región antrópica de las tierras altas andinas del Ecuador se caracteriza por la presencia de humanos desde hace milenios (Acosta-Solís, 1984). La agricultura tradicional de las culturas andinas en el norte de los Andes tuvo un impacto limitado en los páramos (por ejemplo, Wagner, 1979; Knapp, 1991; Bray, 1992; Landázuri, 1995; Murra, 2002). Las culturas andinas, generalmente, desarrollaron su agricultura en las zonas bajas e interandinas. Las élites ocuparon las tierras bajas de la zona interandina para los cultivos más prestigiosos, en particular maíz y fréjol, que pudieron secar y guardar por largos periodos. Las castas marginales fueron relegadas a las zonas altas, donde domesticaron el cultivo de raíces y tubérculos andinos, principalmente con fines de supervivencia. A su llegada al Ecuador al final del siglo XV, los incas introdujeron el cultivo de coca en los valles y en los páramos los camélidos (Flores-Ochoa, 1977), pero, en términos generales, las tierras más altas de páramo fueron utilizadas solo para recolección y cacería (Wagner, 1979).

El crecimiento de la influencia de los españoles en el siglo XVI no solo implicó la introducción de nuevos cultivos y tecnologías, sino también el comienzo del pastoreo con ganado vacuno, equino y ovino en las tierras por encima del límite agrícola en ese momento (Barsky y Cosse, 1981). En las tierras altas, el ganado disfruta de una ventaja comparativa sobre los cultivos. El pastoreo, por fines de engorde, fue institucionalizado durante la época de la hacienda (López-Sandoval y Maldonado, 2020), lo que lleva a la quema y al pastoreo extensivo en los páramos. La quema favorece una renovación de los brotes y hojas de las plantas del páramo, temporalmente mejorando la palatabilidad de hierbas y pastos nativos adaptados al frío (Hofstede, 1995; Sarmiento et al., 2003; Joslin, 2021; Parodi et al., 2022). Sin embargo, a través del tiempo, la cobertura vegetal se puede debilitar, dejando el suelo expuesto a procesos progresivos de erosión (Podwojewski et al., 2002). Actualmente, la degradación de los suelos de las tierras bajas y el aumento de las temperaturas asociado con el calentamiento global pueden provocar la migración de la agricultura hacia las tierras altas anteriormente no cultivables (Caulfield et al., 2019b; Caulfield et al., 2020b).

La teoría del control vertical de Murra (1972) explica la diferenciación agrícola y agraria a lo largo de los cinturones altitudinales. Mientras tanto, las aplicaciones de Salomon (1980) y López-Sandoval (2004) de esa teoría al páramo en el norte de los Andes arrojan luz sobre las implicaciones ecológicas de la llegada de los españoles y la posterior redistribución horizontal de la tierra bajo el sistema de hacienda, según las prácticas agrícolas de las plantaciones en las grandes mesas de Castilla. Juntos, estos eventos iniciaron un desarraigo dramático entre la agricultura andina y sus contextos socio ambientales, generando un legado creciente de nuevas formas de exclusión social y violencia ambiental.

La modernización del sector rural: la reforma agraria y la tecnificación agropecuaria



Figura 9.1 La Chimba, una comunidad indígena Kayambi que se transformó en productora de leche a partir de la llegada de ganado vacuno Holstein a mediados del siglo XX. Arriba, Vista general. Abajo, Minga para tomar agua de un ojo de agua en el páramo para su sistema de riego. Al fondo el Cayambe. Fotografías: Rossana Manosalvas

Enfocándose en la experiencia europea y andina, van der Ploeg (2003) explica que, durante la segunda mitad del siglo XX, un régimen técnico nació de lo que él denominó el “sistema del experto” y su proyecto de modernización. Este proyecto fue caracterizado por tres innovaciones históricas: la mercantilización de la vida rural (en particular, la introducción de moneda para intermediar el intercambio y la imposición de precios a la tierra, las plantas, los animales y el tiempo), el distanciamiento geográfico y social de los mercados, y el fomento de una dependencia en conocimientos y tecnologías externos a los sitios de la producción y el consumo. Mientras el sistema sociotécnico del experto emergió primero en los países industrializados, rápidamente creció a otros espacios geográficos y sociales para luego influir en el desarrollo agrícola a través de los países del planeta, especialmente en América Latina (Flora y Flora, 1989; Figura 9.1).

Con la Ley de Reforma Agraria y Colonización de 1964, Ecuador formalmente respondió al fenómeno de crecimiento urbano con un proyecto ambicioso de organizar sus sistemas agroalimentarios alrededor de los mercados comerciales de productos, insumos y servicios (Costales y Costales, 1971; Barsky, 1988). La llegada de una nueva clase al país: ‘los técnicos’ y su proyecto de intensificación de la agricultura y la urbanización (Cosse, 1980), respondió a las políticas de modernización agrícola desde el Estado que impulsó una serie de innovaciones a la agricultura en la Sierra. Estas incluyeron la introducción de la labranza total (mecanizada a través del tractor y el arado de vertederas), el monocultivo de variedades comerciales (especialmente, papa, maíz y eventualmente hortalizas), y el amplio uso de agroquímicos (fertilizantes y plaguicidas) para compensar por las perturbaciones ecológicas (Sherwood, 2009; Chamorro-Cristóbal, 2020; Gondard y Mazurek, 2001). La sociedad se vio en la situación de reducir la tierra, el agua, las plantas, los animales y los paisajes a un conjunto de ‘recursos naturales’ para fines de producción comercial por sobre otras posibilidades como el cuidado de los ecosistemas.

Luego de la reforma agraria y una rápida organización alrededor de las tecnologías de la era industrial, la producción de los cultivos básicos en la Sierra creció durante los años setenta, desarrollándose hasta dominar los paisajes y transformarse en la principal fuente de ingresos para las familias rurales, especialmente en las provincias de Pichincha, Imbabura y Carchi, donde las políticas de la modernización fueron más administradas (Costales y Costales, 1971; Barsky, 1988). Por ejemplo, al inicio de los años ochenta, Carchi se transformó de ser un contribuyente menor a la canasta básica del país a producir la mitad de la cosecha nacional de papas en menos de la cuarta parte del área nacional dedicada a este cultivo (Herrera et al., 1999).

En los años noventa, 25 años después de la llegada de la modernización agrícola, estudios multidisciplinarios encontraron que el empleo de las tecnologías de la era industrial había generado consecuencias preocupantes ambientales, de productividad y salud humana (Crissman et al., 1989, Yanggen et al., 2004). Los tractores y la labranza total se convirtieron en la causa principal de erosión del suelo. Los agricultores gastaban progresivamente más en insumos agroquímicos y recibían menos por sus productos, conduciéndolos a perder dinero en el 50 % de sus campañas de siembra (Crissman et al., 1998). Dos tercios de la población rural —incluyendo, hombres, mujeres y niños— sufrían daños neurológicos medibles debido a la exposición a plaguicidas altamente tóxicos. Estudios económicos identificaron una relación entre exposición a plaguicidas y baja productividad, si bien también concluyeron con la identificación de ‘puntos de impacto’ prometedores para el desarrollo de ‘mejores prácticas’ replicables y apoyadas científicamente (Yanggen et al., 2004).

La modernización agroalimentaria en el Ecuador ha generado por lo menos tres epidemias que ponen en duda su productividad: la degradación ambiental de gran escala, la intoxicación por plaguicidas de las familias rurales y el sobrepeso/obesidad de los consumidores urbanos (Arce et al., 2015; Sherwood et al. (2013). Si bien estos fenómenos aparentemente no están relacionados, ninguno fue posible antes de la reorganización de la sociedad alrededor de los mercados comerciales, la tecnología y los conocimientos externos.

El uso de la tierra

No se permitirá el avance de la frontera agrícola en los páramos no intervenidos que se encuentren sobre los 3300 m de altitud sobre el nivel del mar, al norte del paralelo tres, latitud sur, y sobre los 2700 m de altitud, al sur de dicho paralelo.

Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales de 2016

Nieto-Cabrera y Vicuña (2015) resumen el estado actual del cultivo de las tierras altas de acuerdo con la clasificación de la Aptitud Natural de Uso, entendida como “la vocación de la tierra para un uso específico, es decir, el nivel de adecuación del terreno considerando sus características naturales para la agricultura y la conservación”. Los riesgos se basaron en las amenazas constantes de fenómenos climáticos adversos no controlables por las familias rurales, incluyendo nevadas, heladas, granizadas, sequías, inundaciones y vientos, tanto como la vulnerabilidad de intervenir en ecosistemas marginales para fines de producción agrícola.

Nieto-Cabrera y Vicuña (2015) analizaron los patrones de comportamiento en las parroquias rurales de las provincias norteñas de Carchi, Imbabura y Pichincha con base en los porcentajes de pobreza y los porcentajes de territorios con aptitud para la conservación y bosques. Consideraron las relaciones entre estas dos variables y el porcentaje de la población dedicada a la agricultura como actividad económica principal. De acuerdo con los resultados, la aptitud para la agricultura generalmente estuvo por debajo de 20 % del territorio. De esta manera, se explican los niveles de pobreza de las parroquias rurales como producto de la sobreexplotación agrícola en territorios no aptos para esta actividad; como resultado, las familias dedicadas a la agricultura no pueden generar los ingresos necesarios para sostener su seguridad alimentaria. Encontraron, también, que el tamaño de la Unidad Productiva Agrícola (UPA) de las familias rurales estaba por debajo del mínimo requerido para obtener una escala de producción rentable. Además, identificaron una tendencia preocupante hacia un fraccionamiento aún más agudo de estas micro-UPA. Como resultado, se ve una tendencia de parte de las familias hacia el cambio del uso de la tierra de cultivos a pastizales para liberar mano de obra no remunerada para actividades fuera de lo agrícola, sobre todo en las ciudades cercanas.

Debido a la calidad de la tierra (apta para agricultura o para conservación) y la disponibilidad de la tierra (tamaño insuficiente de la UPA), Nieto-Cabrera y Vicuña (2015) concluyeron que la propiedad y usufructo de una UPA no significan una garantía para la reproducción y aseguramiento de la calidad de vida en la mayoría de las familias rurales de la Sierra. En muchos casos, la tierra, ya sea como propiedad privada o colectiva, se había convertido en el principal y hasta único activo familiar o comunitario en lugar de ser un medio de producción; como resultado, se desarrolló una propensión a la venta de estas tierras a empresas y especuladores.

Agricultura familiar: sistema papa-pasto en Carchi

Paredes (2010) describe cómo, a continuación de la reforma agraria en la zona de Carchi, las familias rurales que trabajaban en las haciendas consiguieron tierras que incluyeron el bosque y parte del páramo. Para lograr su subsistencia, muchas familias se dedicaron a la venta de carbón como producto de la tala de árboles. A través de medio siglo de roza y quema, estas tierras se convirtieron a la agricultura de raíces y tubérculos, especialmente de papa, producto que experimentó un mercado creciente en las ciudades del Ecuador como alimento básico desde la década de los setenta en adelante (Figura 9.2).



Figura 9.2

Cultivo de papas
en Antisanilla,
Pichincha.

Fotografía: Esteban
Suárez Robalino

Según la población local, la transformación del uso del suelo de bosque interandino hacia cultivos de papa alteró en menos de un siglo los patrones de lluvia, la humedad y la temperatura (Herrador-Valencia y Paredes, 2016), de manera que con el tiempo fue posible cultivar papas en zonas cada vez más elevadas en la búsqueda de tierras más húmedas cercanas al páramo. Desde 1990, Ecuador adoptó una política de comercialización agropecuaria encaminada a asignar un mayor rol al mercado, incluyendo al sector de la papa (Herrera et al., 1999). Con la crisis monetaria al principio de los años dos mil, el costo por un quintal de papa tuvo una fluctuación de hasta el 500 % mensual (An, 2004). La forma principal de enfrentar los riesgos climáticos, de plagas y de precios para los agricultores fue la rotación de los cultivos de papa con pastos naturales o cultivados para la producción de ganado de leche (Herrador-Valencia y Paredes, 2016). A diferencia de la papa, las compañías procesadoras de lácteos en la región tienen un precio fijo por litro y, aunque no es un precio competitivo, permite que las familias tengan un ingreso mensual seguro frente a la incertidumbre del mercado y del rendimiento de la papa. Esta estrategia campesina, para enfrentar la crisis en la producción de la papa y responder a la demanda creciente, transformó el uso del suelo hacia el sistema papa-pasto cada vez más cerca del páramo y, en muchos casos, hacia la entrada del ganado vacuno directamente a los páramos contiguos a los cultivos.

Para producir en los flancos de las montañas húmedas las familias campesinas aplicaron el sistema de *wachu* rozado o surco cortado, un sistema precolombino de labranza limitada contra la pendiente, bajo el cual se realiza la rotación de papas con pasto en tierras inclinadas y de páramo (Gortaire, 2014, 2016). El sistema *wachu* rozado consiste en formar surcos doblando la tierra con pasto hacia el centro de cada surco, colocando la semilla de papa en medio del pasto doblado. Según estudios del CIP e INIAP, hay más de mil hectáreas bajo este sistema en la frontera entre Colombia y Ecuador (Cartagena et al., 2003). Esta forma de cultivo, aunque intensiva en mano de obra, permitía sembrar en alto relieve para evitar el exceso de humedad y las plagas asociadas. Sin embargo, con la apertura de kilómetros de caminos como parte de ofertas de campañas políticas en la provincia, fue posible la llegada del tractor y el arado de disco para la siembra de papas en labranza total en pendientes.

Actualmente, una rotación papa-pasto en laderas irregulares de hasta 45 % de pendiente y altitudes entre 2400 y 3800 m domina los patrones de producción. En esta zona altitudinal se desarrolla un sistema de producción mixto de montaña entre la línea de bosque y el páramo. Generalmente, son zonas de alta humedad, con una estructura de arcilla alófana que fija químicamente el fósforo, lo que lleva a que se apliquen grandes cantidades de fertilizantes fosfatados. Sherwood (2009) presenta datos de cuatro comunidades de Carchi que demuestran el declive de la producción y el aumento en el uso de insumos industriales para lograr cada vez menos retornos por cada dólar invertido. Valverde et al. (2001) documenta una gran erosión del suelo en Carchi por el uso de arado de disco en zonas de pendiente (comúnmente arriba de 80 tm/ha), y un conjunto de estudios documenta la afectación de la salud de los productores y sus familias debido al uso creciente de agrotóxicos (Yanggen et al., 2004). Sin embargo, lo que ha reducido el área sembrada de papa en la provincia es el alto costo de la inversión requerida por hectárea de papa. En 2020, Basantes et al. (2020) encontraron que se requiere entre 3500 y cerca de 6000 USD por hectárea, y, en 2022, el Universo (el 4 de marzo) reportó que el costo de producción por hectárea se incrementó entre 6500 y 7500 USD (Cabezas y Castellano-Jara, 2022).

Según los datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, 2010), en las últimas dos décadas, la superficie cosechada de papa en hectáreas en el país se redujo (Figura 9.2). Por otra parte, la producción en toneladas tuvo variaciones, pero se mantuvo dentro de un rango. Al reducir la superficie cosechada y mantener la producción, los rendimientos aumentaron. Los datos de la provincia del Carchi siguen el mismo patrón que los nacionales, pero con un rendimiento promedio de casi el doble del nacional (18,2 frente a 9,6 tm/ha). Carchi tiene en promedio el 34 % de la producción nacional en el 16,8 % del área total destinada

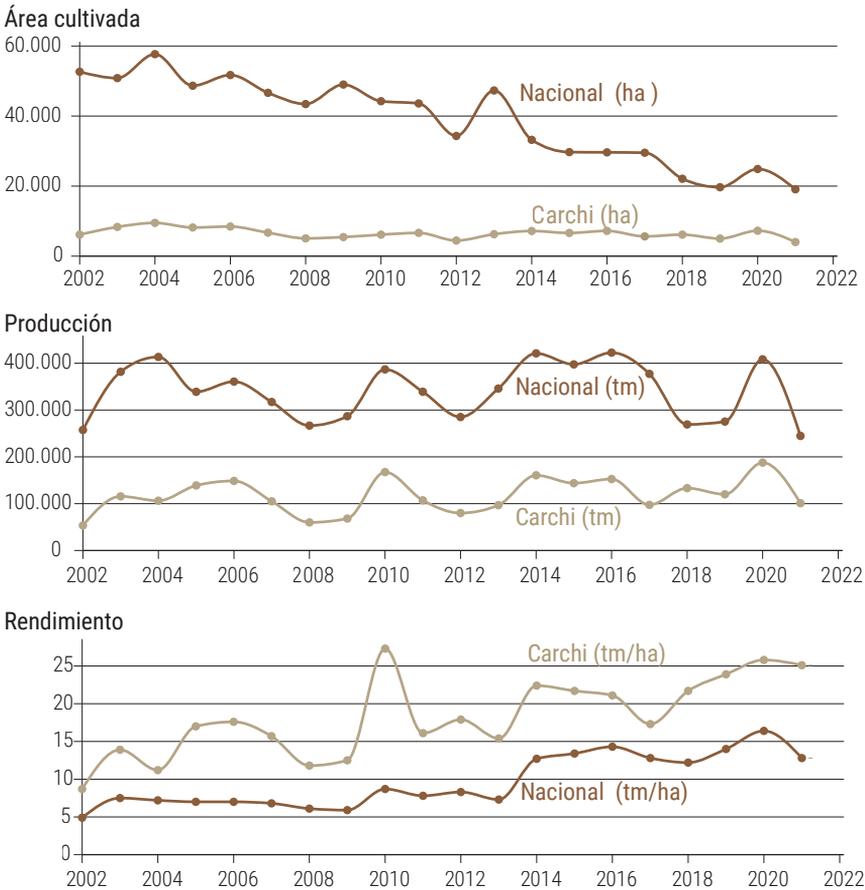


Figura 9.3 Área nacional cultivada en papa (ha) y producción (t) y rendimiento (t/ha) entre 2001 al 2021. Fuente: Datos de ESPAC/MAG—INEC. Nota: Precio promedio ponderado entre los mercados mayoristas de Quito, Cuenca y Guayaquil.

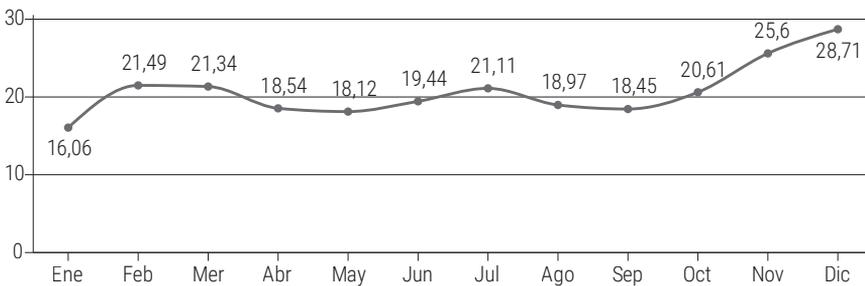


Figura 9.4 Precio mayorista de papa en 2021 en el Ecuador (USD). Fuente: MAG-SIPA

a este cultivo. Tanto en 2010 como en 2020, se observan picos altos en el rendimiento nacional y de la provincia, mientras en el 2021, los rendimientos bajaron en todo el país debido posiblemente a los estragos del Covid-19 en la accesibilidad al crédito para la producción (Ramos et al., 2021) y del fenómeno de la niña con mayores precipitaciones y bajas temperaturas y considerado el más largo de los últimos 120 años (OMM, 2023). En 2021, el costo por quintal de papas en los principales mercados mayoristas subió de 16 USD a 21,28 USD (75 %) (Figuras 9.3 y 9.4). Según los agricultores de Carchi, esta confluencia de situaciones ha fomentado un nuevo interés en cultivar las tierras altas por parte de productores que tienen acceso al capital para invertir. De esta manera, productores en las parroquias de Tulcán, Huaca, San Gabriel y Montúfar describen una reconcentración de la tierra en manos de grandes propietarios para producción de papa de forma industrial combinada con ganado vacuno extensivo y producción de flores de exportación en invernaderos (Comunicación personal con productores de La Libertad, Espejo, 19 diciembre de 2022).

Industrialización de la agricultura andina: caso de Pedro Moncayo, Pichincha

Utilizando los datos geoespaciales y temporales disponibles, Guarderas et al. (2022) caracterizaron el Uso y Cobertura de la Tierra (en inglés LULC) para evaluar los patrones altitudinales y sus fuerzas determinantes en las cinco parroquias del cantón Pedro Moncayo en Pichincha. Localizada en la Sierra norte, Pedro Moncayo se caracteriza por un amplio gradiente de elevación (2400–4400 m) y, de igual forma como otros paisajes de los Andes tropicales, un régimen de manejo que varía en intensidad dependiendo de la elevación (Aide et al., 2013; Ross et al., 2017). La zona altitudinal más alta (por encima de los 3300 m) está compuesta por ecosistemas nativos de páramo y bosques montanos. Generalmente, la zona altitudinal media (2800–3300 m) es utilizada para la agricultura y la ganadería, provocando una amplia degradación del suelo. Las tierras bajas se caracterizan por ecosistemas secos dominados por arbustos. Las parroquias ubicadas al oeste del cantón muestran una economía basada en agricultura de subsistencia y un menor crecimiento de la población. Las parroquias del este tienen un desarrollo urbano más concentrado y población más creciente. La agricultura de esta última zona generalmente cuenta con agua de riego, especialmente en el sureste, donde existe una industria florícola en plena expansión.

Latorre et al. (2022) encontraron una amplia inequidad en el acceso a tierra y agua en el cantón con más del 62 % de las familias productoras sin acceso al riego y el 75,7 % de unidades productivas agropecuarias con un promedio de

0,9 ha de tierra. Los mismos autores encontraron que la agricultura tradicional es principalmente para la subsistencia, ya que el 76,8 % de hogares la combinan con trabajo asalariado; el 15,5 % lo hacen con producción ganadera; y un 7,8 % lo hace con cultivos de alto valor económico. Guarderas et al. (2022) indican que cerca del 60 % del territorio de Pedro Moncayo se dedica a la agricultura tradicional, principalmente al cultivo de cereales, maíz y papas.

Dada su ubicación en la zona ecuatorial con condiciones óptimas de luz solar durante todo el año y un clima ideal de tierras altas con días cálidos y noches frescas, la región es especialmente adecuada para la producción de flores de alta calidad. Combinado con la mejora de las carreteras, un amplio mercado de mano de obra local, el acceso al agua de riego en unas zonas y la cercanía con el aeropuerto internacional de Quito a partir del 2013, Pedro Moncayo es un cantón que provee ventajas al desarrollo industrial (Mena-Vásconez et al., 2016). Los estudios de Latorre et al. (2022) y Guarderas et al. (2022) sugieren que estas ventajas existentes han devenido en una economía local basada en la producción de flores de invernadero orientada a la exportación. En comparación, la producción agropecuaria de pequeña y mediana escala como medio de vida principal implica a un 20 % de la población (Figura 9.5).



Figura 9.5 Los plásticos de los invernaderos de rosas dominan el paisaje de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo, ya muy cerca de los páramos en la zona del macizo de Mojanda. Fotografía: Patricio Mena-Vásconez

Según Guarderas et al. (2022), entre 1990 y 2014 el sureste de Pedro Moncayo experimentó una expansión de áreas desarrolladas y florícolas (Tabla 9.1), siendo estos dos tipos de uso del suelo los que crecieron en porcentaje más que cualquier otro (Tabla 9.2), especialmente en las parroquias de Tabacundo y Tupigachi, debido a su acceso al agua de riego (IEE y GAD Pichincha, 2013). En ese periodo, el área para la floricultura creció de menos de 0,4 % al 5 % del área cultivada, un aumento de 12,5 veces. No obstante, el incremento del suelo desarrollado y de florícolas fue más acelerado entre 1990 y 2000 que en cualquiera de los periodos estudiados (8 y 7 veces respectivamente). En esta misma década decreció la superficie bajo “cultivos y pastos” al igual que las “plantaciones forestales”. La alta demanda de mano de obra en las florícolas tiene una relación con este decrecimiento en la agricultura y ganadería, puesto que muchas familias se insertaron en este mercado de trabajo como una oportunidad de acceder a ingresos monetarios. Con base en los censos del INEC de 1990 y del 2001, el trabajo asalariado aumentó del 40 % al 60 % y la agricultura independiente se redujo del 40 % al 30 % (INEC, 2001). Hay que resaltar que estos porcentajes representan el trabajo que las familias consideran su principal fuente de ingresos, pues quienes se consideran asalariados practican a la par agricultura de subsistencia y quienes se consideran agricultores también dependen de los ingresos por trabajo fuera de la finca, generalmente en las florícolas (Latorre et al., 2022).

En el periodo del 2000 a 2008, el suelo desarrollado y de florícolas continuó creciendo, aunque a un ritmo menor, (2 y 1,5 veces respectivamente). Como consecuencia el trabajo asalariado llegó alrededor del 80 %, mientras la agricultura independiente bajó a 20 % (Latorre et al., 2022). Sin embargo, en este periodo la superficie de “cultivos y pastos” se recupera y crece 46,7 %, con una expansión de 46,71 km², lo cual parece tener una relación con la reducción de la superficie de arbustos y herbáceas (41,32 km² o 43,64 %), el “bosque nativo” (3,82 km² o 25,28 %) y el “páramo” (9,87 km² o 19,51 %), siendo la del páramo la más alta de todo el periodo estudiado. Entre otras posibles causas, la crisis económica del Ecuador, tras la dolarización de la economía a partir del 1999, promovió la actividad agrícola en las zonas rurales (Martínez-Valle y North, 2009). En el caso de Pedro Moncayo, el desplazamiento que sufrió la agricultura debido al crecimiento de zonas desarrolladas y de florícolas promovió la producción arriba de los 2800 m y fue más posible en las zonas con riego o en los pisos más altos cerca del páramo, como lo demuestra el estudio de Guarderas et al. (2022).

Entre 2008 y 2014 la zona desarrollada bajó ligeramente el ritmo de su crecimiento (61,71 %) con respecto al periodo anterior y las florícolas crecen mucho menos (19,13 %). La superficie de cultivos y pastos decrece (19,06 %) y la de bosques nativos experimenta su reducción más alta del periodo de estudio

(31,18 %). Los páramos también se reducen, aunque en un porcentaje menor que el periodo anterior (4,37 %). Cabe destacar que en este periodo, la superficie del lago creció un 9,21 %, su más alta expansión en el periodo estudiado.

Durante el periodo de estudio de Guarderas et al. (2022), los bosques nativos son los que más se redujeron en términos de porcentaje (40,3 % o 5,19 km²) seguidos por los páramos (16 % u 8,11 km²) con una gran conversión de la zona de subpáramo a tierra agrícola concentrada en el noreste entre los 2800 a 3300 m El mayor grado de pérdida de bosques nativos y páramos se debió a la expansión de la agricultura de subsistencia, especialmente en el noreste, donde el páramo había sido destruido casi por completo. Mientras, en la región del centro y occidente del área de estudio se encontró una tendencia de estabilidad de los páramos y recuperación de tierras baldías debido al abandono de la agricultura. El principal impulsor del cambio fue la topografía escarpada. La expansión de la floricultura fue explicada por la disponibilidad de riego y el gradiente de producción entre parroquias, mientras que las transiciones de los bosques y páramos, las zonas urbanas y agrícolas fueron explicadas por fuerzas impulsoras demográficas y de infraestructura, relacionadas con las dinámicas de desarrollo urbano y la emigración.

Tabla 9.1 Cambios en el uso y cobertura del suelo en Pedro Moncayo entre 1990 al 2014 (basado en Guarderas et. al, 2022)

Año	1990		2000		2008		2014	
	km ²	%						
Desarrollado	0,58	0,17	4,72	1,39	9,61	2,84	15,54	4,6
Florícolas	1,19	0,35	9,44	2,79	14,06	4,16	16,75	4,95
Cultivos y pastos	152,92	45,2	122,58	36,23	169,29	50,04	137,03	40,51
Plantaciones forestales	44,16	13,05	38,56	11,4	37,35	11,04	38,24	11,3
Arbustos y herbáceas	73,33	21,68	94,74	28	53,4	15,78	77,75	22,98
Bosque nativo	12,96	3,83	15,11	4,47	11,29	3,34	7,77	2,3
Páramos	50,62	14,96	50,6	14,96	40,73	12,04	42,51	12,57
Lago	1,48	0,44	1,52	0,45	1,52	0,45	1,66	0,49
Río	1,04	0,31	1,06	0,31	1,04	0,31	1,04	0,31
Total	338,29	100	338,33	100	338,29	100	338,29	100

Tabla 9.2 Diferencias en el cambio de uso y cobertura del suelo en Pedro Moncayo entre diferentes periodos de 1990 al 2014 (basado en Guarderas et al., 2022)

Años	2000-1990	Cambio	2008-2000	Cambio	2014-2008	Cambio	2014-1990	2014-1990
Tipo de uso	km ²	%						
Desarrollado	4,14	713,79	4,89	103,60	5,93	61,71	14,96	2569,55
Florícolas	8,25	693,28	4,62	48,94	2,69	19,13	15,56	1305,89
Cultivos y pastos	-30,34	-19,84	46,71	38,11	-32,26	-19,06	-15,89	-10,39
Plantaciones forestales	-5,6	-12,68	-1,21	-3,14	0,89	2,38	-5,92	-13,42
Arbustos y herbáceas	21,41	29,20	-41,34	-43,64	24,35	45,60	4,42	6,02
Bosque nativo	2,15	16,59	-3,82	-25,28	-3,52	-31,18	-5,19	-40,3
Páramos	-0,02	-0,04	-9,87	-19,51	1,78	4,37	-8,11	-16,03
Lago	0,04	2,70	0	0,00	0,14	9,21	0,18	12,29
Río	0,02	1,92	-0,02	-1,89	0	0,00	0	0,09

El manejo del paisaje en las tierras comunales de Chimborazo

Caulfield (2019a) dirigió una serie de estudios sobre la gestión del paisaje en tres pueblos de la parroquia de Flores, del cantón Riobamba en la Sierra Central del Ecuador. Estas comunidades están ubicadas cerca unas de otras (a menos de 15 km de distancia), pero difieren en cuanto a su contexto biofísico, vínculos con los mercados comerciales y estrategias agrícolas.

Con base en las evaluaciones del carbono orgánico y la composición química del suelo, Caulfield et al. (2020a) encontraron patrones asimétricos asociados con la temperatura y las prácticas agrícolas a través de los gradientes de arcilla en las diferentes elevaciones. Las temperaturas disminuyeron a mayor altura, mientras la materia orgánica y el contenido de arcilla aumentaron (Figura 9.6).

Los estudios posteriores en estos mismos sitios exploraron las interacciones entre la formación del suelo asociada con el gradiente climático inducido por la altura, la erosión, la textura del suelo y las prácticas agrícolas (Caulfield et al., 2020b). Se encontró que los factores de formación fueron influyentes, pero no determinantes. Además de los procesos de erosión inherentes a estos paisajes montañosos, la degradación de la tierra en los Andes rurales también está siendo impulsada por balances negativos de material orgánico y nutrientes.

Los hogares tendían a asentarse más cerca de la tierra fértil, lo que facilitaba el acceso a la tierra más arable y el uso de enmiendas orgánicas del suelo, como estiércol de cuy, pollo y ganado (Caulfield et al., 2020b). Con el tiempo, una combinación de factores ambientales y humanos condujo a aumentar los niveles de los macronutrientes del suelo a mayores altitudes, mientras que los campos ubicados en las zonas más bajas y alejadas de los hogares tendieron a volverse menos fértiles con el tiempo. Estas condiciones influyeron en la intensidad de cultivo y el uso de fertilizantes, en particular el uso de estiércol animal, para sostener un mínimo de producción de los cultivos (Figura 9.6).

Caulfield (2019a) concluyó que, si bien los procesos naturales están impulsando patrones biofísicos en los paisajes en Chimborazo, la influencia humana afecta aún más las condiciones biofísicas a través del manejo del suelo y las prácticas de uso de la tierra. En resumen, los pequeños agricultores no pueden reemplazar la erosión del suelo y la pérdida de los nutrientes exportados en la cosecha de sus cultivos. Como resultado, de acuerdo con su sistema de producción actual, es necesario introducir más y más enmiendas orgánicas para sostener la producción, mientras el suelo se sigue degradando en términos físicos y nutricionales, fomentando la necesidad de migrar progresivamente hacia las tierras más altas, debido a su fertilidad restante y a pesar de las desventajas climáticas. Eventualmente, llegan al punto donde las únicas opciones son vender su mano de obra, migrar a las ciudades o vivir de las remesas.



Figura 9.6 La dinámica del manejo de los suelos en un paisaje alto andino de Flores, Chimborazo (Caulfield et al., 2020a)

Tendencias de la degradación ambiental en la frontera agrícola-páramo

De modo consistente con la literatura reciente sobre las tendencias agrícolas en las tierras altoandinas (Ross et al., 2017; Thompson et al., 2021; Guerrero et al., 2022), los casos que examinamos presentan una presión continua y en algunos casos creciente en los páramos y sus alrededores asociada con la agricultura. En particular, observamos tres tendencias mayores que amenazan la conservación de las tierras altas: 1) degradación progresiva de los recursos naturales; 2) inestabilidad demográfica en el campo; y 3) una nueva industrialización de las tierras altas. Estas tendencias tienen diferente énfasis e impacto de acuerdo con cada caso estudiado, demostrando la importancia de la constitución de los territorios en la heterogeneidad tanto de la degradación ambiental como de las alternativas para su recuperación.

Degradación progresiva de los recursos naturales

Deforestación para agricultura y quema

Como explica Sarmiento (2002), el paisaje del bosque montañoso de la región interandina refleja dos líneas de árboles: una superior que se correlaciona con la extensión del pastoreo hacia los tramos más altos y fríos, lo que reduce el área de bosque desde arriba; y una inferior que correlaciona con la intensificación ascendente de la agricultura de cultivo y el consumo de leña en el piedemonte de las mesetas y faldas del interior. En cada uno de los casos presentados en este capítulo encontramos familias rurales involucradas en múltiples formas de degradación ambiental ligada a sus estrategias de vida. En sus estudios sobre el sistema papa-pasto de Carchi, Sherwood (2009) resume la experiencia de la producción de carbón como actividad central durante la primera mitad del siglo XX. Un agricultor mayor, proveniente de Mariscal Sucre, explicó que la primera actividad de asentamiento involucró una ‘domesticación’ del denso ámbito montañoso. Esto implicó la tala de árboles y la quema de troncos para la venta como carbón en los mercados cercanos de San Gabriel y Tulcán, donde posteriormente el carbón fue redistribuido a los mercados más grandes, como en las ciudades de Ipiales, Colombia e Ibarra y Quito, Ecuador. Un denso y húmedo bosque montano cubría las laderas. Según un agricultor que se dedicó en este entonces a ‘limpiar el terreno’:

Recuerdo cuando llegamos y vimos hacia arriba un bosque inhóspito. Lo primero que teníamos que hacer era tirar la montaña al suelo. Cortamos y quemamos los árboles, y luego los quemamos de nuevo,

antes de que pudiéramos ver el suelo. Solo entonces podíamos pensar en sembrar cultivos [...] Para sobrevivir, teníamos que dedicarnos a la producción de carbón. No había otra forma de ingresos. A cambio [de carbón] saldamos la deuda de la tierra y trajimos arroz [como alimento] de Julio Andrade y San Gabriel.

La extracción de carbón vegetal en las tierras altas de Carchi fue una importante fuente de ingresos durante décadas. Sin embargo, al final de la década de los sesenta, los recursos forestales comenzaron a agotarse hasta el punto en que la producción de carbón dejó de ser un medio de vida viable, excepto para una minoría de la población. Para la gente de Mariscal Sucre [84], “el bosque se acabó en 1970. Cada familia tuvo su bloque de bosque que se acabó y [como resultado] tuvo que volverse hacia otra cosa”. Una vez terminados los bosques, para las familias que practican la agricultura como parte de su medio de vida, el siguiente piso de intervención es el páramo como forma de lograr acceso a mejores suelos y a suficiente humedad para los cultivos, contribuyendo de esta manera a la degradación del páramo una vez que estas actividades se establecen.

Según el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE, 2021), la práctica de la quema asociada con el pastoreo animal y la agricultura es relativamente común en las tierras altas de las provincias de Carchi, Imbabura y Pichincha, tanto como en Azuay y Loja en el sur. En la última década se han observado incendios que duran semanas y hasta meses en los páramos del Atacazo, Corazón, Pasochoa, Mojanda, Guagua y Rucu Pichincha; aunque no todos los casos se deben a la quema intencional para agricultura y ganadería. Indudablemente las zonas quemadas son propensas a ser intervenidas para estos fines. En sus últimas estadísticas de incendios forestales, el MAATE encuentra que la tierra agrícola representaba más de la mitad de las 5176 ha quemadas en el país, con la mitad de este total en las provincias de la Sierra. El herbazal de los páramos fue el ecosistema natural con más superficie quemada, con unas 493 ha directamente afectadas.

De todas formas, la literatura demuestra que las quemas periódicas en los páramos no necesariamente reducen la capacidad de retención de humedad de los suelos (Farley et al., 2013), y las quemas periódicas para reducir la vegetación leñosa pueden incluso mejorar la retención de agua en los suelos de páramo al promover el predominio de pastos (Harden et al., 2013) y la combinación de pastoreo ligero y la quema pueden aumentar la biodiversidad (Suárez y Medina, 2001).

Degradación de los suelos

Los tres casos presentados revelan la manera en que la degradación de los suelos en el valle interandino y en las laderas de las cordilleras puede fomentar

migración hacia las tierras más altas. Mientras los datos del Estado muestran una tendencia hacia la reducción del área de cultivo en la Sierra, sobre todo de los cultivos de altura papas, cebada y pastos (INEC, 2010), los estudios presentados aquí muestran una disminución en la superficie de páramos. Nuestra impresión es que el descuido de las áreas naturales por parte de las comunidades rurales tiene que ver con la degradación de la zona interandina en los pisos más bajos.

En la Sierra hay una superficie total de 280 km² de cangahua aflorante, principalmente en las provincias de Pichincha, Imbabura y Carchi (Hidrobo et al., 2015). El ambiente desértico de la cangahua es el resultado de décadas de sobrepastoreo, especialmente con ganado vacuno, seguido por agricultura basada en una labranza mecanizada y el cultivo en pendientes sin obras de conservación. La cangahua se caracteriza por agregaciones cementadas que parecen ser muy estables desde una perspectiva litológica, pero después de una labranza mecanizada, tiende a descomponerse en partículas elementales de limo y arena (Podwojewski y Germain, 2005). Estas cualidades hacen que los suelos de cangahua sean altamente vulnerables a la compactación y procesos de escorrentía durante las lluvias, llevando a la formación de desiertos que ocupan un territorio creciente en la región interandina. Sin otras opciones de medios de vida para la población, el crecimiento de los desiertos antrópicos y la pérdida de tierra arable hace necesaria la búsqueda de nuevos territorios en los pisos más altos.

Caulfield (2020b) muestra que la agricultura a pequeña escala en las zonas andinas de la Sierra Central a menudo se lleva a cabo en pequeñas comunidades indígenas en las que cada familia suele administrar una cantidad de campos dispersos en diversas topografías y microclimas. La degradación de la tierra causada por la erosión, el agotamiento de la materia orgánica del suelo y los balances negativos de nutrientes representan una amenaza generalizada a largo plazo para estos sistemas agrícolas de pequeña escala.

Como lo han explicado Fonte et al. (2012), las pendientes empinadas de estos agroecosistemas montañosos de los Andes significan que los paisajes son inherentemente susceptibles a la erosión. La degradación del suelo no solo implica la pérdida de importantes nutrientes del suelo, sino también la pérdida de la actividad biológica del suelo y la estructura asociada, que desempeñan un papel fundamental en la captura y retención del agua del suelo, el reciclaje de nutrientes, la penetración de las raíces y la productividad general de las tierras agrícolas.

Como está documentado por Caulfield et al. (2020b) en Chimborazo, aunque la pérdida de fertilidad del suelo puede compensarse en parte mediante la adición de fertilizantes, la rehabilitación de la salud y la productividad general del suelo es un proceso mucho más lento. El manejo colectivo de los paisajes por comunidades indígenas en Chimborazo genera una cierta cultura de uso de enmiendas

orgánicas, que, a pesar de su influencia en la fertilidad para la producción inmediata, a través del tiempo no frena la degradación de los suelos. Mientras las áreas bajas pierden su productividad, las comunidades migran hacia áreas cada vez más altas, haciendo necesaria la introducción de medidas de conservación de suelo y el uso de una cantidad creciente de enmiendas. Esta dinámica se repite en las zonas de agricultura familiar en lugares como Carchi (Valverde et al., 2001).

La deforestación de los bosques altoandinos seguido por incendios y la labranza para fines agrícolas no necesariamente daña los páramos en forma permanente. Sin embargo, combinado con una sobreexplotación del agua, los incendios y el sobrepastoreo pueden fomentar una erosión progresiva y últimamente una destrucción de los sistemas hídricos.

Pérdida de la agrobiodiversidad

La pérdida de la agrobiodiversidad en el Ecuador está asociada con un proceso de modernización agropecuaria dirigida principalmente por las demandas del mercado nacional en vez de la cultura local o los ecosistemas (Oyarzún et al., 2013). Esto ha implicado, por una parte, la eliminación de la biodiversidad nativa para dar paso a la producción agropecuaria, y por otra, la reducción del número de especies cultivadas debido a la concentración de la actividad en monocultivos de alto valor económico por grado de integración con el mercado y la demandada de los compradores. Esta realidad ha generado que la producción agropecuaria, en los tres casos presentados, sea altamente vulnerable, tanto a las fluctuaciones por el precio de los cultivos comerciales, como a los desbalances ecológicos y sociales resultantes de una baja diversidad inter e intraespecífica en las parcelas.

Si bien las consecuencias son comunes a los tres casos presentados, la situación varía de acuerdo con los aspectos que se ensamblan en cada territorio. Las pérdidas de diversidad en el sistema papa-pasto en Carchi, el sistema lechero y de cultivos para exportación en Pedro Moncayo, Pichincha y en el sistema de producción de subsistencia en Chimborazo presentan consecuencias diferenciadas. Los múltiples efectos que se retroalimentan en un sistema agropecuario que ha perdido la diversidad de especies se explica a través del ejemplo del sistema papa-pasto en las condiciones territoriales de la provincia del Carchi (Vásquez et al., 2015). El sistema papa-pasto de Carchi surge por una creciente demanda nacional por el consumo de papa y lácteos, combinada con el acceso de las familias agricultoras campesinas a tierras fértiles y húmedas altamente productivas, aunque ubicadas en suelos pendientes, y la cercanía a los mercados de consumo, tanto en Colombia como en el Ecuador. La rápida modernización del sistema de producción implicó que no solo se dejaran de producir otras especies de plantas, sino también otras variedades de papa.

El estudio de Sherwood (2009) demuestra que las variedades de papa cultivada se redujeron de un promedio de ocho por parcela que se conocían en los años setenta a menos de dos que se comercializan en la actualidad. Esta reducción en la agrobiodiversidad ha tenido consecuencias concretas. El desbalance ecológico propiciado por el monocultivo de papa ha implicado la aparición de plagas y enfermedades cada vez más difíciles de controlar mediante la aplicación de agrotóxicos, los que se aplican cada vez en mayor concentración y frecuencia. Desde el punto de vista de la salud, la aplicación indiscriminada de agrotóxicos ha generado una epidemia de intoxicaciones por plaguicidas a nivel de la población de Carchi. En lo económico, la volatilidad de los precios de la papa en los mercados nacionales, frente a la escalada continua de los precios de los insumos químicos, principalmente importados de los mercados internacionales, deja a las familias rurales con un alto grado de vulnerabilidad productiva y alimentaria, pues el monocultivo de papa ha desplazado a otras especies comestibles (Figura 9.7) que ahora son reemplazadas con productos procesados que se compran en el mercado local.



Figura 9.7 Los tubérculos andinos tradicionales como la oca (*Oxalis tuberosa*) y la mashua (*Tropaeolum tuberosum*) han sido crecientemente desplazados por el monocultivo de papa. Fotografía: Robert Hofstede

Inestabilidad demográfica en el campo

En el 2019 el 43,22 % de los agricultores y agricultoras en el Ecuador tenía una edad promedio entre 41 y 60 años, y el 38,73 % era de la tercera edad (ESPAC, 2019). Es común encontrar comunidades en la Sierra ecuatoriana donde el 30 % o más de los hogares están abandonados (Caulfield, 2019b). En lugares como Chimborazo, la salida de migrantes y la recepción de sus remesas han llevado a la disminución de las poblaciones rurales. Diversas publicaciones han sugerido que tales procesos condujeron al abandono de la agricultura y al resurgimiento de la vegetación nativa, lo que socavó los medios de vida tradicionales y a la par brindó una gran ayuda para la conservación de la biodiversidad a nivel de América Latina (Aide y Graul, 2004) y global (Rudel et al., 2005). Sin embargo, los estudios a nivel de hogar en la Sierra encuentran efectos mixtos y complejos de la emigración y las remesas en la agricultura que ponen en duda esta premisa.

Paredes (2010) describe una migración progresiva de parte de las personas jóvenes del campo carchense debido a múltiples factores, incluyendo el incremento en los costos de vida al principio de los años dos mil, combinado con una baja relativa en el precio de los productos. Durante este periodo, las pérdidas por campaña de siembra de papas aumentaron de 46 a 60 %. Debido a los crecientes riesgos asociados con la agricultura moderna, la mayoría de las familias rurales preferían que sus hijos e hijas migraran a las ciudades donde había una mejor oportunidad de educación y empleo. Sin embargo, familias que practicaban un estilo de agricultura más comercial (mecanización y alto uso de agroquímicos para una mayor producción) promovía la salida permanente de los y las jóvenes para estudiar y luego trabajar en la ciudad. Mientras las familias que practicaban un estilo de agricultura campesino, más autónomo de los mercados (tanto de insumos como de productos) y centrado en la vida rural, promovían la emigración temporal de los y las jóvenes, enfocada en una educación para el manejo futuro de la finca y por tanto planificaban su regreso. De manera general, la educación profesionalizante o universitaria de las hijas mujeres era una prioridad para la mayoría de las familias, que, por los roles tradicionales de género en Carchi, no veían a sus hijas manejando la finca en el futuro y esperaban que puedan desempeñarse como profesionales fuera de la finca, incluyendo como ejemplo a profesoras, médicas y contadoras.

Martínez (2013) y Paredes et al. (2013) encontraron que en Cotopaxi las personas jóvenes se insertan en el mercado de trabajo de las florícolas durante la semana y subsidian la agricultura de las generaciones mayores en las zonas medias y altas, lo que está permitiendo la compra y el uso de insumos externos a la finca. Caulfield et al. (2019b) identificaron tres formas principales de migración en

la Sierra central: dentro de las comunidades, temporal y permanente de miembros de la familia. Las diferentes formas de emigración tienen un efecto profundo pero distinto en los sistemas agrícolas de las comunidades, ya que los hogares que envían migrantes adaptan sus prácticas agrícolas y estrategias de subsistencia frente a los nuevos desafíos y oportunidades asociados con la migración. La mencionada investigación en Chimborazo observa que la migración temporal, en particular, genera aumentos importantes en los recursos financieros de las familias rurales, lo que lleva a inversiones en el cultivo de papa y, por lo tanto, a un mayor uso de agroquímicos y labranza mecanizada. Además, la menor disponibilidad de mano de obra en el hogar se asoció con un menor uso de técnicas de conservación del suelo y agua. Por lo tanto, se concluye que en estos casos la emigración contribuye a procesos significativos de degradación de los suelos en las tierras de las zonas altas. Estos estudios concuerdan con estudios en el sur de la Sierra (Gray y Bilsborrow, 2014), lo que sugiere que la emigración rural, por sí sola, probablemente no conduce a una transición forestal y mayor protección de los páramos.

Nueva industrialización de las tierras altas

De acuerdo con la experiencia en Pedro Moncayo, Pichincha, la producción agrícola comercial a gran escala ha permitido la concentración de los recursos productivos, los procesos de producción y hasta el territorio en las manos de compañías privadas dedicadas principalmente a una intensificación y mercantilización de la producción (Guarderas et al., 2022). Este sector creciente en la Sierra produce para mercados nacionales, por ejemplo, papas, pasto para animales de carne y leche y árboles para la producción de láminas de aglomerados para la construcción,¹ tanto como la exportación de productos como carne de pollo, brócoli y flores (Martínez, 2013).

En muchos sectores de las tierras altoandinas, el control de los recursos naturales está pasando por la consolidación de un modelo empresarial que parece profundizar las tendencias social y ambientalmente dañinas de la modernización. Tal como ocurre en Pedro Moncayo con la territorialización de las florícolas en zonas con acceso al riego, Martínez (2013) muestra como un modelo de mercantilización profunda está territorializando en Cotopaxi, sobre todo en la producción de flores y brócoli de exportación. Mena-Vásquez et al. (2016) explican cómo una tendencia de la producción de exportación de flores en Pisque, Pichincha involucra pequeños productores, generando una reorganización social

¹ Según la página web de Aglomerados Cotopaxi, la siembra de árboles en las faldas del volcán Cotopaxi inició en 1976 con 1600 hectáreas llegando a 18000 has en 2019 (<https://www.cotopaxi.com.ec/nosotros/historia>, consultado el 11 de abril del 2023).

en las localidades y promoviendo conflictos sobre el acceso al agua para fines de producción. En términos generales, parece que el sector de los invernaderos en las comunidades campesinas ha crecido en la producción de verduras, frutas, flores, ornamentales y, en general, cultivos de vivero. Ciertos autores argumentan que la resiliencia de la industria de invernaderos en el Ecuador ayuda a cuestionar la afirmación sobre el inevitable declive de la agricultura de montaña frente a la modernización y la globalización (Knapp, 2017).

En el estudio de Latorre et al. (2022), los autores encuentran que el 7,8 % de la población en Pedro Moncayo se dedica a la producción especializada de alto valor, siendo la mayoría jóvenes que producen flores bajo invernadero. No conocemos de estudios determinantes sobre el tamaño de este fenómeno, pero, por los trabajos citados, es evidente que ocurre bajo diferentes modalidades, incluyendo arreglos de producción bajo contrato con productores pequeños, el alquiler de tierras, mano de obra u otros factores de producción, la compra de la tierra y el desplazamiento de la población.

Reflexiones finales

A pesar de ser una región relativamente interconectada e integrada (Hofstede et al., 2014), los páramos del Ecuador están en peligro de fragmentarse, en gran parte por la explotación de las aguas y la degradación progresiva de las tierras que les rodean. Los estudios que revisamos en este capítulo no describen una sola dinámica dominante, sino procesos heterogéneos dentro y entre cada zona. Por un lado, la presión de la población sobre las tierras altas representa una amenaza y, por otro lado, esta población podría garantizar su cuidado y sobrevivencia con medios de vida alternativos, especialmente aquellos que valoran no solo la maximización de la utilidad o competitividad de los mercados, pero también el funcionamiento de las ecologías y el cuidado de los ecosistemas.

Los límites de la modernización agrícola

Preocupados por la incapacidad del sistema de las haciendas de alimentar a un público creciente y urbano, y por los conflictos sociales en el campo, hace 60 años, Ecuador optó por organizar sus sistemas agroalimentarios alrededor de la modernización. A pesar de ser un proceso desigual en diferentes regiones del país, en términos generales la Reforma Agraria y la modernización del agro fue más exitosa en el norte de la Sierra que en el sur, contribuyendo a una ampliación de la frontera agrícola al costo del retroceso de las formaciones vegetales naturales y densificación poblacional (Gondard y Mazurek, 2001). El proceso de

transformación territorial desde los años sesenta ha traído una mayor complejidad al territorio que, en este momento, está sujeto a una dinámica orientada a los mercados comerciales y articulado a industrias agrícolas que han traído cambios significativos en las estrategias económicas, sociales y culturales de las familias de origen campesino e indígena.

En el proceso de priorizar el mercado comercial como la forma más apta para la organización humana, el Estado y sus públicos han descuidado las ecologías y los ecosistemas de los cuales dependen los fundamentales procesos biológicos de producción de alimentos, en particular los suelos, el agua y los recursos genéticos. A fines del siglo XX e inicios del siglo XXI, la modernización del agro y la concentración de las mejores tierras y recursos en las zonas bajas para la agricultura industrial y de exportación han motivado la búsqueda de tierras altas por parte de las familias campesinas que hacen de la producción agrícola parte de su medio de vida. Este fenómeno se aprecia en cada uno de los tres sitios reportados: la cordillera Oriental y Occidental de Carchi (Sherwood, 2009), Pedro Moncayo, Pichincha (Guanderas et al., 2022) y Flores, Chimborazo (Caulfield et al., 2020b). Sin embargo, por nuestras diferentes investigaciones,² también conocemos de propietarios grandes que usan tierras para la ganadería o para la producción de cultivos antes confinados ecológicamente a los pisos más bajos como la papa, el chocho o la quinua en Carchi (comunicación personal con productores de Carchi, diciembre de 2022) o para la explotación de bosques para madera en Cotopaxi.³ Sus principales motivaciones son el precio competitivo de estos productos, los altos rendimientos que proveen las tierras nuevas de páramo y el acceso más inmediato a la humedad y el agua de riego. Tanto familias campesinas como nuevos propietarios están incursionando también en los cultivos de flores bajo invernadero a grandes alturas (Paredes, notas de campo, 2022) o de pastos para la ganadería lechera vinculada a la industria (Martínez-Godoy, 2016). Estas modalidades de producción merecen mayor atención debido a su potencial detrimento para los páramos a niveles irreversibles.

De acuerdo con los estudios sobre la evolución de la agricultura moderna de las tierras altas, en su conjunto los agricultores, extensionistas, facilitadores, compañías comerciales, agencias públicas y privadas parecen estar acoplados a un sistema de producción no adaptativo, letal y eventualmente autodestructivo

² Paredes en el proyecto "Fortaleciendo las redes alternativas de alimentos para prevenir la hipertensión arterial y la diabetes" el cual toma lugar en parte de los páramos de Cayambe y Pedro Moncayo entre 2019 y 2024. Paredes en proyecto "Agua para la producción y producción para la alimentación" entre 2011 y 2015. Sherwood en comunicación personal con Euler Fuentala.

³ <https://www.cotopaxi.com.ec/nosotros/historia>

(desde el punto de vista financiero, de salud humana y de fertilidad del suelo). La experiencia empírica con intervenciones de investigación y desarrollo demuestra que los mayores obstáculos al cambio en la trayectoria de desarrollo rural en lugares como Carchi, Pichincha y Chimborazo no han sido una 'falta' de información, conocimiento, tecnología o alternativas de mercado, como comúnmente afirman agricultores, expertos y decisores de políticas (Sherwood et al., 2015; Chamorro-Cristóbal, 2020). El cambio fundamental de paradigma hacia los insumos externos y los mercados comerciales ha puesto límites a la capacidad institucional para resolver problemas complejos de salud del ecosistema (Sherwood et al., 2015). En particular, las propuestas externas socavaron los mecanismos contextualizados y de acoplamiento social y ambiental —en este caso, prácticas agrícolas más ecológicas y 'responsables'.

Sin embargo, estas tendencias no ocurren en un vacío. En el Ecuador, las contradicciones de la modernización agroalimentaria han generado diversos contramovimientos, tanto en el sector rural como en el urbano, que juntos son capaces de abrir (y cerrar) oportunidades, representando un recurso político para sistemas agroalimentarios más regenerativas y potencialmente favorables para los fines de conservación (Paredes et al., 2020).

Contramovimientos promisorios

Parece poco probable que el cambio profundo pueda surgir desde el interior de los presentes escenarios. Pero gracias a los contramovimientos, irónicamente, las mismas contradicciones del sistema moderno parecen estar generando las condiciones para un nuevo paradigma futuro. Si no enfrentamos la situación, es claro que la sociedad ecuatoriana seguirá su proceso sistemático de destruir los páramos. En los casos presentados se observan dos formas de recuperación y conservación de los páramos: aquellos lugares donde es difícil cultivar debido a las pendientes pronunciadas y donde las poblaciones han emigrado, ya sea porque han abandonado la actividad agrícola o porque han logrado otras formas de producción en los pisos más bajos, como en el noroeste de Pedro Moncayo. Unas formas de producción buscan adaptarse a la corriente y las redes de la modernización, como es la producción de rosas de exportación y otros productos de alto valor por parte de familias campesinas (Mena-Vásquez et al., 2017), mientras que otras, al ser de subsistencia, utilizan bajos insumos o se dedican a la producción agroecológica libre de agroquímicos (Latorre et al., 2022).

Varias investigaciones en la zona de estudio (Chávez-Caiza y Burbano-Rodríguez, 2021; Sinchiguano, 2017), así como alrededor del mundo (Albarracín-Zaidiza et al., 2019, Lucattoni et al., 2023) encuentran que el sistema de

producción agroecológica presenta mejores indicadores económicos, sociales, ambientales, institucionales y productivos que los sistemas convencionales modernos. Además, este sistema es capaz de regenerar el ecosistema en zonas degradadas (Kpienbaareh et al., 2022); esta práctica representa un gran potencial para sostener a familias agricultoras en los pisos más bajos que el páramo. No obstante, un aspecto importante de la producción agroecológica subyace en las organizaciones y redes construidas por las familias campesinas, pues, a pesar de existir en territorios altamente mercantilizados, funcionan de forma alternativa a la organización convencional del mercado de oferta y demanda, razón por la que se denominan Redes Alternativas de Alimentos (Goodman et al., 2012).

El éxito de estas redes depende de acortar las distancias físicas, socioeconómicas y culturales entre quienes producen y consumen para convertirlos en coproductores tanto de utilidades individuales, como de fines colectivos (Arce et al., 2015). Entre estos fines colectivos identificamos el cuidado de la salud de las personas (Paredes, 2010), la agrobiodiversidad (Oyarzún et al., 2013), la nutrición humana, el desarrollo económico y la salud del suelo (Natividad et al., 2020). En última instancia, también encontramos que estas redes son favorables para la protección de los páramos cuya función, en una perspectiva relacional, se considera central para la continuidad de la vida en los pisos más bajos.

En cada uno de los sitios de los casos presentados se puede encontrar diferentes movimientos de agroecología, permacultura y forestería análoga, entre otros esfuerzos de regeneración de los ecosistemas. De esta manera, quienes producen y quienes consumen y están involucrados en redes de alimentos alternativos, buscan alianzas para la coproducción de alimentos de suma positiva, facilitadas a través del mercadeo, los intercambios cara a cara y la corresponsabilidad en todas las partes del proceso. Es decir, la gestión ecológica de los páramos es una encarnación necesariamente compartida mediante una práctica agroalimentaria capaz de rehabilitar las áreas de altura degradadas: una “agroalimentación para la vida” (Sherwood et al., 2023). De acuerdo con el Colectivo Agroecológico y otros movimientos similares en el Ecuador, existen diversas experiencias de agroecología sostenible en las zonas de subpáramo (hasta 3200 m) a lo largo de la Sierra (Gortaire, 2016), pero son menos conocidas las experiencias adaptadas a las zonas de páramo de mayor altura. De todas formas, debido a la lenta recuperación en la riqueza de las especies y las estructuras poblaciones (Sarmiento et al., 2003) y los peligros de fomentar daños irreversibles al suelo y la hidrología (Podwojewski et al., 2002; Thompson et al., 2021), no podemos recomendar que la frontera agrícola siga avanzando hacia arriba sin minar fundamentalmente la funcionalidad ambiental de los páramos.

El redireccionamiento del agro: desde un problema hacia una solución para los páramos

Diversas fuentes recomiendan una intensificación de la agricultura de las zonas altas (Hofstede, 1995; Sarmiento et al., 2002), entendida como la habilidad de mejorar la producción por área o la productividad a través de prácticas ambientalmente amigables o 'ecológicas', como los abonos verdes y la coexistencia con especies exóticas, pero poco nocivas. Mientras podemos apreciar la utilidad de este enfoque en ciertos casos, como política general, dada la presión existente en los páramos y la pobre historia del desempeño de la agricultura actual en cuidar los recursos naturales, priorizamos cambios más fundamentales en la matriz agrícola y alimentaria hacia la rehabilitación de las ecologías y la restauración de los ecosistemas.

En los casos examinados, donde el producto de una política pública inspirada por la modernización agroalimentaria ha sido un alto grado de autodestrucción de la organización social, la reorganización institucional de los sistemas agroalimentarios se ha vuelto una prioridad para un futuro más prometedor (Sherwood et al., 2015). Mientras que la familia campesina decide sobre el estilo de agricultura en torno al cual organizar sus medios de subsistencia, los programas de gobierno y el régimen de expertos hacen que ciertos estilos de agricultura sean más viables que otros, tanto por sus propósitos explícitos y bienes generados, como por sus contradicciones implícitas y males sociales. Una contracorriente de estilos de agricultura poco valorados revela que las familias rurales en el Ecuador continuamente transforman las políticas públicas para agenciar su propia forma de vida (Paredes, 2010). En lugar de imponer una política pública de desarrollo rural sustentable basada en un modelo, la política requiere centrarse en las prácticas existentes (Henfrey et al., 2023), promoviendo, en este caso, aquellas que ya están permitiendo no solo la conservación de los páramos, sino también la formación de organizaciones y redes que sostienen este objetivo. Nos referimos, por ejemplo, a un cambio de perspectiva en las políticas en el ámbito de la educación y la investigación agrícola (Miles et al., 2017) o aquellas políticas relativas a la producción y al consumo, dos ámbitos que generalmente se miran de forma separada (Hatt et al., 2016).

Tal como las prácticas agrícolas modernas, basadas en insumos, tecnologías y conocimiento externos a las realidades locales estuvieron promovidas desde el Estado, tanto a nivel de la enseñanza agronómica como a nivel de los centros de investigación, un cambio de paradigma en la agricultura requiere de un impulso a la enseñanza y la investigación de los sistemas regenerativos. Estamos en gran parte a oscuras con respecto a los acontecimientos

biológicos y las consecuencias a largo plazo de la agricultura (y la alimentación) de la Sierra en la salud del suelo, sin mencionar los fenómenos globales, como la acumulación de carbono atmosférico. Además de una comprensión básica de la biología y cómo se organizan los ecosistemas, hacen falta metodologías de investigación que puedan ayudar a arrojar luz sobre cómo las diversas formas de hacer agricultura influyen en la restauración de los suelos, la vegetación y los ecosistemas de altura.

Por otra parte, el análisis de alternativas para los páramos demanda de una mirada holística. La restauración del funcionamiento ecológico requiere la participación de quienes producen como también de quienes consumen y que, sin embargo, no siempre se ubican como actores centrales (Martínez-Godoy, 2016; López-Sandoval y Maldonado, 2020). Una perspectiva multiactores permitirá incluir el tratamiento de los conflictos entre agricultura y conservación de páramos. Cuando hablamos de alternativas a la crisis de destrucción de los páramos vinculada a otras crisis como el cambio climático, las enfermedades crónicas basadas en la alimentación o la pérdida de biodiversidad, descubrimos que tanto desde el lado de la producción como del consumo se pueden traer a la luz nuevas oportunidades (April-Lalonde et al., 2020). Esta búsqueda de alternativas incluye otros usos del páramo por parte de las comunidades y habitantes de altura como el agroturismo y el turismo de altura que les permita una vida digna. Pero últimamente, un futuro más promisorio depende de la capacidad humana de colapsar las dicotomías en las que la práctica diaria de buscar alimentos degenera nuestras ecologías y de la posibilidad de identificar e invertir en los estilos de vida que efectivamente nutren y rehabilitan las relaciones socioambientales que necesitamos para vivir.

CAPÍTULO 10

LA MINERÍA EN LOS PÁRAMOS DEL ECUADOR—SITUACIÓN ACTUAL Y FUTURA

Fausto López-Rodríguez | Bryan Idrovo-Torres

Minería de piedra en Antisanilla.
Fotografía: Ricardo Jaramillo



Resumen

Los páramos son reconocidos por su importancia socioeconómica y ambiental. Sin embargo, se encuentran seriamente amenazados por actividades antrópicas, como la agricultura y la minería. La actividad extractiva está en pleno crecimiento en el Ecuador. En la actualidad, aproximadamente el 10 % de la superficie del país está en concesiones mineras, pero de acuerdo con las proyecciones del Plan de Desarrollo del Sector Minero 2020-2030, al año 2030 se entregarían en concesiones más de 5 millones de hectáreas, lo que significa un 21,5 % del territorio nacional. La alteración de los páramos y los ecosistemas asociados (como los humedales altoandinos) por esta actividad, particularmente por el método a cielo abierto, se origina por la remoción total de la cobertura vegetal, apertura de caminos, excavación, movimiento de tierras, uso de maquinaria pesada, desvío de los cursos naturales de agua, compactación del terreno e instalación de infraestructura, entre otras actividades.

Estas actividades, además de la afectación al recurso hídrico, impactan en otros servicios ecosistémicos como la captura y almacenamiento de carbono y la pérdida de la biodiversidad, aunque la intensidad de estos impactos dependerá de la escala de la operación, los métodos de explotación, la ubicación de la mina y la eliminación de los residuos mineros. Por lo tanto, es fundamental que se realicen los esfuerzos necesarios para proteger y conservar los ecosistemas de páramo en el Ecuador, ya que son de gran importancia económica y ambiental y claves para el desarrollo sostenible de nuestro país.

Summary

Páramos are recognised for their socio-economic and environmental importance. However, they are seriously threatened by anthropogenic activities, such as agriculture and mining. Extractive activity is in full growth in Ecuador. At present, approximately 10% of the country's surface area is under mining concessions, but according to the projections of the Mining Sector Development Plan 2020-2030, more than 5 million hectares will be granted concessions by 2030, which constitutes 21.5% of the national territory. The alteration of páramos and associated ecosystems (such as high Andean wetlands) by this activity, particularly by the open-pit method, is caused by the total removal of vegetation cover, opening of roads, excavation, earth movement, use of heavy machinery, diversion of natural watercourses, compaction of the terrain, and installation of infrastructure, among other activities.

These activities, in addition to affecting water resources, impact other ecosystem services such as carbon capture and storage and biodiversity loss, although the intensity of these impacts will depend on the scale of the operation, the mining methods, the location of the mine and the disposal of mining waste. It is therefore essential that efforts are made to protect and conserve Ecuador's páramo ecosystems, as they are of great economic and environmental importance and key to the sustainable development of our country.

Introducción

En la actualidad, la minería está experimentando un crecimiento de la producción nunca visto. El mercado mundial de minerales y metales preciosos se ha disparado y las cantidades extraídas se han multiplicado exponencialmente. El oro, reconocido como uno de los elementos más buscados y demandados en el comercio internacional, es también el metal precioso más explotado en la producción minera mundial. En el caso de Sudamérica, países como Colombia, Perú, Bolivia, Chile, Brasil y Argentina destacan por la producción y exportación de oro, un mercado en el que Ecuador se ha vuelto cada vez más competitivo en los últimos años como parte de una estrategia de diversificación productiva (Mestanza et al., 2022).

El desarrollo de la industria minera a gran escala es una prioridad económica para varios países de la región andina, como es el caso de Colombia, Ecuador y Perú. Sin embargo, la contribución del sector minero al Producto Interno Bruto del Ecuador (PIB)¹ todavía es baja, considerando que en el 2017 fue de 1,63 %, mientras que en Perú alcanzó el 8,33 % (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2020). Sin embargo, de acuerdo con el Banco Central del Ecuador (2022), considerando solamente la participación de la explotación de minas y canteras, el PIB pasó, entre 2007 y 2021, de 0,29 a 0,87 %.

Los páramos se encuentran seriamente amenazados por actividades antrópicas, tales como agricultura, ganadería y, últimamente, la minería. Si bien es cierto que la minería cobra cada vez más relevancia en el modelo económico ecuatoriano, es necesario señalar las repercusiones ambientales y sociales que esta actividad extractiva pueda tener a corto, mediano y largo plazo. Es también cierto, como se ha podido observar en los últimos años, el continuo crecimiento en la oposición pública a los proyectos de minería a gran escala, la que se ha generado por la preocupación de que esta actividad afecte negativamente los páramos y otros ecosistemas funcionalmente asociados (como los sistemas y complejos de humedales altoandinos) reconocidos por su importancia hídrica. El caso más reciente de rechazo es en contra de un proyecto minero que se pretende desarrollar en los páramos y sistemas lacustres de Fierro Urco,² en donde el conflicto ha escalado a niveles de violencia altos (Figura 10.1).

¹ Concentrado en los rubros “explotación de minas y canteras” y “fabricación de otros productos minerales no metálicos”.

² Fierro Urco, conocida como la “Estrella Hídrica del Sur del Ecuador” es un páramo localizado a 3788 m, entre las provincias de Loja y El Oro. Es el origen de cuatro cuencas hidrográficas: Jubones, Puyango-Tumbes, Zamora y Catamayo-Chira, tres de ellas binacionales. En estos páramos existen siete concesiones para minería metálica (oro, plata y cobre) que comprenden 27 272 ha.



Figura 10.1 Páramos y sistemas lacustres de Fierro Urco. Más de 27.000 ha de la cordillera de Fierro Urco han sido concesionadas para minería metálica. La importancia hídrica de estos ecosistemas altoandinos ha generado una dura resistencia de las comunidades locales frente a futuros proyectos mineros, especialmente los de minería a cielo abierto. Fotografía: Javier Vázquez

Aspectos legales relacionados con los páramos y la actividad minera

La Constitución de la República del Ecuador (2008) contiene varios artículos que condicionan la actividad minera en los ecosistemas frágiles y en fuentes de agua. El artículo 12,³ por ejemplo, establece el derecho humano al agua, como un principio fundamental e irrenunciable y está acorde con la visión de las Naciones Unidas (2002) que lo define como “un derecho de todos a disponer de agua suficiente, salubre, aceptable, accesible y asequible para el uso personal y doméstico”.

El art. 313,⁴ por su lado, incluye como parte de los sectores estratégicos, además de los minerales y el petróleo, a la biodiversidad, el patrimonio genético y el agua. Los yacimientos minerales, al ser recursos naturales no renovables, forman parte de los sectores estratégicos y, por su relevancia, son decisivos en los aspectos económicos, sociales, políticos y ambientales. Podemos observar, asimismo, que el agua también forma parte de los sectores estratégicos (al mismo nivel que el petróleo y los recursos minerales). La relevancia de los páramos, por su parte, está reconocida en el art. 406⁵ que identifica a los páramos, junto con los humedales, bosques nublados, entre otros, como ecosistemas frágiles y amenazados.

El art. 57 reconoce y garantiza 21 derechos colectivos a las comunas, comunidades, pueblos y nacionalidades indígenas entre los que se encuentra el

³ Art. 12.- El derecho humano al agua es fundamental e irrenunciable. El agua constituye patrimonio nacional estratégico de uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida.

⁴ Art. 313.- El Estado se reserva el derecho de administrar, regular, controlar y gestionar los sectores estratégicos, de conformidad con los principios de sostenibilidad ambiental, precaución, prevención y eficiencia. Los sectores estratégicos, de decisión y control exclusivo del Estado, son aquellos que por su trascendencia y magnitud tienen decisiva influencia económica, social, política o ambiental, y deberán orientarse al pleno desarrollo de los derechos y al interés social. Se consideran sectores estratégicos la energía en todas sus formas, las telecomunicaciones, los recursos naturales no renovables, el transporte y la refinación de hidrocarburos, la biodiversidad y el patrimonio genético, el espectro radioeléctrico, el agua, y los demás que determine la ley.

⁵ Art. 406.- El Estado regulará la conservación, manejo y uso sustentable, recuperación, y limitaciones de dominio de los ecosistemas frágiles y amenazados; entre otros, los páramos, humedales, bosques nublados, bosques tropicales secos y húmedos y manglares, ecosistemas marinos y marinos-costeros.

principio 7 que se refiere a la consulta previa, libre e informada. Sin embargo, casi la totalidad de los conflictos socioambientales generados alrededor de los proyectos mineros a gran escala ha tenido su origen en la omisión o cumplimiento parcial de la participación de las comunidades y ciudadanos en general en la toma de decisiones frente a los proyectos que generan impactos ambientales.

Con respecto al COA (2017) y su reglamento, contienen varios artículos orientados a la conservación de los páramos. En pocas palabras, el COA reconoce a los páramos como ecosistemas esenciales para el mantenimiento de las fuentes hídricas, el almacenamiento y captura de carbono, así como su importancia socioeconómica para las comunidades que viven en los páramos o sus áreas aledañas (Capítulo 7).

Por su parte, la Política de Ecosistemas Andinos del Ecuador (Ministerio del Ambiente, 2009), en lo que se refiere a los páramos, determina que su manejo “debe propender a la conservación de los recursos naturales y a la sostenibilidad de la biodiversidad, donde las actividades productivas deben ser únicamente de subsistencia y ecoturísticas, enmarcadas en un plan de manejo integral aprobado por la autoridad ambiental”.

La actividad minera en el Ecuador

En los últimos años, la actividad minera ha recibido mucha atención por parte de los gobiernos que han buscado posicionar al Ecuador como un país minero. Para ello han desarrollado el marco legal e institucional adecuado para fomentar la industria minera y la atracción de capitales extranjeros, considerando que el Ecuador tiene reservas importantes, principalmente de oro, plata y cobre.

En el Ecuador, esta actividad es considerada estratégica, con una presencia cada vez más fuerte en la matriz productiva del país, no solo por la importante generación económica y de empleo que implica, sino también por el papel relevante que juega en la atracción de inversión extranjera directa.

Pero no fue sino hasta el año 2007 que la minería a gran escala fue considerada como una actividad estratégica para el desarrollo económico y social del país. Así, con la aprobación de la Ley de Minería (2009) y con la intención de dinamizar esta actividad y estimular la inversión en proyectos de exploración y explotación, se estableció una nueva institucionalidad conformada principalmente por el Ministerio Sectorial, la Agencia de Regulación y Control Minero (ARCOM),⁶ el Instituto Nacional de Investigaciones Geológicas y Minero

⁶ En 2020, mediante Decreto Ejecutivo 1036, se fusionaron la Agencia de Regulación y Control de Hidrocarburos, la Agencia de Regulación y Control Minero y la Agencia de Regulación y Control de Electricidad, en la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables – ARCERNR

Metalúrgicas (INIGEMM), la Empresa Nacional de Minería (ENAMI EP) y los municipios en sus respectivos ámbitos de competencia (Mestanza et al., 2022). De esta manera, el Ecuador se convierte en un nuevo actor en el ámbito de la minería a gran escala en Latinoamérica.

La mayoría de las concesiones mineras para la minería artesanal, pequeña, mediana, y gran minería se encuentra localizada en la región andina, y en gran parte está destinada a la explotación de oro. En la Tabla 10.1 se encuentra la distribución de las concesiones mineras para oro en la región andina.

Tabla 10.1 Concesiones mineras de oro registradas en la zona andina del Ecuador. Las provincias de Loja y Azuay son las que tienen el mayor número de concesiones mineras.

	Provincia	Régimen de concesión					Total
		Minería artesanal	Pequeña minería	Mediana minería	Gran minería	Régimen general	
1	Carchi	1	2	2	14	-	19
2	Imbabura	-	3	7	18	1	29
3	Pichincha	10	5	-	-	14	29
4	Cotopaxi	7	13	-	5	-	25
5	Tungurahua	-	-	-	-	-	0
6	Bolívar	16	2	7	1	5	31
7	Chimborazo	16	2	-	-	-	18
8	Cañar	9	-	-	-	-	9
9	Azuay	131	57	4	9	6	207
10	Loja	381	47	-	2	-	430
	Total	571	131	20	49	26	797

Fuente: Adaptado de Mestanza-Ramón et al. (2022).

Aunque, como se aprecia en la Tabla 10.1, en el Ecuador existen 49 proyectos mineros a gran escala, cinco de ellos son considerados estratégicos: Fruta del Norte, Mirador, Río Blanco, Loma Larga (también conocido como Quimsacocha; Figura 10.2) y San Carlos Panantza, tres de los cuales se localizan dentro del *hotspot* Andes tropicales, en donde se localizan amplias zonas de páramo. El proyecto Río Blanco, ubicado en el área de amortiguamiento del Parque Nacional Cajas y en el bosque protector Molleturo-Mollepongo y Loma Larga. Comprende zonas de páramos y grandes complejos de humedales. En total, más del 28 % del páramo andino podría estar afectado por la actividad minera según Chunchu y Chunchu (2019).



Figura 10.2 Páramo de Quimsacocha en la zona de concesión minera de oro donde se ve una piscina de tratamiento de desechos y forestación con pinos. Fotografía: Gustavo Morejón

La situación actual y futura de la minería en el Ecuador

Es fundamental analizar las proyecciones de crecimiento de la actividad minera en el Ecuador porque, directa o indirectamente, afectarán los páramos y otros ecosistemas naturales. Para ello, tomamos como base el Plan de Desarrollo del Sector Minero 2020-2030, política pública minera que propone que al 2030 la minería sea considerada como uno de los pilares de la economía nacional. De allí que esta política proyecta que para el 2030 las concesiones mineras y los permisos de minería artesanal se extiendan dentro del rango de 3 007 174 a 5 345 567 ha (escenarios pesimista y optimista). Esto implicará que el 21,5 % de la superficie del territorio nacional⁷ esté bajo concesiones mineras. También este plan propone metas en lo que se refiere a investigación minera: proyecta que para el año 2024 se evalúe el 64,23 % del territorio nacional en cuanto a la disponibilidad de recursos minerales en áreas no exploradas.

Plan de Desarrollo del Sector Minero 2020 -2030

Las proyecciones establecidas en el Plan de Desarrollo del Sector Minero 2020-2030 (Ministerio de Energía y Recursos no Renovables, 2020) se presentan bajo tres escenarios (pesimista, tendencial y optimista), en lo que se refiere al número de concesiones y permisos de minería otorgados, exportación, recaudación tributaria y empleo, así como con los regímenes de minería definidos en la Ley de Minería (2009).⁸

⁷ Para este cálculo, se considera la superficie del Ecuador de 24,84 millones de hectáreas.

⁸ De acuerdo con la Ley de Minería (2009) existen cuatro tipos de minería: artesanal, pequeña minería, mediana minería y gran minería, definidos según los niveles de producción diarios que puede tener una mina.

Minería artesanal

Está destinada a la obtención de minerales cuya comercialización en general permita cubrir las necesidades de la comunidad, de las personas o grupo familiar que las realiza, únicamente dentro de la circunscripción territorial respecto de la cual se hubiere otorgado el correspondiente permiso. Al 11 de junio de 2020, el Sistema de Gestión Minera muestra la existencia de 2071 permisos de minería artesanal vigentes en el catastro minero a nivel nacional los cuales representan 10 292,52 ha. Se estima que para el 2030 este número llegará a 2874 concesiones en una superficie de 14 370 ha. Cada permiso de minería artesanal tiene 5 ha (Ministerio de Energía y Recursos no Renovables, 2020).

Pequeña minería

Con corte al 11 de junio de 2020, el Sistema de Gestión Minera muestra la existencia de 972 áreas (377 833,39 ha) de pequeña minería inscritas en el catastro minero a nivel nacional. En un escenario pesimista se otorgarían mensualmente entre 6 y 27 concesiones mineras por mes y, en el escenario optimista, entre 15 y 78 por mes. Se estima que al 2030, el número de concesiones de pequeña minería se encuentre dentro del rango 2961 y 6699, con un crecimiento de entre el 205 % y el 589 % comparado con el número de concesiones vigentes en el año 2020. Esto representaría 6699 concesiones mineras en una superficie de 2 569 212 ha. Cada concesión de pequeña minería comprende 388 ha (Ministerio de Energía y Recursos no Renovables, 2020).

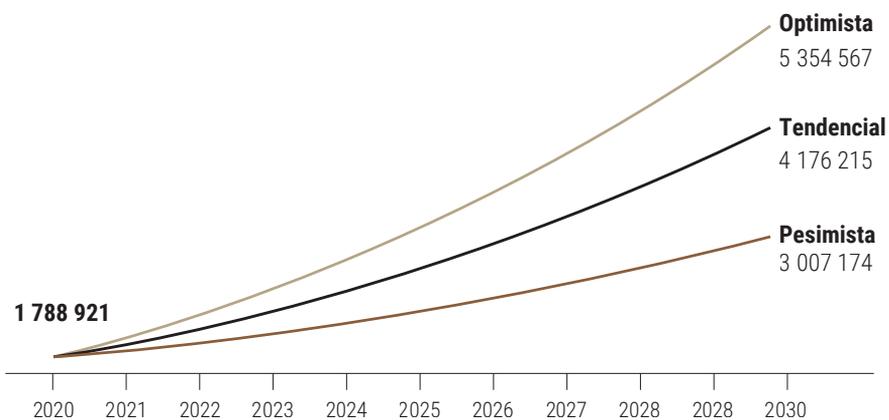


Figura 10.3 Proyección de hectáreas totales del sector minero bajo tres escenarios. Adaptado de Ministerio de Energía y Recursos no Renovables (2020).

Mediana y gran minería

Con corte al 11 de junio de 2020, el Sistema de Gestión Minera muestra la existencia de 483 áreas de mediana y gran minería (1 400 795,05 ha) inscritas en el catastro minero a nivel nacional. Se estima que al 2030 el número de concesiones de mediana y gran minería se encuentre dentro del rango 636 y 942, creciendo asimismo entre el 32 % y el 95 % comparado con el número de concesiones vigentes en el año 2020. De esta manera, al 2030 se habrán otorgado 942 concesiones mineras en una superficie de 2 731 985 ha. Cada concesión de mediana y gran minería se extiende tiene 2900 ha (Ministerio de Energía y Recursos no Renovables, 2020) (Figura 10.3).

Considerando las proyecciones anteriores, se estima que al 2030 las concesiones mineras y los permisos de minería artesanal ocuparán, en el escenario optimista, una superficie total de 5 345 567 ha, que equivalen al 21,5 % de la superficie del territorio nacional (Ministerio de Energía y Recursos no Renovables, 2020) (Tabla 10.2).

Tabla 10.2 Número de concesiones mineras y número de hectáreas por cada escenario y tipo de concesión. Aunque el número de concesiones para la minería mediana y a gran escala es menor que la artesanal y pequeña minería, es la más extensa.

Escenarios	Pesimista		Tendencial		Optimista	
	Nro. de concesiones	Nro. de hectáreas	Nro. de concesiones	Nro. de hectáreas	Nro. de concesiones	Nro. de hectáreas
Artesanal	2734	13 670	2804	14 020	2874	14 370
Pequeña Minería	2961	1 148 979	4830	1 874 095	6699	2 599 212
Mediana y gran minería	636	1 844 525	789	2 288 100	942	2 731 985
Total					10 515	5 345 567

Fuente: Ministerio de Energía y Recursos no Renovables (2020).

Aunque el número de concesiones para la minería mediana y a gran escala es menor que la artesanal y pequeña minería, es la más extensa.

La actividad minera en los páramos

Conforme al catastro minero con corte al 2018, en el país existen 2 266 631 ha concesionadas (en trámite e inscritas), de las cuales el 55 % corresponden al régimen de gran minería (Astudillo, 2022). Si consideramos las concesiones para minería metálica en diferentes estados (archivadas, en trámite e inscritas), esta cifra llega 5 333 110 ha; sin embargo, tomando en cuenta solamente las concesiones de minería metálica en trámite e inscritas (vigentes), en la actualidad el país cuenta con 2 157 930 ha (Figura 10.4).

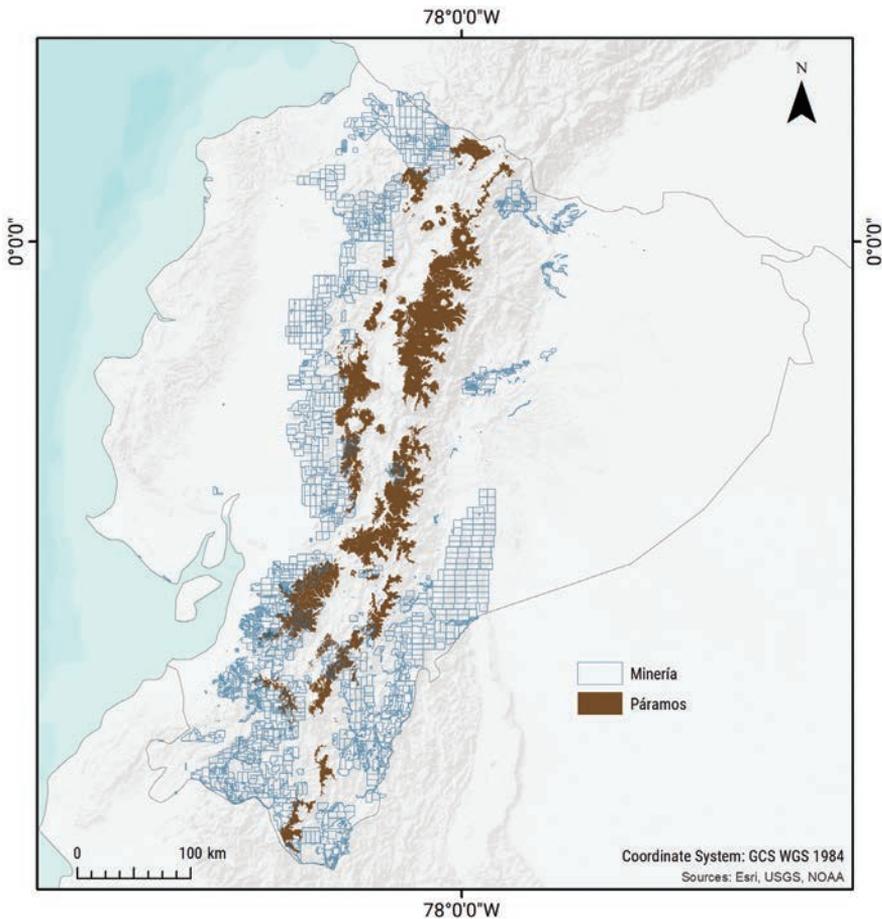


Figura 10.4 Concesiones para minería metálica y páramo. La región sur del Ecuador es la que tiene la mayor cantidad de concesiones de minería metálica, parte de las cuales afectan el páramo.

En el Ecuador existen 1 519 630 ha de páramo de las cuales, 113 836 están en concesiones de minería metálica (Tabla 10.3).

Tabla 10.3 Concesiones de minería metálica registradas en zona de páramo del Ecuador.

Concesiones mineras y páramo del Ecuador continental		
	Superficie (ha)	Páramo en concesiones (ha)
Concesiones mineras del Ecuador	2 157 930	113 836
Páramo total Ecuador	1 519 630	

Aproximadamente un 7,49 % del páramo del Ecuador se encuentra bajo concesiones de minería metálica. Hay que considerar que este porcentaje corresponde solamente al páramo que está fuera de las áreas protegidas, puesto que los páramos que están dentro del SNAP no están concesionados.

Los impactos de la minería en los páramos

Los impactos de la actividad minera⁹ en los páramos pueden ser de mayor intensidad que en otros ecosistemas naturales considerando la fragilidad y bajas tasas de recuperación que los caracteriza. Uno de los recursos que más se afecta es la red hídrica conformada por suelos, lagunas, ríos, turberas, humedales estacionales y aguas subterráneas.

Los principales impactos derivados de la minería a cielo abierto son la emisión de polvo a la atmósfera, el ruido, la degradación del suelo, el desvío de cursos de agua naturales y la contaminación del agua originada en los campos de lixiviación asociados a las minas, aunque su intensidad de los impactos va a depender de la escala de la operación, los métodos de explotación, la ubicación de la mina y la eliminación inadecuada de los residuos mineros. La alteración de la funcionalidad de los páramos y los ecosistemas asociados (como los humedales altoandinos), se origina por la remoción total de la cobertura vegetal, apertura de caminos, excavación, movimiento de tierras, uso de maquinaria pesada, desvío de los cursos naturales de agua, compactación del terreno e instalación de infraestructura, entre otras actividades. Además de la afectación al recurso hídrico, estas actividades impactan en

⁹ El artículo 27 de la Ley de Minería define las fases de la actividad minera: prospección, exploración, explotación, beneficio, fundición, refinación, comercialización y cierre de minas.

otros servicios ecosistémicos como la captura y almacenamiento de carbono y la pérdida de biodiversidad (Chuncho y Chuncho, 2019; Astudillo, 2022; Mestanza et al., 2022).

Un caso sobre los impactos que causa la minería en los páramos y que ha sido ampliamente documentado es el de la mina Yanacocha (la mina de oro más grande de Sudamérica) que ha causado la contaminación de las fuentes hídricas de la población de Cajamarca (Perú) y otras comunidades aledañas. La mina se localiza entre los 3500 y 4100 m, en la parte alta de Cajamarca. Además, se señala que los efectos de la minería en los páramos pueden tener consecuencias en cascada, afectando a otros ecosistemas y a las comunidades locales que dependen de ellos. Se advierte asimismo que numerosas especies de plantas, insectos y otros grupos de fauna que no han sido registradas todavía podrían desaparecer (Kraul, 2014).

Minería en corredores de conectividad, áreas protegidas y Bosques Protectores

La actividad minera está afectando áreas importantes de conservación de la biodiversidad, como es el caso de las áreas protegidas del SNAP, Bosques y Vegetación Protectores y corredores de conectividad.

Corredores de Conectividad

Los corredores de conectividad, según el Código Orgánico del Ambiente (2017), forman parte de las “áreas especiales para la conservación de la biodiversidad” y tienen como finalidad reducir los efectos de la fragmentación del paisaje, los riesgos asociados al aislamiento de las poblaciones de vida silvestre y la provisión de servicios ambientales. Aunque primordialmente se establecen entre las áreas del SNAP, los corredores no son figuras legales y, por lo tanto, no establecen restricciones de uso del suelo y los recursos naturales.

De acuerdo con Freile et al. (2022), en el Ecuador se reconocen diez corredores de conectividad, uno de ellos compartido con el Perú (Corredor de Conectividad Abiseo-Cóndor-Kutukú) el cual ocupa una superficie de 8 445 350 ha (Figura 10.5). Dos de ellos han sido reconocidos de manera oficial mediante acuerdo ministerial del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE): Corredor de Conectividad Sangay-Podocarpus y Corredor de Conectividad Llanganates-Sangay.

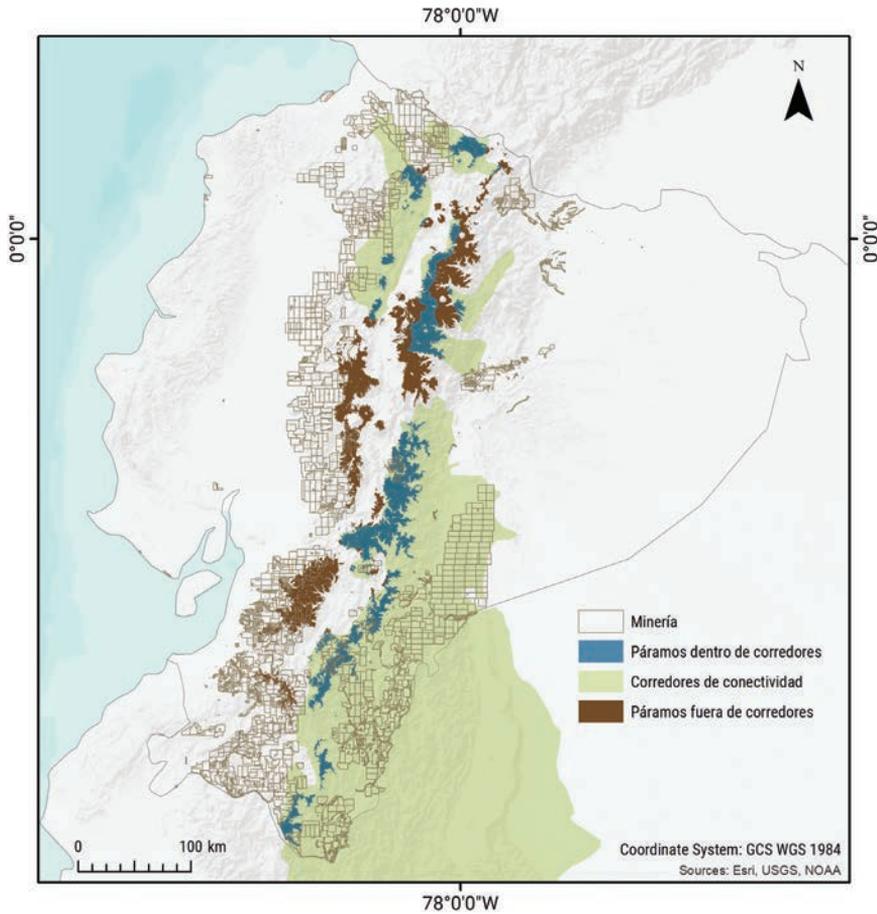


Figura 10.5 Concesiones mineras en páramos y corredores de conectividad. Existen 1154 320 ha en concesiones de minería metálica en los corredores de conectividad las cuales involucran parte de las 723 603 ha de páramo que tienen los corredores

Corredor de Conectividad Sangay Podocarpus y sus concesiones mineras

Mediante Acuerdo Ministerial MAAE-2021-021 publicado en el Suplemento 518-Registro Oficial, de 18 de agosto de 2021, se oficializa la creación del Corredor de Conectividad Sangay-Podocarpus como un área especial para la conservación de la biodiversidad y una estrategia complementaria al Sistema Nacional de Áreas Protegidas y el Patrimonio Forestal del país. El corredor tiene una superficie de 567 097 ha de bosques andinos, páramos¹⁰ y humedales y conecta el Parque Nacional Sangay con el Parque Nacional Podocarpus; además, incorpora áreas protegidas de los subsistemas estatal, municipal, comunitario,

¹⁰ El corredor de conectividad Sangay Podocarpus contiene 135 145 ha de páramo.

Áreas de Bosques y Vegetación Protectores y Áreas de Conservación y Uso Sustentable (ACUS). Dentro del corredor se encuentra la KBA Abra de Zamora,¹¹ localizada entre las provincias de Loja y Zamora Chinchipe, la cual con solo 10 534 ha alberga 30 especies de anfibios, 12 de ellas nuevas para la ciencia (Székely et al., 2020). Dentro del corredor existen 90 992 ha, o una sexta parte, en concesiones mineras (entre inscritas y en trámite) las cuales podrían afectar la conectividad. La KBA Abra de Zamora no tiene concesiones dentro de su territorio (Figura 10.6).

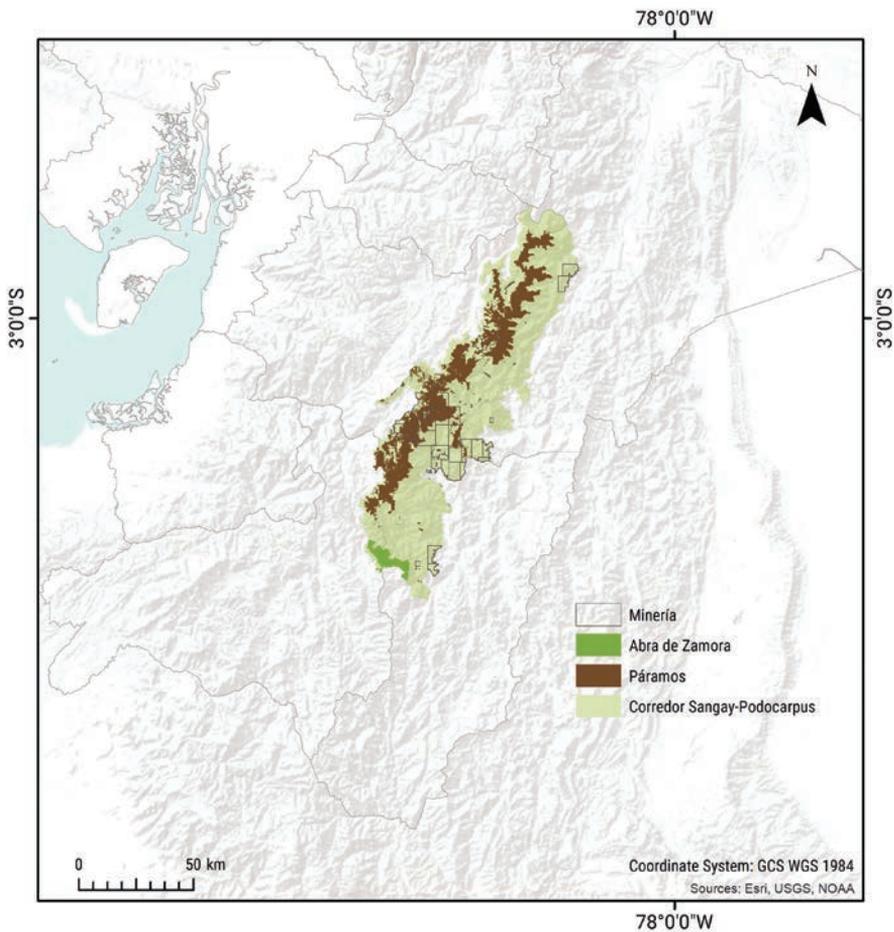


Figura 10.6 Corredor de conectividad Sangay-Podocarpus y sus concesiones mineras

¹¹ Originalmente se reportaron 27 especies de anfibios, 12 de ellas son consideradas nuevas para la ciencia; sin embargo, con base en recientes estudios este número se incrementó.

Áreas de Bosque y Vegetación Protectores

Si bien una parte de las áreas protegidas andino-amazónicas contienen concesiones mineras (18 068 ha), estas no se localizan en zonas de páramo. Diferente es el caso de los bosques y vegetación protectores (BVP), donde sí hay concesiones mineras en páramo. El reglamento al COA determina la implementación de actividades productivas sostenibles y de proyectos, obras o actividades públicas o privadas incluidos proyectos de 'sectores estratégicos' (como la actividad minera), dentro de los BVP, siempre que no comprometan las funciones ecológicas de los mismos. La extensión de BVP es de 2 239 360 ha, de la cual, un área de 473 170 ha está bajo concesiones de minería metálica, incluyendo páramo, especialmente en el noroccidente y suroriente del país (Figura 10.7).

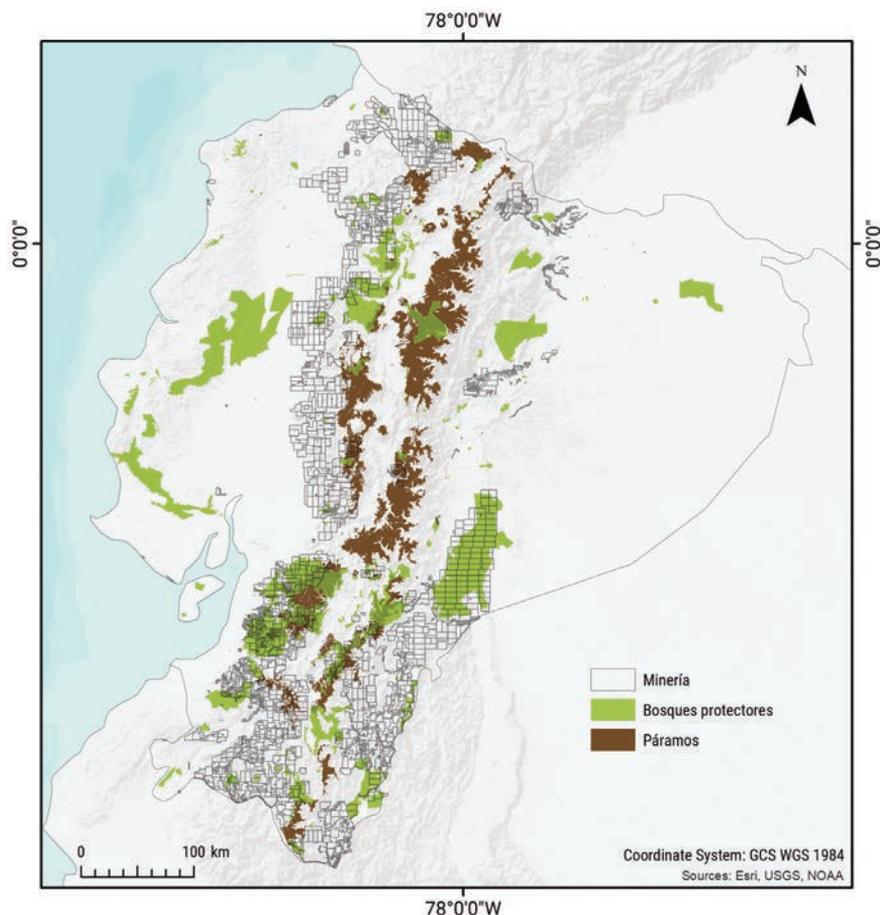


Figura 10.7 Concesiones para minería metálica dentro las Áreas de Bosques y Vegetación Protectores. Alrededor del 21% de la superficie de los Bosque y Vegetación Protectores está concesionada para minería metálica.

Conclusiones y perspectivas

El desarrollo de la gran minería ha sido definido de alta prioridad económica para el Ecuador puesto que el país contiene importantes yacimientos, especialmente de oro, plata y cobre. Datos oficiales dan cuenta de que el 2022 el sector minero se ubicó como el cuarto sector exportador, luego del petrolero, camarón y banana, y en lo que se refiere a las exportaciones no petroleras, ocupó el tercer lugar y el primero en exportaciones no tradicionales.

Es además una actividad que se encuentra en proceso de crecimiento. La proyección de expandir las concesiones mineras y permisos de minería artesanal hasta un 21,5 % del territorio nacional es un tema preocupante, puesto que las experiencias actuales muestran que las concesiones mineras se están entregando en ecosistemas frágiles (como los páramos) y áreas de importancia para la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. Esto conlleva a que se haya creado una intensa oposición pública a los proyectos de minería a gran escala, rechazo que no solamente genera conflictos sociales, sino que constituye un obstáculo para los mismos proyectos mineros. El detonante de esta resistencia se da, fundamentalmente, por la preocupación de las comunidades locales que temen por el impacto que pueda tener esta actividad en los recursos hídricos (como la reducción en cantidad y calidad de agua de buena calidad para otras actividades económicas o la preservación de la biodiversidad), considerando que muchas de las concesiones mineras se localizan en tierras altas, como bosques nublados, páramos y otros ecosistemas altoandinos que son importantes fuentes de agua.

Para la entrega de concesiones mineras, se debe tomar en cuenta las implicaciones sociales y ambientales. La explotación de un recurso estratégico, como los minerales, no debe poner en riesgo otro recurso estratégico como lo son la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

Preocupa, además, la capacidad nacional para evaluar y gestionar los impactos de la minería en los ecosistemas frágiles y los recursos hídricos. Esto incluye la falta de datos de referencia, indicadores y la falta de marcos para evaluar los riesgos.

Tampoco está bien definida la gestión de los pasivos ambientales mineros luego del cierre de las minas. La Ley de Minería y su reglamento solamente mencionan, de forma general, las actividades que deben cumplir los concesionarios para el cierre parcial o total de la mina y el pago de todos los pasivos. Los pasivos ambientales mineros pueden provocar impactos irreversibles sobre la biodiversidad, la degradación y pérdida de ecosistemas terrestres y acuáticos los cuales podrían causar la pérdida de los servicios ambientales que brindan estos

ecosistemas a las poblaciones aledañas a las operaciones mineras. Estamos en el momento oportuno para crear y desarrollar sistemas integrales para la gestión de los pasivos ambientales mineros los cuales deben incluir un marco regulatorio correctivo (la remediación ambiental es un proceso costoso que difícilmente la asumen los países mineros), pero, sobre todo preventivo, estrategias de financiamiento a largo plazo, espacios de participación ciudadana, fortalecimiento de capacidades de la autoridad ambiental, protocolos que consideren la sensibilidad de los ecosistemas frágiles, entre otros.

La historia de los impactos causados por una minería mal gestionada, combinada con la oposición general de la población a la minería a gran escala, ha creado una fuerte resistencia pública y política al desarrollo minero; de allí que deben considerarse y prevenirse, de manera seria y oportuna, los impactos sociales y ambientales, especialmente en ecosistemas frágiles como los páramos.



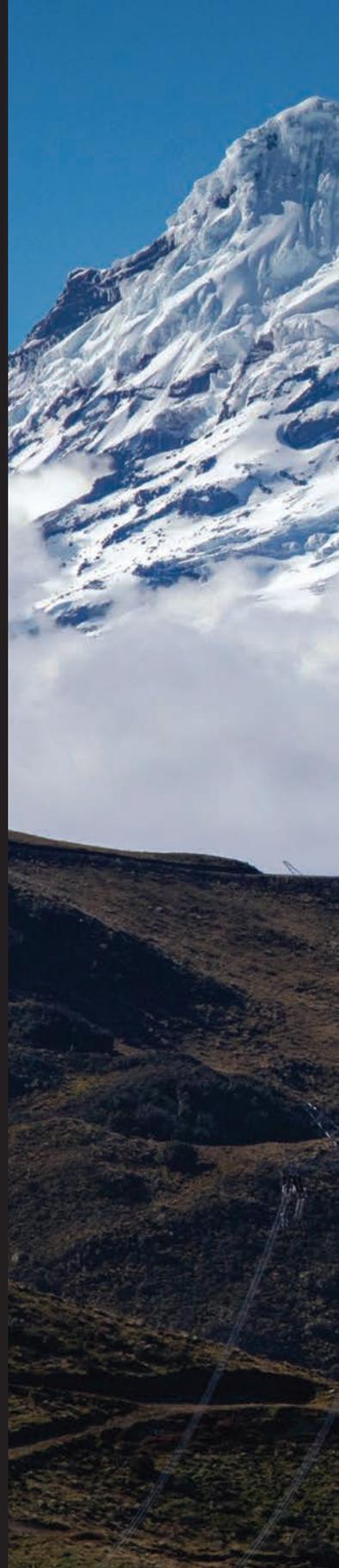
Fotografía: Patricio
Mena-Vásquez

CAPÍTULO 11

LA INFRAESTRUCTURA EN LOS PÁRAMOS ECUATORIANOS

Daniela Rosero-López

Torres de transmisión eléctrica en el páramo del Parque Nacional Cayambe Coca con el Antisana al fondo.
Fotografía: Esteban Suárez Robalino





Resumen

La infraestructura en el páramo es uno de los principales desarrollos humanos desde los primeros asentamientos en este ecosistema, como atestigua la ruta andina *Qhapaq Ñan* de 30 000 km. Los servicios del ecosistema han sido ampliamente utilizados en la actualidad a través de la construcción de infraestructura de agua para consumo humano, riego, ganadería e hidroelectricidad, e infraestructura de comunicación y turismo. Mediante la revisión sobre las obras de infraestructura presentes en el páramo de Ecuador, se observa que la infraestructura de mayor extensión y expansión corresponde a las obras de captación, regulación y transporte de agua, seguida de caminos y vías, torres de electricidad, casetas de control para turismo y piscinas para acuicultura.

Parte de los páramos en el Ecuador, al igual que en otros países andinos, se ubica en áreas protegidas del SNAP, lo que ha asegurado en cierta medida su protección. Sin embargo, la presencia de infraestructura, principalmente de agua para consumo humano y riego, contrasta con su objetivo de conservación. Una de las principales razones para la presencia de infraestructura en los páramos bajo protección estatal es la integridad ecológica de los ecosistemas acuáticos que constituyen las fuentes de agua de donde se abastecen la mayoría de las ciudades de la Sierra. Los ecosistemas acuáticos, como ríos y lagunas que se encuentran en los páramos, son los ecosistemas más alterados por la infraestructura.

Al igual que todas las actividades humanas que hay en el páramo, la construcción y operación de obras de infraestructura conlleva la alteración de los procesos naturales. Por ello, la construcción de nueva infraestructura en el páramo, así como el mantenimiento de la existente, merecen una especial atención para evaluar de manera continua los servicios ecosistémicos de los que nos beneficiamos los humanos frente a los impactos ambientales sobre el ecosistema. En los ecosistemas acuáticos, los procesos que se han visto alterados por desviación de caudales, cortes de flujo superficial y subterráneo, compactación del suelo, erosión con aporte de nutrientes y minerales, represamiento e introducción de especies exóticas para la acuicultura, son resultado de la proliferación de infraestructura construida sin criterio multidisciplinario.

Debido a la importancia de los servicios ecosistémicos que provee el páramo, es probable que la construcción de infraestructura continúe, por lo que los proyectos deben ir acompañados de investigación sobre los cambios irreversibles que pueden causar. El reto actual para la nueva infraestructura será considerar el páramo como un conjunto de funciones ecológicas interrelacionadas que pueden afectarse cuando una estructura artificial interrumpe uno o más procesos ecológicos. Así, el nuevo rol de la infraestructura de páramo es satisfacer las necesidades humanas sin dejar de lado el mantenimiento de las funciones ecológicas que se necesitan para proveer los servicios del ecosistema.

Summary

Infrastructure in the páramo is one of the main human developments since the first settlements in this ecosystem: the Andean route *Qhapaq Ñan* (30,000 km). Ecosystem services have been widely used today through the construction of water infrastructure for human consumption, irrigation, livestock, and hydro-electricity, and for communication and tourism. A review of the infrastructure works shows that the most extensive and expansive infrastructure corresponds to water collection, regulation, and transport works, followed by roads and tracks, electricity pylons, control huts for tourism, and pools for aquaculture.

Part of the páramos in Ecuador, as in other Andean countries, is in national protected areas, which has to some extent ensured their protection. However, the presence of infrastructure, mainly water for human consumption and irrigation, can compromise their conservation objectives. One of the main reasons for this infrastructure is that here the ecological integrity of the aquatic ecosystems is higher. Yet these constitute the water resources from which most of the cities in the Sierra are supplied. Aquatic ecosystems, such as rivers and lakes found in the páramos, are the ecosystems most altered by infrastructure.

As with all human activities in the páramo, the construction and operation of infrastructure works entails the alteration of natural processes. Therefore, the construction of new infrastructure in the páramo, as well as the maintenance of existing infrastructure, deserves special attention in order to continuously assess the ecosystem services from which humans benefit against the environmental impacts on the ecosystem. In aquatic ecosystems, the processes that have been altered by flow diversion, surface and subsurface flow cuts, soil compaction, erosion with nutrient and mineral inputs, damming and introduction of exotic species for aquaculture are the results of the proliferation of infrastructure built without multidisciplinary criteria.

Due to the importance of the ecosystem services provided by the páramo, infrastructure construction is likely to continue, and projects must be accompanied by research into the irreversible changes they may cause. The current challenge for new infrastructure will be to consider the páramo as a set of interrelated ecological functions that can be affected when an artificial structure disrupts one or more ecological processes. Thus, the new role of páramo infrastructure is to satisfy human needs without neglecting the maintenance of the ecological functions needed to provide ecosystem services.

Introducción

La infraestructura que encontramos hoy en el páramo se relaciona con los esfuerzos del ser humano por utilizar los recursos y los servicios ambientales que provee el ecosistema (Lane, 2009). La infraestructura, en general, aparece con los primeros asentamientos humanos y es una de las mayores expresiones del desarrollo y la expansión (Ochoa-Tocachi et al., 2019). Desde principios del siglo III hasta la actualidad, la infraestructura en lo que es hoy América Latina ha estado caracterizada por elementos que componen los sistemas de distribución de agua y del uso del suelo (Lane, 2009). Durante este tiempo, ciertos elementos antiguos han pasado a ser parte del paisaje de páramo, especialmente la infraestructura de comunicación, como son los caminos y las vías que unen al Ecuador con el resto de los países andinos. Igual de importantes fueron los elementos construidos para almacenar y transportar el agua para riego y abrevaderos, y aquellos elementos que formaban parte de los rituales de espiritualidad y recreación, como lo hacen hasta la actualidad en diferentes sitios del país (Meyers, 1998; Camúñez y Lomas, 2020). El desarrollo actual ha incorporado en el páramo infraestructura para la acuicultura, la hidroelectricidad, el turismo, e incluso la extracción de materiales para la construcción.

Conocer la infraestructura que existe en el páramo es de gran importancia para el manejo de este ecosistema, ya que el efecto que tienen las obras de infraestructura sobre las funciones de los flujos de agua superficial y subterránea, y sobre la cobertura vegetal y el uso del suelo, puede definir el estado de conservación y manejo de los páramos en el Ecuador. Este capítulo presenta todos los elementos de infraestructura que han sido creados o construidos en el páramo tanto para satisfacer una o varias necesidades colectivas dentro del ecosistema como fuera de este hacia poblados ubicados especialmente en los centros poblados del valle interandino.

La infraestructura en el páramo

Los elementos físicos construidos en el páramo a lo largo del tiempo se han creado con el objetivo de hacer uso de recursos como el suelo y el agua y otros servicios que provee el ecosistema. La infraestructura que se puede observar hoy en el páramo es el resultado de la construcción de sistemas de riego y distribución de agua que tuvieron lugar especialmente en el siglo XX (Ochoa-Tocachi et al., 2019). Entre los elementos menos conspicuos de la infraestructura se encuentran caminos, túneles de distribución y reservorios subterráneos que se construyeron durante la época preincaica e incaica (Lane, 2009; Ochoa-Tocachi

et al., 2019). Los diferentes elementos de la infraestructura que se encuentra en el páramo, al igual que en otros ecosistemas, forman parte de varios ejes de desarrollo del país: agua potable, riego, comunicación, hidroelectricidad, acuicultura y turismo (Figura 11.1).



Figura 11.1 Algunos elementos de infraestructura construida en los páramos del Ecuador: a) Captación de agua potable. b) Canal de riego. c) Hidroelectricidad. d) Comunicación. e) Medición meteorológica. Fotografías: Daniela Rosero-López (a-d) y Robert Hofstede (e)

La cantidad de obras de infraestructura en el páramo está condicionada por la naturaleza de la elevación del ecosistema que limita, de cierta manera, la extensión y el tipo de actividades que aquí se pueden ejecutar. En el Ecuador hay una importante proporción de los páramos que se encuentra bajo alguna forma de protección o manejo estatal dentro del Sistema Nacional de Áreas Protegidas; así, se puede encontrar infraestructura de agua potable, riego, comunicación y turismo en los Parques Nacionales Cotacachi-Cayapas, Cayambe Coca, Sumaco, Antisana, Cotopaxi y Cajas; las Reservas Ecológicas El Ángel, Ilinizas y Llanganates, y la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo (Figura 11.2).



Figura 11.2. Elementos de la infraestructura construida en los páramos de áreas protegidas del Ecuador y sus zonas de influencia, a) Parque Nacional Llanganates: embalse para hidroelectricidad Pisayambo. b) Zona de influencia Parque Nacional Antisana: regulación para agua potable. c) Parque Nacional Antisana: reservorio para agua potable en La Mica. Fotografías: Celec (a), Daniela Rosero-López (a) y Patricio Mena-Vásconez (c)

Infraestructura preincaica e incaica

La infraestructura forma parte fundamental de la evidencia y el legado histórico que han dejado las diferentes culturas a nivel mundial (Lane, 2009; Ochoa-Tocachi et al., 2019). Como en varias civilizaciones de la antigua Mesopotamia, los principales asentamientos en América se ubicaron alrededor de ríos y lagunas, aprovechando la geografía o la fisiografía del terreno (Beckers et al., 2008; DiNapoli et al., 2019). Las culturas que habitaron en los páramos, a diferencia de la mayoría de las culturas asentadas en las costas y el valle interandino, diseñaron infraestructura con ingeniería específica para hacer frente a las condiciones climáticas que tienen lugar en un ecosistema de altura (Ochoa-Tocachi et al., 2019).

Entre los siglos III y XIII, las culturas preincaicas en el Ecuador, como los Quitus y los Puruhás, construyeron importantes canales para transportar y distribuir agua, centros espirituales con pozas y reservorios, y estructuras para el cultivo en zonas de altura (Meyers 1998; Nair y Protzen 2021; Navarrete et al., 2022). Los principales canales superficiales y subterráneos utilizaban la diferencia en elevación para transportar el agua desde las nacientes hasta los diferentes asentamientos. La mayoría de la infraestructura que se construyó en la antigüedad utilizaba materiales locales como el limo, la arcilla, la grava y la paja, lo que favoreció la resistencia de los canales y los caminos, algunos de los cuales se pueden encontrar todavía en uso y como parte de la infraestructura moderna (Figura 11.3). Entre la infraestructura incaica más relevante se encuentra el complejo de caminos que conforman el *Qhapaq Ñan* o Sistema Vial Andino, que fue reconocido por la UNESCO en 2014 como Patrimonio Mundial de la Humanidad e incluye a seis países con una distancia total de 30 000 km (Camúñez y Lomas, 2020).



Figura 11.3 Infraestructura ancestral: Pucará de Quitoloma (Pichincha). Fotografías: Patricio Mena-Vásconez

Infraestructura moderna

La infraestructura moderna que se puede encontrar hoy en los páramos puede ser pública o privada y ha sido construida para satisfacer las necesidades de personas y poblaciones ubicadas dentro y fuera del ecosistema. Las obras de infraestructura moderna se pueden clasificar en infraestructura de consumo o de uso de los recursos o los servicios del ecosistema de páramo. En sectores como el de la dotación de agua potable, la infraestructura está cubierta por proyectos de gran envergadura de tipo público que pueden llegar a cubrir hasta el 70 % de la demanda de las ciudades capitales (Buytaert et al., 2006; Jacobsen y Dangles, 2017). Asimismo, la infraestructura moderna ha permitido el desarrollo de territorios productivos gracias a la presencia de sistemas de riego comunales, hidroelectricidad privada y agua para abrevaderos, a pesar de que dichos sistemas ejercen impacto ambiental sobre los procesos naturales del páramo (González-Zeas et al., 2022; Rosero-López et al., 2020). Algunos proyectos de infraestructura en el Ecuador transportan recursos como el agua desde una provincia a otra y entre las vertientes del Pacífico y la Amazónica. Igualmente, la infraestructura de comunicación conecta distintos territorios a lo largo de los Andes entre el Ecuador y los países vecinos.

Infraestructura pública

La infraestructura pública corresponde a todas las obras de proyectos que han sido construidos con fondos públicos para dar un servicio a la gente que vive en el ecosistema de páramo y sus alrededores. En el páramo se puede encontrar infraestructura pública para agua potable, riego, abrevaderos, recreación, comunicación, turismo e hidroelectricidad. Sin embargo, por las necesidades hidráulicas de las obras de generación eléctrica, en el páramo no existen proyectos públicos de gran envergadura como en otros pisos altitudinales con niveles de elevación útiles para la generación de energía (Jacobsen y Dangles, 2017; Ponce-Jara et al., 2018) (Figura 11.4).

La infraestructura pública tiene una gran cobertura en extensión y servicio en sectores como riego y agua potable, los que hacen uso del agua y otros servicios del ecosistema de páramo como el turismo. A pesar de esto, por extensión, la infraestructura pública de mayor presencia y alcance son los caminos, vías y otros medios de comunicación. Los elementos de la comunicación forman parte tanto de la infraestructura moderna como de la infraestructura incaica.



Figura 11.4 Proyectos de hidroelectricidad que utilizan agua que se genera en los páramos: reservorio de Turi en la central hidroeléctrica Saucay-Saymirín (Azuay). Fotografía: Celec, Ecuador

Infraestructura privada y comunitaria

La infraestructura privada y comunitaria es aquella que se ha construido en territorios particulares que, a diferencia de la infraestructura pública, cubre a un número menor de personas y, por ende, interviene una superficie limitada (Ponce-Jara et al., 2018). Entre las principales obras de infraestructura privada y comunitaria se encuentran los sistemas de riego, los caminos vecinales y los reservorios para acuicultura que se construyen dentro de propiedades privadas y que se limitan a los territorios que proveen dicho servicio (Jacobsen y Dangles, 2017; Ruiz, 2017). En territorios comunitarios ubicados en el páramo también existen captaciones de agua para consumo humano y abrevadero que abastecen las necesidades de los propietarios. Además de las acequias construidas a partir de turberas y ríos en el páramo, en las últimas décadas se han desarrollado proyectos de turismo comunitario para ofrecer servicios de recreación que incluyen piscinas de aguas termales, caminos y senderos, viviendas y hosterías, además de recuperación de hitos arqueológicos (Ruiz, 2017). Tanto la infraestructura pública como privada y comunitaria en el páramo se han diseñado y construido para aprovechar los servicios del ecosistema (Ponce-Jara et al., 2018). A continuación, se describe la infraestructura existente en los páramos del Ecuador de acuerdo con los diferentes sectores que hacen uso de los recursos agua y suelo.

Infraestructura de aprovechamiento y uso de agua

La infraestructura de aprovechamiento de agua constituye una de las más abundantes en los páramos del Ecuador. El aprovechamiento de agua, de acuerdo con la normativa vigente la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua de 2014 (LORHUyA, 2014), puede clasificarse en consumo y uso, en donde el consumo representa un cambio de las características físicas y químicas del agua, mientras que el uso significa que no hay una alteración de dichas condiciones. En el Ecuador, los derechos de uso y aprovechamiento de agua se conceden administrativamente en concesiones o permisos en los que se designa el volumen o caudal de agua que se atribuye a un usuario (véase el Capítulo 7). El aprovechamiento de agua ha sido un eje clave para el desarrollo de la infraestructura en el páramo, lo que ha implicado una extensa intervención de los ecosistemas acuáticos a lo largo del tiempo (González-Zeas et al., 2022). Varios ecosistemas como quebradas, ríos, lagunas y humedales han sido modificados para ajustarse a los diseños de captación, distribución y consumo de agua de páramo (Jacobsen y Dangles 2017; González-Zeas et al., 2019). Para el aprovechamiento del agua es necesario instalar estructuras que acumulan y regulan el flujo natural de desfogue que tendrían los ríos o quebradas (González-Zeas et al., 2022). Los principales elementos de los sistemas de aprovechamiento de agua en el páramo incluyen captaciones, embalses, reservorios y conducciones para todo lo que corresponde al 'agua cruda' (Jacobsen y Dangles, 2017; González-Zeas et al., 2022). El agua cruda que proviene de los páramos se transporta por medio de gravedad a las diferentes plantas potabilizadoras que se encuentran a niveles de elevación inferiores al páramo, como ocurre con varias ciudades del Ecuador, entre las que están Tulcán, Ibarra, Otavalo, Cayambe, Quito, Machachi, Latacunga, Ambato, Riobamba, Azogues y Cuenca entre otras (Buytaert et al., 2006; Bradley et al., 2006).

Los páramos que abastecen a los sistemas de distribución de agua han tenido por años un manejo enfocado únicamente en el recurso hídrico lejos de considerar al ecosistema y los servicios que provee (Jacobsen y Dangles, 2017). Por ejemplo, en el páramo de Papallacta, que se encuentra dentro del Parque Nacional Cayambe Coca, se ubica el sistema de agua potable de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento que abastece a la ciudad de Quito y las parroquias nororientales (González-Zeas et al., 2019). Este sistema, construido en dos etapas desde 1987 hasta 2000, alberga varios elementos de infraestructura que han intervenido el flujo natural superficial y subterráneo del ecosistema (Rosero-López et al., 2019). La eficiencia de este y otros sistemas

de agua potable en el páramo se ha basado en la desviación de afloramientos de agua, drenajes artificiales en turberas y canalización de varias quebradas con el fin de captar la mayoría de los recursos hídricos del páramo.

En el Parque Nacional Cajas se encuentra el sistema de agua que abastece a la ciudad de Cuenca y las parroquias del suroccidente desde 1995 a través de la *Empresa Pública de Teléfonos, Agua Potable y Alcantarillado* (ETAPA) (Malo-Larrea et al., 2022); el sistema cuenta con captaciones de ríos y reservorios de regulación para llevar el agua hasta la planta de potabilización. Las ciudades de Tulcán, Ibarra y Cayambe tienen en común que sus sistemas de aprovechamiento de agua contemplan principalmente complejos de lagunas ubicadas en el páramo (Bradley et al., 2006). En los sistemas de agua potable, las lagunas y lagos son fundamentales para el almacenamiento del recurso, por lo que los sistemas naturales se convierten en sistemas artificiales denominados embalses y reservorios que se operan para regulación y dotación permanente. Igualmente, en los sistemas de riego de páramo, además de las lagunas y lagos también se controlan las turberas a través de diques que represan el flujo superficial y subterráneo para la distribución del agua (Figura 11.5) (Hess, 1990). Varios ejemplos se pueden encontrar en los páramos de Tungurahua y Bolívar, en donde se desarrollan sistemas de riego acompañados de conducciones y canales que llevan el agua desde el páramo hacia las extensas planicies de las zonas de cultivo.

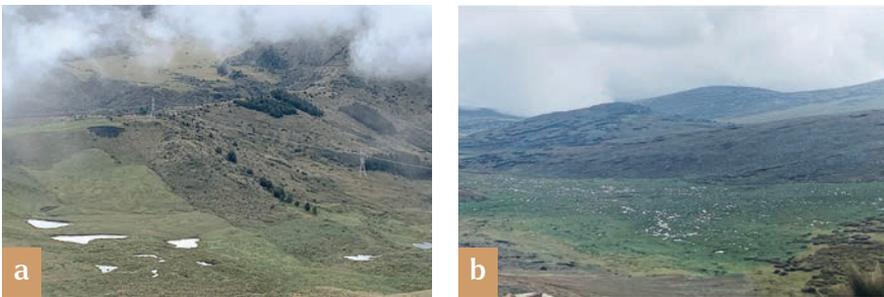


Figura 11.5 Turberas en los páramos de Salasaca. A) Tungurahua. B) Salinas en Bolívar, que se encuentran en los planes de represamiento provincial para riego. Fotografías: Daniela Rosero-López

La superficie de riego que es abastecida por el páramo alcanza las 613 000 ha y representa cerca del 27 % de la superficie regada (MAATE, 2020). Los sistemas de riego y drenaje que utilizan el agua y los servicios ecosistémicos del páramo ejercen un importante impacto sobre el suelo y los mecanismos de infiltración natural, especialmente cuando las acequias y canales se recubren con hormigón

para reducir la infiltración, como ocurre en la subcuenca del río El Ángel (Jaramillo et al., 2020) que está en el páramo. Al igual que los sistemas de agua potable, la infraestructura de riego requiere de reservorios que cambian el tiempo de retención del agua, lo que altera el aporte natural a la infiltración y evaporación dentro del ciclo hidrológico y los ciclos biogeoquímicos de nutrientes y minerales (Hess, 1990). Los reservorios, por su naturaleza de almacenamiento, ofrecen nuevos hábitats para organismos diferentes quebradas (por ejemplo, macrófitas, algas filamentosas y patos) a los que normalmente se encuentran en los ríos y quebradas. En la infraestructura del páramo también existen canales y reservorios que se utilizan para abrevadero de animales y la acuicultura. Los abrevaderos en el páramo no son tan comunes como en las zonas bajas, gracias a la presencia de afloramientos u ojos de agua y drenajes de turberas que permiten que los animales beban sin necesidad de acercarse a una estructura específica (Suárez et al., 2022a). Sin embargo, la mayoría de las acequias para riego reemplazan esta función y ofrecen agua de abrevadero en zonas donde hay presencia de ganado. Por otro lado, las piscinas para acuicultura (Figura 11.6), a pesar de que no se ubican precisamente en el páramo, utilizan el agua de ríos y quebradas, para lo que desvían el caudal de forma parcial o total, como se observa en las cercanías de la Planta de Tratamiento de Agua de Paluguillo en Pichincha (Vimos et al., 2015). La infraestructura para acuicultura se enfoca principalmente en la cría de truchas (*Oncorhynchus mykiss*). Las truchas, al ser especies introducidas de zonas templadas, requieren aguas de baja temperatura y altamente oxigenadas, por lo que su presencia en los ecosistemas acuáticos del páramo está ampliamente extendida y promocionada (como se ve, por ejemplo, en las lagunas de Ozogoché y Atillo en Chimborazo y en el Parque Nacional Cajas). El impacto ecológico de la trucha ha sido estudiado en ríos de páramo encontrando que alteran los procesos tróficos en el ecosistema (Vimos et al., 2015). La presencia de truchas en el páramo se extiende más allá de las piscinas de criadero ya que se han 'sembrado' en todos los embalses de los sistemas de agua potable (como en la laguna la Mica, en el embalse Mogotes y en la represa Salve Faccha).

Los ríos y lagunas en el páramo también han sido objeto de modificación con infraestructura para hidroelectricidad. La hidroelectricidad, a diferencia del consumo de agua, tiene la consigna de no alterar las características físicas y químicas del agua, por lo que se considera un uso del agua, a pesar de que la cantidad de agua se transfiere de un sitio a otro para lograr la generación. En el páramo existen micro y minigeneradoras de electricidad que utilizan pequeños desniveles de elevación para mover turbinas en un esquema 'de pasada'. Algunas microgeneradoras se han construido con el fin de complementar el bombeo en los sistemas de agua potable, como el caso de los proyectos Papallacta y la

Mica-Quito Sur. Por otro lado, las minicentrales de Sauca y Saymirín en el páramo de la cuenca del río Machángara en Paute, Azuay, forman parte de complejo de generación que utiliza infraestructura de pasada y un pequeño reservorio de regulación (<https://www.elecaastro.gob.ec>). Los sistemas de hidroelectricidad que funcionan con esquemas de pasada no desvían la totalidad del caudal de los ríos por lo que su impacto es menor en comparación a los esquemas que usan embalses (McManamay et al., 2016; Poff y Schmidt, 2016).



Figura 11.6 Una piscina de acuicultura para la cría comercial de truchas en la vía Pifo-Papallacta. Fotografía: Patricio Mena-Vásconez

A continuación, se describen los elementos de la infraestructura que forman parte de los sistemas de aprovechamiento y uso del agua que se pueden encontrar en los páramos del Ecuador.

Reservorios y embalses

Los reservorios de agua constituyen infraestructura de almacenamiento que se han construido sobre una laguna, lago o humedal para regular la cantidad de agua que ingresa a un sistema de aprovechamiento (McManamay et al., 2016). Los reservorios tienen tiempos de residencia del agua mucho más largos que otras estructuras de almacenaje como las captaciones de agua y debido a que interrumpen el flujo natural de desfogue, pueden experimentar eutrofización (el incremento de nutrientes que favorece el crecimiento de algas) y disminución del nivel del fondo o efectividad de represamiento (Figura 11.7). En el caso de la laguna La Mica, Parque Nacional Antisana, que pertenece al sistema de agua Mica-Quito Sur, se observa que el represamiento de esta laguna natural ha producido un aumento de la altura del fondo debido a la descomposición de la vegetación

(Andrade et al., 2019). En los reservorios en donde la descomposición de vegetación se acumula en el fondo se reduce la efectividad del volumen de almacenamiento y las compuertas de desfogue de fondo tienden a taponarse (como se ve en las lagunas de Mogotes y La Mica).



Figura 11.7 Reservorio de agua construido sobre lagunas naturales y diseñado para la regulación y almacenamiento de agua potable en el Sistema Papallacta (laguna de Mogotes). Fotografía: Daniela Rosero-López

Los embalses, al igual que los reservorios, son infraestructura de almacenamiento de agua que se diferencian porque se construyen en depresiones orográficas para acumular el agua mediante el represamiento de ríos de influjo (Schultz y Adams, 2022). Los embalses pueden llamarse represas para efectos de manejo del agua. En el páramo, los embalses tienen en común el hecho de que la altura de la pared de la presa está limitada por la extensión de la planicie en donde se construye el embalse, es decir, los embalses no pueden ser de gran altura si es que estos no se construyen en una depresión natural (Schultz y Adams, 2022). Al igual que en los reservorios, los embalses también presentan problemas de acumulación de sedimentos y nutrientes e incluso afloramiento de estos por efecto de la erosión natural del suelo, los cambios de temperatura y el viento (Maavara et al., 2020). Algunos embalses de altura han reportado la presencia de afloramientos algales inocuos e incluso tóxicos como ocurre con más frecuencia en países de climas templados (Merino-Ibarra et al., 2008). Los embalses de Salve Faccha en Napo y Mula Corral en Tungurahua son ejemplos de este tipo de obras que se ven limitadas en su volumen por la depresión orográfica natural que tiene lugar a los 3 800 m de elevación en áreas en donde no existía una laguna o lago (Figura 11.8).



Figura 11.8 Embalse de agua construido en depresiones orográficas naturales en donde previamente no existían laguna y que actualmente presenta una represa de limitada altura (Represa Salve Faccha; PN Cayambe Coca). Fotografía: EPMAPS, Ecuador

Estructuras de captación y regulación

Las captaciones de agua son aquellas obras hidráulicas que desvían el agua de un cauce hacia un sistema de agua, riego, abrevadero o de acuicultura (Bazarov et al., 2020). Las captaciones de agua en el páramo son muy comunes y pueden variar en tamaño desde muy pequeñas hasta las más conspicuas (Figura 11.9). Las captaciones de agua se construyen sobre los cauces o en el lecho de inundación de los ríos, por lo que esta infraestructura altera directamente la morfología de los ríos y el régimen de inundaciones. El impacto que ha tenido la operación de las captaciones de agua en los ríos y quebradas de páramo se ha descrito para varios organismos indicadores de la calidad del agua (Rosero-López et al., 2020). Las captaciones de agua tienen en muchos casos compuertas de regulación y azudes de rebose para el desborde de los caudales que sobrepasan los límites de diseño. En el páramo de Papallacta, la captación de Chalpi Norte ha sido objeto de estudios experimentales y temporales para evaluar el impacto que tiene la reducción del agua de los ríos (Figura 11.9) (Rosero-López et al., 2022). Asimismo, en la ciudad de Cuenca las captaciones de agua son manejadas para que los cauces no se sequen de forma completa por la extracción de gran parte del caudal del río (Holguín-González et al., 2013; Flachier Troya, 2016).



Figura 11.9 Río Chalpi Norte, Napo: a) Captación de agua en río construida en los páramos de Papallacta. b y c) Desviación experimental para la manipulación de caudales mediante vertederos complementarios para el análisis de la respuesta del sistema entero a los diferentes caudales ecológicos. Fotografías: Robert Hofstede (a) y Daniela Rosero-López (b y c)

En las captaciones de agua de los ríos del páramo de Papallacta se han realizado investigaciones para implementar caudales ecológicos para mantener parte del caudal en los ríos, a pesar de que la normativa vigente no lo exige para sistemas de agua para consumo humano (MAE, 2006; Flachier Troya, 2016; Rosero-López et al., 2019).

Las estructuras de regulación forman parte de muchas captaciones debido a que pueden ser operadas de forma mecánica desde compuertas de agua y riego hasta óvalos que requieren una operación manual. La regulación se ha convertido en una estructura fundamental en las captaciones ya que juegan el rol de medición de los niveles de ingreso de los ríos. Por lo general, los sistemas de regulación son responsables de la acumulación de sedimentos en el fondo de las estructuras que pueden incluir una serie de compuertas.

Trasvases y conducciones

Los trasvases, al igual que las conducciones, se refieren a infraestructura de tuberías de acero y cemento que se han construido para transportar el agua desde un sitio a otro y entre grandes distancias (McManamay et al., 2016). Los principales trasvases en el Ecuador ocurren entre la vertiente del Pacífico y la cuenca amazónica en sistemas de agua potable. Igualmente, los trasvases más largos forman parte de sistemas de riego que llevan el agua desde el páramo hasta zonas de valle seco en distintas provincias. Los trasvases cruzan montañas con el objetivo de mantener el nivel de elevación que hace factible la cota de diseño de los sistemas de agua potable y riego. En el páramo, a algunos tramos de los trasvases se accede mediante túneles que también constituyen una importante obra de infraestructura para la comunicación.

Canales y acequias

Los canales y las acequias son infraestructura que se usa en su mayoría en los sistemas de riego de páramo para transportar agua a cielo abierto (Ochoa-Tocachi et al., 2019; Jaramillo et al., 2020). Los canales en la infraestructura moderna han pasado a impermeabilizarse para reducir las pérdidas de infiltración que ocurría en muchas acequias utilizadas desde la época incaica. En el páramo, los canales se han construido para llevar el agua para riego desde este ecosistema hacia zonas bajas con menor humedad en el suelo y en el aire. Las acequias constituyen las principales obras de infraestructura privada en los sistemas de riego y que se manejan a nivel comunitario y bajo el sistema de Juntas de Agua. En el páramo de la Reserva Ecológica El Ángel existe uno de los sistemas de riego de mayor importancia para la producción agrícola de papas (Jaramillo et al., 2020). Los canales y acequias del Carchi se alimentan en su totalidad del agua que proviene de la laguna que se maneja como un embalse; los canales han pasado a formar parte de la infraestructura del sistema de riego que, a pesar de no encontrarse en el páramo, depende exclusivamente de la laguna de altura, la zona de recarga de la cuenca y la infiltración natural que ocurre en el páramo y que aún alimenta las acequias de la zona baja (Jaramillo et al., 2020).

Infraestructura de comunicación y producción

La infraestructura de comunicación en el páramo es producto del desarrollo de los diferentes asentamientos humanos a lo largo del tiempo (Lane, 2009; Nair y Protzen, 2021). Las necesidades de comunicación han impulsado la creación de

caminos entre propietarios y comunidades, así como entre usuarios y el Estado. En el páramo los caminos pueden ser de 1.^{er}, 2.^{do} y 3.^{er} orden y mantener obras de infraestructura asociadas como cunetas y desfogues de agua que dependen de la dimensión de cada vía y camino. Las carreteras de 1.^{er} orden que atraviesan los páramos de Papallacta, Bolívar, Tungurahua y El Cajas cuentan con obras de desfogue de aguas lluvias que afectan la vegetación, la compactación del suelo y las tasas de infiltración natural del terreno. Por otro lado, los caminos de 2.^{do} y 3.^{er} orden que cruzan los páramos de las áreas protegidas como Cayambe Coca, El Ángel y Cotopaxi suelen no estar impermeabilizados con hormigón o pavimento por lo que permiten cierta infiltración y escurrimiento hacia las obras de geotecnia asociadas a las márgenes. Sin embargo, los caminos que comunican varias comunidades reciben mantenimiento con material pétreo que, por el uso y el efecto de la lluvia, se desagregan y aportan sedimentos hacia los cuerpos de agua y a la vegetación de páramo (Nair y Protzen, 2021). Dentro de la infraestructura de comunicación también se incluye a todos los derechos de vía (DDV) de la infraestructura productiva como son los oleoductos, los poliductos, los gasoductos y las líneas de transmisión eléctrica que atraviesan los páramos (Figura 11.10).



Figura 11.10 Torres y líneas de alta tensión del Sistema Nacional Interconectado que pasan por el páramo de a) Cayambe Coca, con derecho de vía del Oleoducto de Crudos Pesados (OCP) que cruza el páramo de Papallacta. Fotografía: Patricio Mena-Vásconez

En los derechos de vía que se han construido en el páramo se encuentra la infraestructura que sostiene a los oleoductos y los poliductos, por lo que en estas áreas la vegetación se encuentra controlada y en muchos casos ha sido removida. En el caso de las líneas de transmisión del sistema nacional interconectado, la infraestructura que se ha construido en los páramos constituye

torres y casetas de trabajo que han alterado la compactación del suelo y los procesos de infiltración del agua en el suelo. En el Ecuador, la mayoría de la infraestructura de comunicación y producción (como el sistema nacional interconectado [SIN], el sistema de oleoducto transecuatoriano [SOTE] y el oleoducto de crudos pesados [OCP]) se origina y llega a otros ecosistemas en diferentes ciudades, pero a su paso atraviesa varios páramos.

Infraestructura para el turismo y la recreación



Figura 11.11 Infraestructura de turismo: a) estacionamiento y vía de acceso en el Parque Nacional Cayambe Coca, vía Pifo-Papallacta. b) hostel privado en el Parque Nacional Cotopaxi. Fotografías: Patricio Mena-Vásconez (a) y Robert Hofstede (b)

El turismo y la recreación han sido un motor importante del desarrollo de infraestructura moderna que ofrece el páramo en conjunto con los servicios de los ecosistemas que se encuentran en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP). La infraestructura de turismo está compuesta por hosterías y viviendas de hospedaje que requieren dotación de agua y saneamiento para manejar los

efluentes antes de que se descarguen en el páramo. La infraestructura de turismo y recreación en el páramo incluye, además, sitios arqueológicos, ancestrales y de prácticas espirituales que, a más de utilizar los caminos de acceso, también se benefician de la infraestructura de generación de electricidad y dotación de agua (Navarrete et al., 2022). La infraestructura de turismo, a diferencia de los impactos que ocasionan las grandes obras de captación y acumulación, fomentan el conocimiento y la visita de turistas al páramo; sin embargo, su gestión todavía necesita seguimiento para reducir elementos de la contaminación de sólidos, el manejo de aguas residuales, y la capacidad de carga (Figura 11.11). En el caso del Qhapaq Ñan o el Sistema Vial Andino, se tiene un eje de crecimiento de turismo que depende del mantenimiento de la infraestructura vial y los servicios de recreación que se puede encontrar en los diferentes *tambos* (paraderos) que se ubican en los páramos del Ecuador. La infraestructura de turismo y recreación en los páramos está en su mayoría asociada al Sistema Nacional de Áreas Protegidas y algunas áreas de protección privada (Camúñez y Lomas, 2020).

Desafíos y oportunidades relacionados con la infraestructura en el páramo

Por la naturaleza de la implantación de la infraestructura en el páramo, es innegable que se produce un impacto sobre todo el ecosistema (Jacobsen y Dangles, 2017; Rosero-López et al., 2019, 2022). La infraestructura que existe actualmente ha sido concebida para usar los recursos sin incorporar medidas de mitigación que permitan recuperar o conservar los procesos ecológicos del ecosistema. La infraestructura en el páramo presenta grandes desafíos frente a la creciente presión por el desarrollo y las amenazas del cambio climático (Capítulo 12). La incorporación de medidas puntuales para el manejo de los ecosistemas acuáticos y la vegetación, e incluso la extracción de material, es todavía un reto para mantener las obras actuales y diseñar nueva infraestructura de agua y suelo con un enfoque ecosistémico (Ochoa-Tocachi et al., 2019; González-Zeas et al., 2022; Navarrete et al., 2022). La optimización de la infraestructura actual en el páramo es parte de los desafíos que enfrenta los ecosistemas acuáticos de donde se obtienen recursos como el agua para consumo humano y riego (González-Zeas et al., 2019). Los sistemas de agua potable y riego que operan actualmente con el agua de páramo tienen la oportunidad de incorporar ciertos cambios en la operación a través del cumplimiento de la normativa y la Constitución, por ejemplo, con el fortalecimiento de la implementación de los caudales ecológicos (Rosero-López et al., 2020). Los caudales ecológicos representan una herramienta de manejo de las captaciones

de agua para minimizar su impacto sobre el ecosistema, especialmente para enfrentar las amenazas de la demanda de recursos y los efectos del cambio climático (SGCA et al., 2011). Los caudales ecológicos han sido conceptualizados y diseñados pensando en su implementación únicamente para obras de hidroelectricidad; sin embargo, hay esfuerzos de investigación para identificar umbrales y regímenes de operación de caudales ecológicos en el páramo (Flachier Troya, 2016; Rosero-López et al., 2022). El diseño de nueva infraestructura de uso y aprovechamiento de agua en el páramo exige una optimización previa para reconocer su verdadera necesidad y aparte evaluar las tecnologías disponibles para alternar el uso de la infraestructura existente para maximizar los beneficios de dotación, haciendo un claro análisis de la meteorología local (González-Zeas et al., 2022).

La infraestructura de comunicación y producción enfrenta el desafío de contener el impacto que causa el mantenimiento de los caminos y derechos de vía. El principal reto para los caminos de 2.^{do} y 3.^{er} orden es la movilización de material pétreo desde las cercanías donde se pueden abrir minas para su extracción (Ponce-Jara et al., 2018). Al mismo tiempo, la oportunidad para la infraestructura vial es potenciar el turismo y la recreación en el ecosistema de páramo como parte de una vinculación coordinada con el SNAP. Fomentar el turismo también representa un desafío para la creación de nueva infraestructura ya que es necesario que se incorporen elementos amigables con el ambiente, pero, más que todo, se manejen los desechos sólidos y líquidos que se generan de la operación turística. Varios complejos turísticos ubicados en el páramo se encuentran bajo ciertos criterios ambientales de manejo; sin embargo, la infraestructura existente se encuentra en las cercanías de ecosistemas acuáticos, lo que hace mucho más críticas las consideraciones en su diseño y operación.

La construcción de nueva infraestructura, así como el mantenimiento de la infraestructura existente, merecen una especial atención para evaluar, de manera continua, los beneficios que se proveen frente a los impactos que se ocasionan. En el páramo, los procesos ecológicos que se han visto alterados por la desviación de caudales, los cortes de flujo superficial y subterráneo, la compactación del suelo, la erosión con aporte de nutrientes y minerales, el represamiento de agua y la introducción de especies exóticas para acuicultura son el resultado de la implementación de infraestructura que en su momento no fue analizada con criterio multidisciplinario. El reto actual para la nueva infraestructura será considerar el páramo como un conjunto de funciones ecológicas interrelacionadas que pueden afectarse cuando una estructura artificial interrumpe uno o más procesos ecológicos. El nuevo rol de la infraestructura de páramo es satisfacer las necesidades humanas sin dejar de lado el mantenimiento de las funciones ecológicas que se necesitan para proveer los servicios del ecosistema.



CAPÍTULO 12

EL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL PÁRAMO DEL ECUADOR

Robert Hofstede | Luis Daniel Llambí | Manuel Peralvo |
Karla Beltrán | Marlon Calispa | Giovanni Mosquera

Superpáramo en el Chimborazo
Fotografía: cortesía de Pablo Corral Vega ◉



Resumen

Los biomas de alta montaña, como el páramo, están particularmente expuestos y son muy vulnerables a los efectos del cambio climático global. Las temperaturas más altas y variables, así como las alteraciones en los patrones de precipitación, afectan a la biota nativa de los páramos; muchas especies suelen tener nichos climáticos estrechos y son, por lo tanto, muy vulnerables al calentamiento y la pérdida de hábitat. Esto genera, a su vez, cambios que apenas comenzamos a dilucidar en la composición y el funcionamiento de los ecosistemas y afecta procesos como la productividad, la evapotranspiración, la descomposición y las tasas de mineralización. Todos estos cambios afectan a su vez a la hidrología, el almacenamiento de carbono, la estabilidad del suelo y la biodiversidad de los ecosistemas y los paisajes altoandinos. De manera similar, los regímenes de temperatura cambiantes afectan la distribución, la salud y la productividad de los cultivos y el ganado, y promueven nuevas plagas y la expansión de los nichos de especies invasoras.

Los efectos del cambio climático global exacerbaban el impacto directo de las prácticas inadecuadas de uso de la tierra y de planificación económica. En regiones con altas tasas de transformación de los ecosistemas, agotamiento de la capacidad productiva de los suelos y escasez de agua, estos efectos pueden ser aún mayores bajo escenarios del cambio climático. Además, los efectos del cambio climático agregan una dimensión adicional a las crisis sociales y económicas relacionadas con el medio ambiente. Lo que es válido para el ecosistema, también lo es para las comunidades: la sociedad de la alta montaña es más vulnerable ante los efectos del cambio climático que la población en general. Esto ha resultado en cambios de medios de vida, abandono de la agricultura y migración temporal o permanente hacia las ciudades o el exterior.

Uno de los mayores desafíos es conocer los escenarios de cambio climático en el futuro. Estos diferentes modelos tienen efectos variables en el clima del páramo por la complejidad geográfica y climatológica de los Andes ecuatoriales. Por esto, las diferentes proyecciones de los escenarios de cambio climático sobre los páramos no tienen una señal uniforme.

A pesar de su vulnerabilidad, el páramo es un paisaje por excelencia para programas de mitigación y adaptación. El páramo contiene mucho carbono almacenado en su densa vegetación y, especialmente, en sus suelos. Conservar o restaurar el paisaje es una herramienta excelente para evitar emisiones o capturar carbono atmosférico. También los sistemas agroforestales o silvopastoriles en los límites inferiores del páramo pueden apoyar en esta tarea. Pero el cambio es un hecho y la sociedad paramera debe adaptarse a la nueva situación. Esta población, que está acostumbrada y ha desarrollado una cultura única bajo estas condiciones extremas pero diversas, tiene una capacidad desarrollada a lo largo de su historia para adaptarse.

Summary

High mountain biomes, such as the páramo, are particularly exposed and vulnerable to the effects of global climate change. Higher and more variable temperatures and alterations in precipitation patterns affect native páramo biota; many species tend to have narrow climatic niches and are therefore highly vulnerable to warming and habitat loss. This in turn generates changes in ecosystem composition and functioning that we are only beginning to elucidate, affecting processes such as productivity, evapotranspiration, decomposition, and mineralisation rates. All these changes in turn affect hydrology, carbon storage, soil stability, and biodiversity of high Andean ecosystems and landscapes. Similarly, changing temperature regimes affect the distribution, health, and productivity of crops and livestock, and promote new pests and the expansion of invasive species niches.

The effects of global climate change exacerbate the direct impact of inappropriate land-use and economic planning practices. In regions with high rates of ecosystem transformation, depletion of soil productive capacity, and water scarcity, these effects may be even greater under climate change scenarios. Moreover, the effects of climate change add an extra dimension to environment-related social and economic crises. What is true for the ecosystem is also true for communities: high mountain societies are more vulnerable to the effects of climate change than the general population. This has resulted in changes in livelihoods, abandonment of agriculture, and temporary or permanent migration to cities or abroad.

One of the major challenges is to understand future climate change scenarios. These different models have varying effects on the páramo climate due to the geographical and climatological complexity of the equatorial Andes. Therefore, the different projections of climate change scenarios on the páramo do not have a uniform signal.

Despite its vulnerability, the páramo is a landscape par excellence for mitigation and adaptation programmes. It contains a lot of carbon stored in its dense vegetation and especially in its soils. Conserving or restoring the landscape is an excellent tool for avoiding emissions or sequestering atmospheric carbon. Also, agroforestry or silvo-pastoral systems on the lower limits of the páramo can help in this task. But change is a fact and the páramo society must adapt to the new situation. This population, which is accustomed to and has developed a unique culture under these extreme but diverse conditions, has a historically developed capacity to adapt.

La problemática general del cambio climático en el páramo

Los ecosistemas de alta montaña, como el páramo, están particularmente expuestos y son muy vulnerables a los efectos del cambio climático global. A escala planetaria, el clima de las montañas está cambiando más rápidamente que al nivel del mar (MRI, 2015); estos cambios se manifiestan no solo en temperaturas promedio más altas, sino también en rangos térmicos más amplios: temperaturas máximas más altas y mínimas más bajas (Vuille et al., 2015). Las precipitaciones, en particular su estacionalidad, se han vuelto más erráticas e impredecibles (Vuille et al., 2003).

Tanto las temperaturas más altas y variables como las alteraciones en los patrones de precipitación afectan a la biota nativa de los páramos; muchas especies suelen tener nichos climáticos estrechos y son, por lo tanto, muy vulnerables al calentamiento y la pérdida de hábitat (Cuesta et al., 2020). Esto genera, a su vez, cambios en la composición, la estructura, la distribución y el funcionamiento de los ecosistemas y afecta procesos como la productividad, la evapotranspiración, la descomposición y las tasas de mineralización de maneras que apenas comenzamos a dilucidar. Todos estos cambios afectan a su vez a la hidrología, el almacenamiento de carbono, la estabilidad del suelo y la biodiversidad de los ecosistemas y los paisajes altoandinos (Cuesta et al., 2019). De manera similar, los regímenes de temperatura cambiantes afectan la distribución, la salud y la productividad de los cultivos y el ganado, y promueven nuevas plagas y la expansión de los nichos de especies invasoras (Pérez et al., 2010).

Los efectos del cambio climático global exacerban el impacto directo de las prácticas inadecuadas de uso de la tierra y de planificación económica. En regiones con altas tasas de transformación de los ecosistemas, agotamiento de la capacidad productiva de los suelos y escasez de agua, estos efectos pueden ser aún mayores bajo escenarios del cambio climático. Además, los efectos del cambio climático agregan una dimensión adicional a las crisis sociales y económicas relacionadas con el medio ambiente. Lluvias y heladas impredecibles, glaciares que desaparecen y fauna y flora cambiantes impactan en valores culturales claves para la identidad y el sentido de pertenencia de las poblaciones andinas rurales y urbanas.

Los efectos del cambio climático en los páramos no solo afectan directamente a los ecosistemas de alta montaña, sino que también tienen efectos indirectos en los territorios a menor elevación. Por su posición geográfica, los ecosistemas andinos, incluyendo los páramos de los Andes del Norte, son las torres de agua del continente y los cambios en estos ecosistemas y sus regímenes hídricos afectan la hidrología a nivel regional y continental.

En el Ecuador, los páramos cubren un área de 1,52 millones de hectáreas, distribuidas sobre las dos cordilleras andinas (véase el Capítulo 1). Todas las cuencas grandes del país nacen en el páramo. La poca superficie remanente de los glaciares y su retroceso acelerado reciente hacen que, actualmente, la importancia de los glaciares como reguladores de los sistemas hidrológicos del país sea limitada y, lastimosamente, cada vez menor (Buytaert et al., 2011). Sumado a esto, la desaparición de bosque andino en el callejón interandino (la vertiente oriental de la cordillera Occidental y la vertiente occidental de la cordillera Oriental) hace que el páramo sea la única infraestructura natural hídrica que nos queda en una importante parte del país; cualquier efecto del cambio climático sobre el páramo tiene el potencial de afectar a la hidrología y la ecología y, por ende, a la sociedad y la economía nacionales (Mosquera et al., 2022; Capítulo 3).

Lo que es válido para el ecosistema, también lo es para las comunidades: la sociedad de la alta montaña es más vulnerable ante los efectos del cambio climático que la población en general. La vulnerabilidad de una persona, familia o comunidad depende de muchos factores, entre ellos la exposición a los efectos del cambio climático, la dependencia económica y social de los recursos naturales, y la capacidad de adaptación. En general, al estar expuesta a un clima cambiante y a eventos extremos frecuentes, la población rural es más vulnerable al estar más aislada de los centros de actividad económica y de la oferta de servicios básicos. De la misma manera, las comunidades que dependen de la agricultura son más vulnerables que aquellas vinculadas a otros sectores económicos. Finalmente, su capacidad física y financiera para poder adaptarse es menor. En el páramo, estos factores son aún más críticos que en otros paisajes rurales de la región.

En este capítulo se presenta un resumen de las actuales proyecciones de los diferentes escenarios del cambio climático en el páramo, y sus efectos sobre los atributos abióticos y bióticos del ecosistema. Luego, se presenta información acerca de los efectos en la sociedad de páramo y en las actividades humanas, y su interacción con servicios ecosistémicos clave, incluyendo la acumulación de carbono y la provisión de agua. El capítulo termina con una presentación de las estrategias, actividades y posibilidades de adaptación y mitigación en el páramo ecuatoriano.

Escenarios de cambio climático en el páramo

El aumento de temperatura ha sido documentado inequívocamente y está ocurriendo a nivel global. Las temperaturas medias anuales en los Andes tropicales por encima de los 3000 m han aumentado a un ritmo de aproximadamente 0,13 °C por década durante las últimas seis décadas (1950-2010) (Cuesta et al.,

2020; Vuille et al., 2015). A su vez, algunas mediciones en campo de las temperaturas del suelo (-10 cm) en algunas cumbres de los páramos de Venezuela, Colombia y Ecuador de la red de monitoreo Gloria-Andes para el periodo 2013-2019 (incluyendo ocho cumbres en Pichincha y Antisana) muestran tendencias significativas: nueve de las 15 cumbre estudiadas presentan una tendencia general al aumento de las amplitudes térmicas registradas (Cuesta et al., en prensa). A pesar de estas líneas de evidencia, las proyecciones de cambio climático en los Andes aún tienen asociada una gran incertidumbre.

La información cuantitativa sobre la tendencia de los diferentes aspectos del clima (temperatura mínima/máxima promedio o absoluta, diferencias diarias, variabilidad estacional, precipitación) es escasa y poco uniforme. Esto es especialmente cierto para la información sobre los patrones de precipitación, cuya cobertura espacial y temporal es todavía más incompleta que la de la temperatura. De hecho, los cambios en las tendencias de precipitación comprobados a escala local son tan diversos que dificultan establecer patrones claros generalizables a nivel de los páramos (Buytaert et al., 2010; Anderson et al., 2011; Marengo et al., 2011; Buytaert y Ramírez, 2012). González-Zeas et al. (2019) demostraron una diferencia enorme entre las varias proyecciones basadas en modelos regionales de temperatura y precipitación en comparación con las observaciones reales en sitios en la alta montaña. Estos autores concluyen que es prácticamente imposible basar el manejo de los recursos hídricos sobre modelos regionales y que se debe fortalecer y extender con urgencia la cobertura geográfica de los sistemas de monitoreo hidroclimatológico de largo plazo, especialmente en zonas de alta montaña. En este escenario, en el que las características del cambio climático (temperatura, precipitación) son apenas parcialmente conocidas, el análisis de los efectos del fenómeno sobre la biodiversidad, la hidrología, la agricultura y las sociedades de los páramos tiene asociada una gran incertidumbre (Buytaert et al., 2010; de Bièvre et al., 2012). La escasez de la información es aún más crítica en áreas naturales y de difícil acceso como los páramos, porque hay aún menos estaciones climáticas.

La dificultad para establecer tendencias de precipitación de los Andes se debe principalmente a la falta de registros de observación fiables y a largo plazo, así como a la variabilidad, por lo general alta, de las precipitaciones anuales (Vuille et al., 2018; Schoolmeester et al., 2018). Sin embargo, la mayoría de los modelos pronostican un aumento de las precipitaciones durante la estación húmeda y un descenso durante la estación seca en los Andes tropicales (Vera et al., 2006). Específicamente, varios estudios sugieren una intensificación de las precipitaciones y un aumento del número de días con lluvia, lo que se traduce básicamente en un cambio en la variación estacional y una mayor frecuencia de fenómenos de lluvia extrema (véanse, por ejemplo, de Skansi et al., 2013;

Castino et al., 2017; Vuille et al., 2018). Sin embargo, la precipitación anual puede cambiar de forma notable, con una reducción o un aumento importante de los volúmenes anuales, en función de la ubicación y de la influencia de los fenómenos de ENSO (véanse, por ejemplo, Heidinger et al., 2018; Ruiz et al., 2017; Lenaerts et al., 2014; Garreaud, 2009).

Por las diversas características del clima en un país tropical y montañoso como el Ecuador, los escenarios de cambio climático son extremadamente complejos y su proyección sobre la extensión de páramo no dan una señal consistente en temperatura y mucho menos en precipitación. En general, los escenarios que predicen menor precipitación estiman que estas reducciones son más marcadas en el norte y el occidente de la zona paramera. En términos de escenarios con mayor precipitación, los cambios predichos son más pronunciados en los páramos del sur. Sorprendentemente, aunque sube la temperatura promedio, no hay una tendencia constante de temperatura máxima y mínima. Sin embargo, hay mayor coincidencia entre los modelos en cuanto a la frecuencia de eventos extremos: comparados con los datos históricos, todos los escenarios de año tipo estiman mayor cantidad de periodos de días consecutivos sin lluvia y un aumento del número de días con lluvias intensas en los páramos. Las épocas secas serían más frecuentes en los páramos de la cordillera Occidental y las épocas lluviosas más frecuentes especialmente en la cordillera Oriental (datos entregados por el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático [PLANACC] como insumo al Plan de Acción Nacional de páramo; Capítulo 7).

El impacto del cambio climático en el páramo y sus funciones ecosistémicas

Glaciares y desglaciación

Son pocas las montañas andinas en el Ecuador en las que todavía hay glaciares: de norte a sur son el Cayambe, Antisana, Cotopaxi, Iliniza Sur, Carihuairazo, Chimborazo y Altar. Hay más glaciares en la cordillera Oriental ecuatoriana porque el aire húmedo de la Amazonía propicia una mayor precipitación en esta región (Cáceres, 2010). Las temperaturas medias más altas y cambios en los regímenes de precipitación están provocando que la mayoría de los glaciares estén retrocediendo a un ritmo acelerado en la región, especialmente a partir de la década de los setenta (Rabatell et al., 2013; Vuille et al., 2018). En las altitudes elevadas de los Andes tropicales, las temperaturas de superficie han aumentado aproximadamente 0,1 °C cada decenio durante los últimos 50

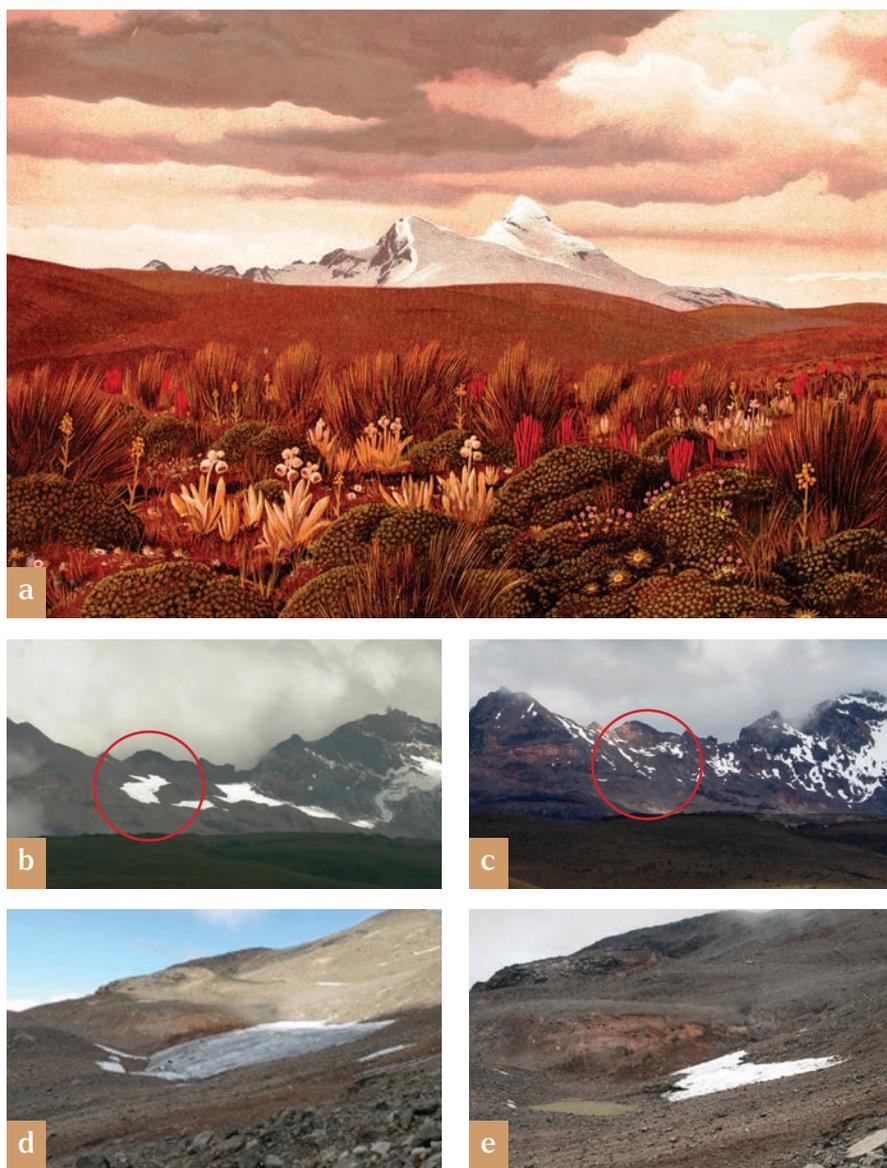


Figura 12.1 Evidencias de la desaparición del último glaciar en el Carihuairazo. a) Tempera de Rudolf Reschreiter (1906) c) Vista frontal del volcán en 2008, con el glaciar (círculo rojo) incluyendo su zona de acumulación. c) La misma vista en 2021, donde ya no se puede ver el glaciar (la nieve es acumulación de nieve temporal, no hielo). d) El remanente del glaciar en enero 2020, donde ya no hay zona de acumulación pero sí conexión con el lago terminal. e) La misma vista en abril 2023 con el glaciar ya desconectado del lago. Fotografías: Marcela García (a), Esteban Suárez Robalino (b-c), Robert Hofstede (d) y Juan Carlos Veloz (e)

años (Vuille et al., 2015). Debido a este calentamiento, durante este periodo la altitud del nivel de congelación (isoterma de 0 °C) ha aumentado unos 45 m en promedio en toda la región, ocasionando el deshielo progresivo de la capa glacial (Bradley et al., 2009).

Los glaciares que coronan el páramo ecuatoriano se encuentran más cerca de la línea ecuatorial que cualquier otro glaciar andino, por lo que el aumento de temperatura es mayor (Schoolmeester et al., 2018). La pérdida de volumen de los glaciares ha sido significativa en los últimos decenios y previsiblemente continuará sucediendo en vista a los escenarios del cambio climático (Francou, 2004; Vuille et al., 2008). El monitoreo de los glaciares mediante fotografías aéreas demostró que durante el último medio siglo (1960-2017) el Ecuador ha perdido más de la mitad de la extensión de sus glaciares, quedando solamente 43,5 km²; los glaciares individuales muestran un retroceso aún más acelerado. Por ejemplo, los glaciares del Cotopaxi sufrieron una pérdida de superficie de aproximadamente 52 % entre 1976 y 2016 (Cáceres, 2016, 2017) y los glaciares del volcán Chimborazo perdieron una superficie del 72 % entre 1962 y 2016. Tres volcanes cercanos a los 5000 m (Cotacachi, Tungurahua y Sincholagua) han perdido su capa de hielo en el último siglo. El derretimiento se manifiesta de forma particularmente evidente en los glaciares pequeños de poca altitud de los Andes tropicales (Rabatel et al., 2013), como el Iliniza Sur y el Carihuairazo. Este último todavía tiene un pequeño glaciar, pero su desaparición es de esperarse dentro de pocos años (Figura 12.1): perdió el 91 % de su superficie desde el 1976 y ya no cuenta con una zona de acumulación, por lo cual es inevitable su desaparición dentro de poco tiempo (Jordán et al., 2005; Cáceres, 2010, 2016, 2017; Hofstede, 2020).

La dinámica de los glaciares no solamente está determinada por la temperatura, sino también por los cambios en la precipitación. Los estudios que se ocupan de la cubierta de nieve apuntan a una tendencia decreciente general durante los dos últimos decenios, especialmente en las faldas orientales de los Andes (Schoolmeester et al., 2018; Saavedra et al., 2018). Se observan fluctuaciones interanuales bastante pronunciadas y existe un vínculo convincente con el fenómeno de El Niño (Malmros et al., 2018). Por ejemplo, las fotografías aéreas del glaciar Antisana 15 muestran que el glaciar retrocedió con gran rapidez entre 1995 y 2000, coincidiendo con periodos de fenómenos de El Niño de gran intensidad (Francou et al., 2000, 2004).

La poca superficie remanente de los glaciares luego de la Pequeña Edad del Hielo (que tuvo su fin a mediados del siglo XIX) y su retroceso acelerado reciente hace que, actualmente, su importancia como reguladores de los sistemas hidrológicos del país sea limitada: en la mayoría de las regiones de páramo, como en el Ecuador, la producción de escorrentía glaciar es mínima y solo localmente

significativa (Buytaert et al., 2011). Debido al aumento del derretimiento, el caudal de muchas quebradas que nacen en glaciares andinos está, actualmente, por encima del promedio a largo plazo, pero se espera que se reduzcan drásticamente en el futuro debido a la disminución o desaparición de muchos glaciares (Vuille et al., 2008). Entre otros, la menor contribución del derretimiento de los glaciares puede intensificar el cambio hacia un clima local de páramo más seco (Villacís, 2008). Además, los humedales locales que dependen en gran medida de la afluencia de agua de los glaciares pueden cambiar drásticamente o desaparecer (Bradley et al., 2006; Vuille et al., 2008).

Nuevos espacios después del retroceso glaciar

El retroceso acelerado de los glaciares tropicales crea espacios para la sucesión primaria y el ensamblaje de nuevos ecosistemas, y constituye una oportunidad para que los taxones y las comunidades expandan su rango altitudinal de distribución (que experimentan una presión de desplazamiento hacia arriba y contracción de su área de ocurrencia producto del calentamiento global), y colonicen áreas previamente desprovistas de vida (Capítulo 6). Estos nuevos espacios, cercanos a los glaciares en contracción/desaparición, constituyen ambientes extremos con suelos en etapas muy incipientes de formación y expuestos a condiciones ambientales muy limitantes de pendiente, temperatura, disponibilidad de agua, viento e irradiación (Llambí et al., 2021, Anthelme et al., 2021).

Recientemente se han realizado estudios pioneros en los Andes del Norte sobre la colonización de la vegetación y otros taxones a lo largo de las cronosecuencias glaciares, tanto en el Ecuador (Antisana, Carihuairazo, Pichincha; Suárez et al., 2015, Rosero et al., 2021, Anthelme et al., 2021), como en Venezuela (Humboldt: Llambí et al., 2021) y Colombia (Santa Isabel: Anthelme et al., 2022). Los resultados de estos estudios indican que los procesos de sucesión primaria en estos ambientes, especialmente en áreas donde los glaciares están por desaparecer, son muy lentos y que estas nuevas comunidades son extremadamente frágiles (Capítulo 6).

Así, la investigación disponible en los Andes tropicales sugiere que después de varias décadas de retroceso acelerado de los glaciares, el ensamblaje de nuevos ecosistemas puede mostrar un '*lag* temporal' en su respuesta, el no tener la diversidad taxonómica y funcional que se esperaría según las nuevas condiciones más favorables de temperatura. Este fenómeno se conoce como 'deuda climática'. Además, la rápida contracción de los glaciares tropicales induce una reducción acelerada de la influencia de los glaciares en los ecosistemas terrestres y acuáticos adyacentes, y puede tener consecuencias considerables en la biodiversidad. Esto

es, especialmente, así para la biota adaptada a la vida en estos ambientes extremos, como la fauna acuática característica de ríos de influencia glaciar (Jacobsen et al., 2012; Cauvy-Fraunié et al., 2014; 2016, Milner et al., 2017). La disminución en el suministro de agua de deshielo no solo reduce la disponibilidad de hábitat para las especies acuáticas, sino que también aumenta el riesgo de desecación para hábitats terrestres claves, como los humedales altoandinos y ambientes de superpáramos (Breen y Levesque, 2006; Anthelme et al., 2021).

El impacto de cambio climático en el suelo

Dado el tamaño del reservorio de carbono en el suelo (casi el doble que el carbono almacenado en la atmósfera y casi tres veces más que la vegetación), pequeños cambios en este compartimiento podrían conducir a grandes impactos en la concentración de CO₂ en la atmósfera. Por ende, la respuesta de la materia orgánica del suelo (MOS) al cambio climático es crítica (Rocci et al., 2021; Smith et al., 2008; Capítulo 2).

Los modelos acoplados del clima y el ciclo del carbono indican que el aumento de las emisiones de CO₂ a la atmósfera desde el carbono orgánico del suelo, como resultado de temperaturas más altas podría conducir a una retroalimentación positiva entre el cambio climático y el ciclo del carbono, resultando en niveles de CO₂ mucho más altos y, a su vez, un calentamiento más acelerado. Sin embargo, la magnitud de este efecto es incierta y posiblemente dependa de cómo la descomposición de la MOS responda a los cambios en el clima, y de las características ambientales y edáficas de cada región geográfica. La respuesta de la MOS al cambio climático también podría variar de acuerdo con el grado de estabilidad de la materia orgánica en el suelo, por lo que es clave analizar el balance entre el aumento de las entradas de carbono al suelo como consecuencia de una productividad más alta, y las pérdidas producidas por el aumento de las tasas de descomposición. Estas interacciones entre el clima y la dinámica del carbono en el suelo también podrían modificarse como resultado de las interacciones entre el cambio climático y otros aspectos del cambio global, como los cambios en la composición atmosférica y en el uso del suelo (Smith et al., 2008).

Dado que la respuesta de la MOS al cambio climático depende del balance entre las entradas y las pérdidas de carbono, y debido a que se prevé un calentamiento desigual según la región, es posible que ciertos ecosistemas sean más vulnerables que otros. Se proyecta que el impacto del cambio climático será mayor en sitios con temperaturas muy bajas respecto a sitios más templados (Mitchell et al., 2004).

Algunos estudios del efecto del calentamiento global en la descomposición de la MOS apuntan hacia una tasa de descomposición más elevada en la fracción

lábil de la MOS, mientras que, en la fracción recalcitrante, esta tendencia no es clara. Para las regiones de los trópicos, la información disponible es muy limitada (Couteaux et al., 2002; Davidson y Janssens, 2006; Rocci et al., 2021).

Un aspecto característico de los páramos es la alta acumulación de MOS, que puede representar más de 10 veces la cantidad de biomasa acumulada en la vegetación (Llambí y Rada, 2019). Los estudios disponibles indican que esta materia orgánica es particularmente resistente a la descomposición y que la biomasa microbiana del suelo representa una proporción muy baja de la MOS, inferior al 1% (Couteaux et al., 2002; Llambí y Sarmiento 1998; Sarmiento y Bottner, 2002). Desafortunadamente, para los ecosistemas de páramo, especialmente aquellos sobre suelos volcánicos como los que predominan en el Ecuador, no están disponibles descripciones más detalladas de las proporciones lábil/recalcitrante y de otras características del carbono del suelo. Existe cierta evidencia de que en los suelos de páramo el aumento de temperatura provocaría un aumento de emisiones de CO₂, alterando la capacidad de los páramos para secuestrar carbono (Curiel Yuste et al., 2017; Carrillo-Rojas et al., 2018; Couteaux et al., 2022). Sin embargo, los estudios son insuficientes para establecer conclusiones definitivas.

En el volcán Antisana se han realizado experimentos iniciales sobre la estabilidad del carbono en función de la vegetación dominante en horizontes superficiales. Los resultados preliminares indican que, en zonas dominadas por almohadillas, el carbono orgánico del suelo es más inestable, siendo más susceptible a la descomposición en ensayos de incubación a temperatura variable que sus contrapartes en suelos cubiertos por pajonales. Esta inestabilidad también se expresa como cambios en la cantidad de materia orgánica lábil y un incremento en la cantidad de biomasa microbiana, y podría estar asociada a una reducción en la densidad aparente y un incremento en la densidad de MOS (Calispa et al., 2021; Dib, 2022; van Ypersele, 2019).

El impacto del cambio climático en la vegetación

Los aspectos del cambio climático que potencialmente tienen un efecto sobre la vegetación del páramo son el aumento de la temperatura, los cambios en los regímenes de precipitación y los cambios en la radiación incidente (Hofstede y Llambí, 2020). Estos factores pueden tener efecto en la posición de los pisos altitudinales, la desaparición de las especies vulnerables y la aparición de otras especies que toleran mejor las nuevas condiciones. Al mismo tiempo, estos cambios podrían dar lugar a cambios en las condiciones de uso del suelo, provocando el avance de la frontera agrícola y afectando así a la vegetación (Araujo y Rahbek, 2006; Anderson et al., 2011; Cuesta et al., 2012a).

Una de las principales amenazas del cambio climático sobre el páramo es la potencial subida de los cinturones altitudinales. Debido al aumento de la temperatura, es de esperarse que biomas enteros (o al menos muchas de sus especies constituyentes) tiendan a desplazarse a altitudes mayores. Entre más alto se encuentre un ecosistema, mayor será su afectación, porque el espacio geográfico a altitudes mayores es más limitado. Por esto, hay estudios de simulación que indican que el superpáramo es el bioma más vulnerable a este desplazamiento altitudinal, seguido por el páramo propiamente dicho (Tovar et al., 2013).

Algunas de las primeras evidencias de una estrecha relación entre la temperatura y la vegetación fueron proporcionadas por Alexander von Humboldt mientras viajaba por la América tropical a principios del siglo XIX (Romanowski y Jackson, 2009; Cuesta et al., 2020). Inspirado por la vegetación en volcanes como el Chimborazo y el Antisana, Humboldt estableció una clara relación entre la elevación y la distribución de los taxones de plantas y definió el concepto de zonación vertical de la vegetación (von Humboldt, 1807). Como las regiones alpinas tropicales están expuestas a grandes amplitudes térmicas diarias, incluyendo condiciones de congelación nocturnas, la capacidad de las plantas para resistir estas condiciones ha sido propuesta como uno de los principales factores que estructuran la naturaleza alpina tropical, las comunidades de plantas y el ensamblaje de especies a lo largo del gradiente altitudinal (Rundel et al., 1994; Rada et al., 2019).

A nivel de especies, hay tres respuestas generales al cambio climático: migración, adaptación o extinción local. Se puede esperar una interacción entre estos tres mecanismos: un reemplazo acelerado en la distribución de especies puede resultar en mayores tasas de extinción y también en impactos sobre la fenología y fisiología de especies (Parmesan y Yohe, 2003; Buytaert et al., 2010; Cuesta et al., 2012b; Pelayo et al., 2022).

Las especies de alta montaña son especialmente vulnerables al cambio climático por dos razones principales: a) las adaptaciones específicas a condiciones climáticas extremas hacen que pequeños cambios en estas condiciones (especialmente cuando son menos 'extremas', por ejemplo porque las temperaturas aumentan) den lugar a una restricción de sus nichos climáticos y a que otras especies puedan ocuparlos (Cuesta et al., 2020), y b) los ecosistemas de alta montaña tienen una extensión limitada, tienden a estar fragmentados y allí las especies encuentran barreras físicas para migrar de un área a otra (Grabherr et al., 2010; Bendix et al., 2013). Con base en los cambios predichos en la distribución de los nichos climáticos de las especies bajo diferentes escenarios del cambio climático futuro, Cuesta et al. (2008) estimaron que en los páramos andinos alrededor del 35 % de las especies de aves (102 especies del total evaluado) y el 60 % de las especies vegetales (125 especies de aquellas evaluadas) podrían

extinguirse o verían su distribución drásticamente reducida para el 2080. La flora y la fauna del páramo y el superpáramo mostraron ser potencialmente más afectadas que las de otros pisos altitudinales.

Para el año 2050, se estima una pérdida del 30 al 50 % del páramo ocasionada por el desplazamiento altitudinal de los cinturones zonales (Ruiz et al., 2011). Helmer et al. (2019) estimaron que, en los próximos 25 a 45 años, del 70 al 86 % de los páramos se secarían o serían reemplazados por bosques debido al incremento de la temperatura y a los cambios en precipitación y nubosidad. En la práctica, es probable que un aumento en la presencia humana y la necesidad de tierras agrícolas resulten en que muchos de los espacios dejados por el páramo no sean ocupados por el bosque andino sino por cultivos y potreros (Hofstede et al., 2014).

Beltrán (2018) se enfocaron en predecir los impactos del cambio climático sobre la distribución de los nichos climáticos de los 11 ecosistemas de páramo existentes en los Andes del Ecuador, considerando condiciones climáticas actuales (1950-2000) y futuras (2050 y 2070) con base en escenarios de concentración de gases de efecto invernadero (GEI) medio (RCP 4,5) y alto (RCP 8,5). El estudio muestra que dentro de 30 (2050) a 50 (2070) años, los ecosistemas de páramo con distribución aislada o restringida podrían sufrir una contracción significativa de su distribución (> 60 %) o experimentar la extinción total, mientras que los ecosistemas con una distribución amplia (como el páramo de pajonal) parecen menos vulnerables (< 60 %). Específicamente, se ha pronosticado la extinción total de la zona potencial de distribución para cinco de los 11 tipos de ecosistemas de páramo, lo que podría representar la pérdida de especies abundantes y menos comunes, reduciendo la capacidad del ecosistema para amortiguar los impactos causados por las alteraciones físicas y biológicas ocasionadas por el cambio climático (por ejemplo, cambios en la precipitación y temperatura; Beltrán, 2018). La reducción significativa de los nichos climáticos sugiere que se podría observar un aumento potencial en la fragmentación y el aislamiento de los parches de páramo. Si bien algunos ecosistemas de páramo mostraron signos de mayor tolerancia a las condiciones climáticas futuras, esto no impide que se registren pérdidas significativas de sus rangos originales de distribución, anulando la posibilidad de conectarse con parches de páramo adyacentes, como predijeron otros estudios en el pasado (Cuesta, 2007; Young, 2009; Ramírez-Villegas et al., 2014).

Sin embargo, hacer proyecciones sobre el cambio climático y su impacto en la biodiversidad basadas sobre modelos climáticos enfrenta importantes limitaciones, considerando que hay una enorme diferencia entre diferentes escenarios de cambio climático (especialmente a escalas locales) y que estos modelos prestan atención limitada a procesos clave como la capacidad diferencial de dispersión y el establecimiento de las especies, así como el papel de las interacciones entre

especies, en modular estos procesos (por ejemplo, competencia, facilitación y polinización). Aunque con el aumento de la temperatura se esperan cambios en los rangos de distribución de las especies, la evidencia empírica en las regiones alpinas tropicales es escasa debido a la falta de datos suficientemente antiguos de parcelas permanentes georreferenciadas (Cuesta et al., 2020, Buytaert et al., 2011) y de datos detallados de la distribución de las especies (Feeley y Silman, 2011).

En años recientes se han publicado análisis empíricos sobre los cambios en la vegetación asociados al cambio climático. Entre estos se encuentran estudios que reevaluaron las áreas censadas por Humboldt y por Whympers hace más de 140 años en el Ecuador (Morueta-Holme et al., 2015; Moret et al., 2019, 2021), y otro estudio que hace una comparación de parcelas de bosque andino que habían sido censadas en múltiples ocasiones desde la década de los noventa (Fadrique et al., 2018). Estos trabajos encontraron evidencias de cambios direccionales hacia arriba en la distribución de las especies del bosque altoandino y el páramo causados por el aumento de la temperatura.

Desde hace más de una década, el capítulo andino del *Global Observation Research Initiative in Alpine Environments* (red Gloria-Andes) ha establecido parcelas de vegetación permanente en cumbres de alta montaña a lo largo de todo el rango latitudinal de los Andes (incluyendo cumbres en la zona de Antisana y Pichincha), como línea de base para monitorear los efectos del cambio climático en la composición de las especies por encima de la línea de árboles (Cuesta et al., 2017). Este programa de monitoreo de largo plazo está comenzando a generar evidencias empíricas sobre los efectos del cambio climático utilizando una metodología estandarizada a escala continental. Los resultados muestran que, entre más cerca de la línea ecuatorial y mayor la elevación de las cumbres, más estrecho es el llamado 'nicho térmico' de las especies y mayor es la proporción de estas especies con nichos térmicos restringidos en las comunidades. Es decir, las especies y comunidades de páramo, y en especial las comunidades dominadas por especies endémicas especialistas de alta montaña, tienen una mayor vulnerabilidad frente al aumento en las temperaturas que las especies y comunidades de montañas más alejadas de la línea ecuatorial o ubicadas a elevaciones menores (Cuesta et al., 2020).

Datos recientes de los primeros años de seguimiento diacrónico de las parcelas permanentes de la Red Gloria-Andes (luego de 5 a 8 años del establecimiento de la línea base) muestran que en más de tres cuartos de las cumbres de monitoreo en el páramo (en Venezuela, Colombia y Ecuador) ha ocurrido un aumento en la riqueza de especies. Sin embargo, la cobertura total de plantas vasculares ha disminuido en muchas de las cumbres (particularmente en cumbres de mayor elevación), pero aumentado en otras (en las cumbres a menor elevación; Cuesta et al.,

en prensa). Estos resultados sugieren que el aumento en la riqueza de las especies ha estado asociado a un aumento en la abundancia de las especies con nichos térmicos más amplios (características de elevaciones menores), mientras que ha habido una reducción en la cobertura de las especies altoandinas y endémicas del páramo. Sin embargo, es fundamental contar con datos de más largo plazo para dilucidar si este aumento inicial de la riqueza será seguido de una disminución posterior al producirse la exclusión competitiva, o desaparición de los nichos térmicos de estas especies especialistas de la alta montaña tropical.

Quizás el aspecto más estudiado de la dinámica de cinturones altitudinales con el cambio climático es la posición del límite superior de los bosques (Werner et al., 2013), porque es uno de los ecotonos más conspicuos en la vegetación de las montañas y sabemos que su posición altitudinal ha fluctuado varios cientos de metros producto de los cambios en el clima durante el Holoceno y el Pleistoceno (Bakker et al., 2008; Flantua et al., 2019; Capítulo 6). Algunos modelos de simulación de la posición altitudinal del ecotono bosque-páramo y los análisis de los cambios en su distribución (por ejemplo, en parcelas permanentes de la Red de Bosques Andinos¹) sugieren que el cambio climático actual está asociado con un movimiento hacia arriba del límite superior del bosque potencial, especialmente en áreas protegidas con limitada actividad humana (por ejemplo, Bader y Ruitjen, 2008; Young et al., 2011; Duque et al., 2015; Fadrique et al., 2018; Arzac et al., 2019). Sin embargo, la zona de transición bosque-páramo ha estado sometida a extensos procesos de transformación producto de las quemadas y la deforestación ligadas a la actividad agrícola y ganadera, resultando en la 'paramización' del bosque en muchas regiones de los Andes del Norte, lo que complica el análisis de la respuesta del ecotono al cambio climático (Wille et al., 2002; Sarmiento y Frolich, 2002; Bader et al., 2007; Velasco-Linares y Vargas, 2008; Llambí, 2015). Además, tanto en áreas intervenidas/paramizadas como en zonas de transición sin evidencias recientes de uso, los estudios indican que las especies leñosas dominantes del bosque (incluyendo especies de los géneros *Polylepis*, *Gynoxys* y *Escallonia*, entre otros) enfrentan limitaciones muy importantes para la colonización o el establecimiento en áreas abiertas fuera del dosel cerrado. Estas limitaciones, vinculadas a procesos de mortalidad/establecimiento de las especies leñosas, pueden inhibir o retardar el avance o restauración del bosque cerrado como resultado de procesos de retroalimentación positiva entre la cobertura arbórea y limitantes ambientales microclimáticos (por ejemplo, niveles de radiación y, bajas temperaturas), especialmente en zonas donde el ecotono exhibe un límite abrupto (González et al., 2011; Bueno y Llambí, 2015; Bader et al., 2007, 2008, 2020).

¹ <https://redbosques.condesan.org/>

Otros efectos del cambio climático sobre la biodiversidad incluyen la mayor presencia de enfermedades y plagas, la aparición de especies exóticas invasoras que pueden reemplazar a especies nativas y efectos de mayor irradiación en la epidermis de plantas (Young et al., 2001; Anderson et al., 2011; Bendix et al., 2013; Llambí et al., 2020). Sandoya et al. (2017) reportaron la presencia de 43 especies de plantas exóticas en un gradiente altitudinal entre los 1000 y los 4000 m s. n. m en el Ecuador, con un máximo de riqueza entre los 2000 y 3000 m. Sin embargo, la importancia relativa de las exóticas de origen templado, como *Taraxacum officinale* y *Rumex acetosella*, aumentó a la par de la elevación en el piso de los páramos. De hecho, algunos estudios en los páramos de Venezuela y Colombia indican que la invasora exótica *R. acetosella* ha expandido su distribución desde el piso agrícola (donde fue introducida accidentalmente en el siglo XVIII y hoy domina áreas en sucesión secundaria temprana), siendo ahora una especie colonizadora muy abundante en cumbres de monitoreo de la red Gloria-Andes sobre los 4000 m de elevación y en áreas sucesionales luego del retroceso glaciar (Cuesta et al., 2017; Anthelme et al., 2022). A su vez, Llambí et al. (2018, 2020) demostraron que la abundancia y el desempeño de esta invasora pueden ser favorecidos por plantas nodrizas parameras, incluyendo arbustos y cojines, mientras que, a altas densidades locales, *Rumex* tiene un efecto negativo sobre la abundancia y la riqueza de las especies herbáceas nativas del superpáramo.

El impacto del cambio climático en la fauna

En comparación con la información existente para la flora y la vegetación, hay muy poca información disponible sobre el impacto del cambio climático sobre la fauna del páramo (Capítulo 5). Urbina y Castro (2010) modelaron los nichos ecológicos de tres especies de anfibios y reptiles con potencial de invasión y concluyeron que su presencia podría pasar del 10-30 % del territorio al 33-75 % en escenarios previstos de cambio de temperatura. Sin embargo, se hacen necesarios estudios que realicen un seguimiento diacrónico de la dinámica de colonización de especies invasoras en el páramo (Hofstede et al., 2014). En este sentido, Moret et al. (2016) encontraron evidencias de cambios direccionales hacia arriba en la composición de la comunidad de los escarabajos Carabidae con base en estudios diacrónicos. En el caso de la puna peruana, Seimon et al. (2017) registraron durante una década la ocupación de nuevos espacios en alta montaña por poblaciones de tres anfibios, vinculados con cambios en las condiciones ecológicas de áreas de humedales ligadas al retroceso glaciar, así como un aumento en la incidencia de hongos patógenos sobre estas mismas especies.

El impacto acumulado: los efectos del cambio climático en la hidrología

El efecto del cambio climático sobre la temperatura, la precipitación, el suelo, la vegetación y las actividades humanas determinan sus impactos sobre la hidrología. No se puede entender el impacto del cambio climático en la hidrología del páramo sin considerar los factores bióticos y abióticos que influyen en su dinámica hídrica. Se pueden identificar y explicar los efectos individuales sobre cada factor, pero la interacción de factores es la que determina la respuesta de los recursos hídricos; hasta ahora, esta interacción ha sido el mayor reto para identificar o modelar pues su entendimiento dependerá del monitoreo a largo plazo de los sistemas hidrológicos (Buytaert et al., 2009; Buytaert et al., 2011; Buytaert y de Bièvre, 2012; Mosquera et al., 2022; Correa et al., 2020; Capítulo 3).

Evidentemente, la relación directa entre el cambio climático y la hidrología se da a través de la precipitación. Como se ha explicado, es difícil identificar patrones exactos de cambios en la cantidad y la frecuencia de las lluvias. Sin embargo, las tendencias generales son que los páramos más secos (en el Ecuador, generalmente en la parte central de la cordillera Occidental y partes de los páramos interandinos) recibirán menos lluvia, y los páramos más húmedos (generalmente en la vertiente amazónica) tendrán más lluvia. La otra tendencia general esperada es mayor estacionalidad, es decir, menos lluvia en estaciones secas y más lluvia en estaciones húmedas. Estas generalidades implicarían que el sistema hidrológico que depende de los páramos estará más afectado en los páramos más secos y en la época seca (Rodríguez et al., 2019; Correa et al., 2020).

Las temperaturas más altas como consecuencia del cambio climático causarán alteraciones en las tasas de evaporación de agua y transpiración de la vegetación. Por esto, es posible esperar un balance hídrico más desfavorable, es decir, una menor cantidad de agua que pueda retenerse en el suelo y escurrir hacia las quebradas. Sin embargo, considerando que la evapotranspiración puede ser relativamente baja en comparación con la precipitación (excepto en páramos secos, véase Rodríguez et al., 2019), no es de esperar que un aumento limitado en las temperaturas tenga por sí solo una influencia muy marcada en el balance hídrico (precipitación-evapotranspiración). Sin embargo, otros factores climáticos que influyen en la evapotranspiración (irradiación, cobertura de nubes, neblina y viento) pueden potenciar el impacto de la temperatura sobre la evapotranspiración y así afectar el balance hídrico (Buytaert et al., 2011).

Un fenómeno de mayor importancia puede ser la potencial reducción en la cantidad de materia orgánica en el suelo. La materia orgánica es el principal

factor que contribuye a la retención hídrica en el suelo. Las condiciones del suelo más secas y cálidas provocarán un carbono orgánico de más rápida rotación, disminuyendo el almacenamiento de carbono orgánico subterráneo. Dado que la mayor parte de carbono en el ecosistema se almacena en los suelos, es poco probable que un aumento de la biomasa aérea pueda compensar la pérdida de carbono del suelo a nivel del ecosistema. Por lo tanto, una liberación neta de carbono a la atmósfera es esperada, afectando la capacidad de retención hídrica (Buytaert et al., 2011).

Otra forma importante en que la hidrología puede ser afectada por el cambio climático es a través de la vegetación. Es probable que el cambio climático afecte la composición, la diversidad y la estructura funcional de la vegetación y, eventualmente, influya en la dinámica del límite de ecosistemas como el bosque y el páramo (Arzac et al., 2019). Sin embargo, como se discutió arriba, las limitaciones que experimentan formas de vida como las leñosas para su establecimiento en áreas abiertas de páramo vinculadas con procesos de retroalimentación positiva (Llambí 2015; Bader et al., 2007, 2020) podrían generar un retraso en la respuesta de los ecosistemas frente al cambio climático.

Los eventuales cambios en los límites de los ecosistemas implicarían que los páramos (al menos los de menor elevación) sean reemplazados a largo plazo por vegetación arbustiva o de bosque. Estos ecosistemas naturales igualmente tienen una interacción positiva con la hidrología andina. Sin embargo, el conocimiento de la hidrología de bosque andino frente a la del páramo está basado en situaciones naturales y no en la respuesta de ecosistemas en transición, pero los 'nuevos' cinturones vegetales dominados por leñosas podrían ser más estrechos y secos como producto de factores como una menor incidencia de la neblina (Helmer et al., 2019).

Si bien el acelerado descongelamiento de glaciares tiene un efecto medible sobre la hidrología, especialmente en la época seca, los efectos sobre los caudales de los ríos del páramo son relativamente pequeños (Hofstede et al., 2014; Moran-Tejada et al., 2018). La razón es que, en la región de los páramos, contrario a la región de jalca o puna, la superficie de glaciares es relativamente pequeña y la precipitación en páramo es mayor que en los otros biomas (Buytaert et al., 2006). Por ejemplo, la cuenca con mayor superficie de glaciares en el Ecuador (Guayllabamba), provee agua a la ciudad de Quito. Si bien a nivel local, cerca del volcán Antisana, los glaciares permiten contar con una contribución del orden del 35 % al caudal a nivel de la ciudad de Quito, el aporte de agua de origen glaciar representa apenas entre el 2 % y el 4 % del total anual del agua (Villacis et al., 2011). Sin embargo, es probable que el efecto del retroceso glaciar sobre la hidrología del páramo sea mayor en cuencas de páramo con glaciares

remanentes más extensos y con relativamente baja precipitación, como por ejemplo alrededor del volcán Chimborazo (Buytaert et al., 2006).

Los impactos del cambio climático vía factores bióticos y abióticos (precipitación, temperatura, vegetación y suelos) sobre la hidrología pueden ser evidentes. Sin embargo, las proyecciones de cambio climático sugieren, en general, un impacto relativamente limitado en la disponibilidad de agua, aunque las incertidumbres son grandes (Buytaert y de Bièvre, 2012). Es probable que los efectos del cambio climático vía factores antrópicos sobre la hidrología sean mayores y que estos factores exacerban los efectos de los procesos bióticos y abióticos influenciados por el cambio climático. Las actividades humanas asociadas al páramo están cambiando en respuesta al cambio climático, con sistemas productivos a mayor altitud y cambios en las prácticas de manejo vinculados a procesos de adaptación a las nuevas condiciones (por ejemplo, mayor uso de agroquímicos en respuesta al aumento en la incidencia de plagas). Esto podría resultar en la degradación o la desaparición de extensas áreas de páramos que serían reemplazadas por sistemas agrícolas no sostenibles y con un impacto negativo sobre la hidrología regional. Además, el crecimiento de la población en determinadas partes de la Sierra ecuatoriana, especialmente en las zonas urbanas, aumenta la demanda de agua. Es probable que los cambios demográficos esperados superen el impacto del cambio climático en la disponibilidad de agua y, por lo tanto, deberían ser la prioridad para la formulación de políticas locales (Buytaert y de Bièvre, 2012).

El impacto del cambio climático en la producción agrícola en el páramo

En todos los países andinos, el páramo interactúa con la agricultura al ser el mayor sustento de la población rural (Capítulo 9). Una parte importante de los páramos ya ha sido transformada en áreas agrícolas (potreros, sembradíos u áreas en barbecho, con o sin ganadería, Hofstede y Llambí, 2020). Debido al desconocimiento de su extensión original, es imposible dar cifras exactas de la superficie de páramo que ha sido transformada en áreas agrícolas. Una estimación gruesa para el Ecuador indica que aproximadamente el 40 % del páramo original está transformado en agroecosistemas y un 30 % corresponde a pajonales usados en la ganadería extensiva (Hofstede et al., 2002b; Hofstede et al., 2014). En un estudio a nivel de paisaje en Cotopaxi, López et al., (2017) demostraron como la configuración del paisaje cambió notablemente con el aumento de la temperatura y, de forma menos pronunciada, con cambios en la precipitación: entre 1976 y 2012 hubo una notable pérdida glaciaria y de vegetación paramera, así como un aumento de cultivos, potreros y áreas erosionadas. Evidentemente, los cambios

en el uso de la tierra y la agricultura a nivel del paisaje no son únicamente determinados por el cambio climático, sino principalmente por factores económicos, sociales y culturales. Algunos estudios detallados de la dinámica del límite agrícola demuestran que el avance ha sido constante desde hace por lo menos medio siglo. Las razones reportadas son muchas (reforma agraria, tenencia de tierra, degradación de zonas más bajas), cada uno interactuando con, pero independiente, del cambio climático (López, 2004).

Aunque existe una relación entre la agricultura y el clima mundial, la agricultura está relacionada, a su vez, con el clima local y la sensibilidad ecosistémica propia de cada región; esto es significativo, pues, según el IPCC, las regiones tropicales y subtropicales serán las más afectadas en cuanto al deterioro de su estructura productiva (Hofstede et al., 2014). Esto se agrava para las regiones de la alta montaña, pues, según Cabrera et al. (2010), son estas las que recibirán el mayor impacto. Así, es de esperarse que los mayores efectos del cambio climático en la agricultura de la alta montaña se deban, entre otros, a mayores temperaturas, cambios en la disponibilidad de agua, aumentos en la incidencia de plagas de insectos, cambios en los procesos de descomposición y el deterioro de las comunidades microbianas del suelo (Cabrera et al., 2010b). Adicionalmente, la incertidumbre sobre los escenarios del cambio climático en los altos Andes dificulta analizar su posible impacto en la agricultura. Por ejemplo, si bien hay consenso sobre el aumento de la temperatura media, existe una mayor incertidumbre sobre las tendencias en las temperaturas máximas y mínimas (heladas). En escenarios de mayor temperatura media, pero con mayor incidencia de heladas (Ruiz et al., 2008), muchos cultivos podrían mostrar, de todos modos, una menor aptitud climática.

El supuesto más ampliamente apoyado por la evidencia disponible es que el incremento de la temperatura dará lugar a una mayor productividad en general y, en zonas de montaña, permitirá que la agricultura pueda ser practicada a mayores elevaciones. Postigo et al. (2012) ensayaron ejercicios de modelización para analizar la aptitud climática de 25 cultivos andinos bajo diferentes escenarios de cambio climático. Encontraron una tendencia potencial de aumento en la elevación de todos los cultivos, lo que resulta en diferentes patrones de ampliación y disminución de la aptitud climática. Las áreas de mayor ganancia se ubicarían en las zonas altas en los Andes. Esto sugiere un patrón general de movimiento hacia arriba en los cultivos seleccionados, con una pérdida de aptitud para los cultivos de altura y una expansión para los cultivos de tierras bajas. De los cultivos de altura relacionados con los páramos se predice una disminución en la aptitud climática para el trigo, el melloco y la quinua en el Ecuador, mientras que la aptitud para la papa aumentaría ligeramente.

Si bien hay pocas evidencias empíricas del impacto del cambio climático en los cultivos andinos, la población los percibe claramente. Skarbo y van der Molen (2016) documentaron un cambio de 200–300 m en el límite superior de cultivo de maíz en Cotacachi. En un estudio sobre percepción del cambio climático en una población de páramo en Chimborazo se reportó que el mayor efecto percibido por los pobladores es el aumento del frío en las noches (heladas), calor en el día y una menor previsibilidad de las precipitaciones. Esto se traduce en cambios en los patrones de siembra y cosecha. El cambio en las épocas de lluvia ha provocado una reducción en el número de especies cultivadas y una mayor dependencia en la ganadería, con la ampliación de las zonas bajo pastos en los páramos (Segovia, 2013; Hofstede et al., 2015). En Cotacachi, otro estudio de percepciones sobre el cambio climático identificó una disminución en la cantidad de lluvia y un aumento de la temperatura que ha posibilitado el cultivo de maíz en zonas más altas. También se registró la presencia de nuevas plagas. Además, los cambios bruscos de clima promovieron una mayor incidencia de enfermedades fúngicas en los cultivos de papas (Rhoades, 2006; van der Molen, 2007). Leroy (2019) demostró cómo la percepción de los campesinos parameros sobre el cambio climático es un determinante de su comportamiento, especialmente de su capacidad de adaptación colectiva.

Impacto de cambio climático en la sociedad del páramo

La capacidad de adaptación y, por tanto, la resiliencia de las comunidades es diferente dependiendo de las dinámicas de acceso y uso de recursos disponibles. Esto incluye el acceso a capital social, conocimiento, tecnología y recursos financieros, y a la base de recursos naturales que se encuentra mediada por dinámicas institucionales, culturales, trayectorias de uso y ocupación del territorio, entre otros factores. Por ejemplo, Blackburn et al. (2022) documentan un ciclo de retroalimentación negativa entre pobreza, degradación de tierras y la agudización de la vulnerabilidad de las familias en los páramos occidentales de la provincia de Cotopaxi. La ausencia de prácticas tendientes a conservar o restaurar la base local de recursos se explica parcialmente por la asignación de tierras marginales para la producción agrícola a comunidades indígenas en el marco de la reforma agraria.

En general, entre más grande y diverso el territorio, mayor es la resiliencia de la población (Hofstede et al., 2014) porque los efectos del cambio climático tienen manifestaciones más diversas con una mayor diversidad geográfica. El proceso clave para que emerja esta resiliencia es la posibilidad y la capacidad de las familias o las comunidades para acceder a esta diversidad de recursos, mediante el cambio de vivienda y de ubicación de actividades productivas, mediada

por factores institucionales, normativos y culturales, entre otros (Segovia, 2013, Vallejo-Rojas et al., 2016). En el caso del páramo de Chimborazo (Segovia, 2013), la relativamente alta resiliencia es determinada por otro factor: la cercanía y buena accesibilidad a un polo local de desarrollo que permite a la población de páramo acceder a ingresos no agrícolas e independientes del cambio climático. Aquellas familias de pequeños productores dependientes económicamente de la actividad agropecuaria como único ingreso son las más vulnerables al cambio climático, mientras que familias con ingresos externos tienen mayor resiliencia (Betancourt, 2012; Postigo et al., 2012).

La migración temporal o permanente hacia centros urbanos ha sido una respuesta prevalente en las poblaciones andinas a las condiciones más difíciles para la agricultura y una brecha general e históricamente persistente de acceso a bienes y servicios básicos entre áreas urbanas y rurales (Postigo et al., 2008, Segovia, 2013). La migración hacia las ciudades para complementar el ingreso familiar, si bien no solamente es una consecuencia del cambio climático, también trae efectos adicionales a nivel social: en las comunidades, las tareas agrícolas quedan en manos de las mujeres y las personas de la tercera edad, lo que afecta las relaciones de género y la organización social (Segovia, 2013). En casos extremos de migración hacia el exterior, se observa que la capacidad de las comunidades de organizar respuestas concertadas para conservar o restaurar la base local de recursos (como el suelo y el agua) disminuye y se generan trayectorias de degradación sobre las cuales los efectos negativos del cambio climático se amplifican (Gray, 2009).

Jiménez (2011) construyó un índice cantonal de vulnerabilidad al cambio climático en el Ecuador; combinó variables sociales y ambientales, identificando 10 cantones vulnerables, entre los cuales hay cinco con importantes superficies de páramo (Guamote, Colta, Pujilí, Sigchos y Guaranda). Este análisis mostró un impacto económico negativo del cambio climático en el sector agrícola de subsistencia, incluyendo los cultivos de maíz y papa, cultivos importantes para la población de la alta montaña.

Adaptación al cambio climático

Necesidades de adaptación

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático define la capacidad de adaptación como la capacidad de un sistema —humano o natural— para ajustarse al cambio climático (incluida la variabilidad climática y los cambios extremos)

a fin de moderar los daños potenciales, aprovechar las consecuencias positivas, o soportar las consecuencias negativas. La capacidad de adaptación es la habilidad de una comunidad o ecosistema de ajustarse al cambio climático, mitigar los daños potenciales, hacer frente a las consecuencias y aprovechar eventuales oportunidades. Uno de los factores más importantes que determina la capacidad de adaptación de las personas, hogares y comunidades es el acceso y control que puedan tener sobre los recursos naturales, humanos y financieros.

A la vez de su vulnerabilidad ante los efectos del cambio climático, las comunidades rurales asociadas al páramo comparten un conjunto de estrategias y conocimientos tradicionales que les han permitido adaptarse a las condiciones difíciles que presenta el páramo para las actividades agrícolas y ganaderas. Originalmente, la ocupación de distintos pisos altitudinales y la extensión de dicho control vía mecanismos de intercambio permitían maximizar el acceso a la base de recursos (como los alimentos) y minimizar el riesgo de amenazas características de las zonas de montaña (como las heladas) (Murra, 1972; López, 2004). La cantidad y la diversidad de opciones geográficas para poder desarrollar una amplia diversidad de prácticas de uso del territorio, agrícolas y de manejo de agua hacen del páramo un espacio idóneo para la adaptación al cambio climático.

La capacidad de adaptación se puede desglosar en diferentes categorías (CARE²): capacidad material, económica, técnica, física y natural y socioorganizativa. Hofstede et al. (2015) demostraron que, en términos generales, la capacidad material de las personas en los sitios de páramo es relativamente baja: son propietarios de predios pequeños a medianos, tienen unos pocos animales de producción (máximo 20 cabezas) y poca gente tiene medios de transporte propio. Sin embargo, hay grandes diferencias entre diferentes zonas de páramo. Por ejemplo, en Carchi la capacidad material es relativamente positiva: la mayoría de los habitantes tienen terrenos propios de varias hectáreas y tienen varios animales entre vacas, chanchos y animales menores. En cambio, en San Juan (Chimborazo) predominan los predios pequeños, en diferente estado de conservación y generalmente a gran distancia entre ellos. Tienen animales de producción; normalmente unas pocas vacas y un número mayor de ovejas. Es notable que las mujeres tienen menor capacidad material: territorios más pequeños y generalmente la casa y el terreno no están a su nombre. En términos generales, y en línea con la capacidad material, la gente vive en condiciones económicas desfavorables. Se asume que, generalmente, están por debajo, y solo en los mejores casos, un poco por encima del nivel de

² www.careclimatechange.org/tk/integration/es/conceptosclave/capacidaddeadaptacion.html

un sueldo mínimo por mes. En los diferentes sitios de páramo en este estudio, la capacidad técnica para el manejo productivo y de conservación de páramo es una combinación de conocimiento clásico o más convencional de producción (con limitado uso de estrategias de innovación tecnológica) que coexiste con el conocimiento tradicional. El conocimiento sobre la producción es clásico o convencional en cuanto al uso de agroquímicos, fertilizantes, vacunas, sales y minerales. Sin embargo, la aplicación del conocimiento tradicional es amplia, pero limitada a temas como la planificación espacial de la siembra y la aplicación del calendario lunar.

Hofstede et al. (2015) evidenciaron en este estudio varios contrastes en la capacidad física natural entre los diferentes páramos, aunque generalmente, por su diversidad geográfica, fue positiva para la adaptación al cambio climático. Los habitantes del páramo, si bien no tienen terrenos muy grandes, generalmente los tienen distribuidos en varias parcelas a diferente altitud, lo que permite una diferenciación del uso. Además, en todas las zonas analizadas hay páramos de propiedad comunal o del Estado destinados a la conservación mediante diferentes estrategias. Algunas de las limitaciones identificadas para la adaptación fueron la gran distancia a los centros de servicios y la pobre calidad de la infraestructura (vías, agua potable, riego, telecomunicaciones). Finalmente, la capacidad socioorganizativa de los habitantes en el páramo es en general favorable, porque en muchos sitios hay una estructura local de representación de las personas (comuna, cooperativa o asociación) que brinda espacios de discusión, análisis y toma de decisiones. Además, este capital social ofrece oportunidades para mejorar las interacciones y la capacidad de negociación con las agencias públicas y privadas externas. Estos últimos dos aspectos de capacidad de adaptación (física-natural y socioorganizativa) configuran excelentes condiciones fundamentales para dos enfoques de adaptación ampliamente promovidos en las comunidades rurales: adaptación basada en ecosistemas (Munang et al., 2013; Ariza Montobbio y Cuvy, 2020) y adaptación basada en comunidades (Ayers y Forsyth, 2009; Murtinho, 2016).

Ejemplos de adaptación

Los procesos de adaptación de los socioecosistemas de páramo al contexto específico de clima, topografía, accesibilidad y procesos históricos de ocupación territorial incorporan estrategias de conservación, mitigación de impactos de actividades productivas, organización social para la gestión de recursos y diversificación de medios de vida, entre otras (Stadel, 2008). Aunque la evidencia empírica de estrategias específicas de adaptación al cambio climático

en páramos es aún escasa (Llambí y Garcés, 2021), existen indicios de que las comunidades locales responden de forma activa a sus impactos e interacciones con otras dinámicas de cambio social y ambiental (Hugell et al., 2015). Por ejemplo, Ariza y Cuvi (2020) documentaron un conjunto de experiencias de adaptación basada en ecosistemas (AbE) en el Ecuador continental. En una de ellas, ubicada en la cuenca alta del río Ambato, la comunidad local de Yatzaputzán creó un área de conservación de páramo de la cual se excluyeron los usos de la tierra agrícola y ganadera para proteger y recuperar las fuentes de agua. Esta estrategia requirió acuerdos internos mediante los cuales a las familias que tenían acceso a tierra en el área de reserva se les asignó áreas agrícolas en la zona baja de la comunidad.

Otro conjunto importante de acciones de AbE relevantes para la gestión de páramos gira alrededor de la necesidad de mantener acceso a una fuente segura de agua para las áreas urbanas andinas. Los fondos de agua han surgido como un conjunto diverso de arreglos financieros e institucionales que buscan conservar y recuperar áreas de páramo y sus funciones de regulación hídrica. Ejemplos como el Fondo de Páramos Tungurahua y Lucha contra la Pobreza (FMPLPT) y el Fondo Ambiental para la Protección del Agua (FONAG) integran, por un lado, una arquitectura financiera (por ejemplo, un fideicomiso mercantil) que dispone fondos a largo plazo para la gestión del páramo, y por otro lado, diversas estrategias de conservación y comanejo del territorio mediante acuerdos voluntarios de conservación, planes de manejo de páramo, restauración ecológica y educación ambiental (Capítulo 13). Una necesidad clave de investigación se enfoca en entender el impacto de estos modelos sobre la estructura y funcionamiento de los páramos, y su impacto efectivo en el desarrollo sostenible de las comunidades locales que permita disminuir la presión del uso de la tierra en los páramos.

Una dimensión adicional importante de procesos de adaptación en paisajes de páramo se relaciona con el nivel de articulación entre escalas y sectores de los arreglos de gobernanza vinculados a estas áreas. Dupuits et al. (2022) documentaron cuatro mecanismos principales que promueven una adaptación efectiva en los paisajes altoandinos. Primero, la existencia de procesos organizativos locales robustos que permiten adaptar herramientas de política pública nacional a los contextos ecológicos y sociales específicos. Segundo, la adecuada sistematización de la efectividad de prácticas locales (por ejemplo, de conservación y restauración de ecosistemas) que alimenten procesos nacionales de formulación de política. Adicionalmente, existe la posibilidad de incorporar conocimientos tradicionales locales en sistemas de observación y monitoreo a escalas más amplias. Finalmente, se menciona la posibilidad de mejorar las capacidades

científicas y técnicas de los gobiernos y las comunidades locales para alcanzar un proceso efectivo de coproducción de conocimiento.

Mitigación del cambio climático

Los principios básicos para la mitigación del cambio climático son evitar la emisión de gases de efecto invernadero, como CO_2 y CH_4 , y promover la captura de CO_2 atmosférico. En el páramo hay varias formas de evitar la emisión de gases. La más evidente es asegurar que se conserve la vegetación natural; esta muestra, en general, una alta asignación a biomasa aérea y retención de materia muerta en pie en su estructura (Llambí y Rada, 2019). En total, la vegetación del páramo puede tener hasta 45 toneladas de biomasa por hectárea, que es el equivalente a 10-20 % de un bosque tropical. Esto implica que se debe evitar que el páramo pierda esta vegetación por sobrepastoreo, quemas o conversión en zonas agrícolas. Sin embargo, el verdadero capital de carbono del páramo está bajo tierra. El típico suelo negro del páramo puede contener entre 200 y 1000 Mg C ha^{-1} . Estas cifras son aún más grandes para los suelos de las turberas de páramo, que consisten mayoritariamente de materia orgánica. De esta forma, el ecosistema de páramo contiene 5 a 10 veces más carbono por unidad de superficie que el bosque húmedo tropical, ya que este último tiene poca materia orgánica en el suelo. La materia orgánica bajo suelo no solo se puede perder por erosión, sino, y más frecuentemente, por el aumento de la descomposición que acelera la emisión de CO_2 . El aumento de la descomposición puede ocurrir por dos procesos: aumento de temperatura y menor humedad de los suelos perhúmedos. El drenaje de las turberas aumenta la descomposición igual que la sequía superficial del suelo mineral después del arado de la tierra. En estudios preliminares se ha reportado que los suelos de las turberas de páramo que han sido drenadas pueden emitir hasta un 30 % más carbono que las turberas intactas. El aumento de temperatura no se puede evitar ya que responde a un fenómeno global. Sin embargo, su efecto sobre el suelo se puede reducir asegurando el mantenimiento de una capa continua de vegetación nativa. De igual manera, gran parte de la pérdida de la humedad del suelo y de los humedales se puede evitar mediante buenas prácticas de uso de la tierra y conservación (como es la protección de áreas claves de humedales del pastoreo, que resulta en una disminución de la densidad aparente del suelo y un aumento en la capacidad máxima de retención de agua; Acevedo et al., 2019).

El metano, otro gas de efecto invernadero, se genera en el páramo de dos maneras: la fermentación entérica de ganado y en humedales en condición anaeróbica. Las emisiones de ganado son relativamente bien conocidas y, al

ser una zona de ganadería extensiva, el páramo sí genera metano, aunque en menor proporción que zonas con mayor densidad de ganado y de otro tipo de dieta (Gómez et al., 2009). Por esto, reducir la densidad de ganado en el páramo contribuye a mitigar los efectos del cambio climático de diferentes formas: reduce la pérdida de biomasa aérea, protege mejor el suelo y disminuye generación de metano por fermentación entérica. La generación de metano en humedales de páramo es un arma de doble filo ya que es probable que los humedales más protegidos (con nivel freático alto y constante) generen mayores emisiones de metano. Desafortunadamente, todavía existe poca información sobre este tema.

La segunda forma de mitigación es promover actividades que resulten en un aumento neto de biomasa en el ecosistema. Esto se hizo en los años noventa a través de procesos de forestación en el páramo bajo (Hofstede et al., 2002; Fehse et al., 2002). Sin embargo, se encontró que las plantaciones, principalmente de especies exóticas, si bien aumentaron la biomasa aérea a la vez indujeron una reducción del agua disponible en el suelo y, consecuentemente, generaron pérdidas de materia orgánica por el aumento de la descomposición. En otras palabras, lo que se secuestraba en los árboles, se perdía en el suelo. Las alternativas con especies nativas resultaron menos efectivas para ser aplicadas a gran escala. Por estas razones, y por cambios en la visión sobre la forestación en el páramo al principio del siglo XXI, se suspendieron los proyectos de forestación con fines de mitigación. Actualmente, se están explorando procesos de restauración del paisaje paramero que, si bien son más lentos y complejos, tienen el objetivo de aumentar el carbono tanto en la biomasa aérea como en el suelo. Finalmente, la restauración de turberas mediante el aumento del nivel freático ha resultado en un aumento neto de carbono y puede ser una forma de captura de carbono en la biomasa aérea (Hribljan et al., 2016; Suárez et al., 2022a y b).

Conclusiones

Este capítulo ha demostrado que el cambio climático ya es una realidad en los páramos: el aumento de temperatura ha estado asociado a cambios en la precipitación y al derretimiento de los glaciares. Ya se están notando también impactos sobre la composición florística. El impacto del cambio climático en la ecología afecta la hidrología del páramo. La sociedad paramera es la más afectada por estos cambios ya que el clima se ha vuelto menos predecible y es más difícil cultivar. Por esto, en muchas áreas se ha respondido abriendo nuevas áreas para el cultivo o la ganadería, lo que afecta aún más al frágil ecosistema. Las

sequías incrementadas han hecho que el páramo se vuelva más vulnerable a incendios, y así se inicia un ciclo negativo entre cambio climático e impacto social y ambiental.

Uno de los mayores desafíos es conocer los escenarios de cambio climático en el futuro. Estos escenarios dependen mucho del modelo de desarrollo socioeconómico que tendrá el mundo y, por tanto, del aumento de la temperatura promedio por las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos diferentes modelos tienen efectos variables en el clima del páramo por la complejidad geográfica y climatológica de los Andes ecuatoriales. Así, las diferentes proyecciones de los escenarios de cambio climático sobre los páramos no tienen una señal uniforme: puede llover más y puede llover menos, y la temperatura promedio puede aumentar, pero podría haber una mayor frecuencia de días fríos. Lo único consistente entre los modelos es una mayor duración y severidad de las épocas secas y más días con lluvias intensas en todos los páramos.

A la vez, el páramo es un paisaje por excelencia para programas de mitigación y adaptación. El páramo contiene mucho carbono almacenado en su densa vegetación y, especialmente, en sus suelos (más aún en el caso de las turberas de alta montaña). Conservar o restaurar el paisaje, con especial atención al carbono en suelo y turberas, es una herramienta excelente para evitar emisiones o capturar carbono atmosférico. También los sistemas agroforestales o silvopastoriles en los límites inferiores del páramo pueden apoyar en esta tarea. Pero el cambio es un hecho y la sociedad paramera debe adaptarse a la nueva situación. En esto también, por su diversidad natural y resiliencia intrínseca ante condiciones extremas, el paisaje paramero tiene amplias posibilidades de adaptación. Su población, que está acostumbrada y ha desarrollado una cultura única bajo estas condiciones extremas pero diversas, tiene una capacidad generada a lo largo de su historia para adaptarse. Esta adaptación se puede basar en una integración creativa del conocimiento endógeno y local con la innovación tecnológica. En particular, hay mucha necesidad de innovar en torno a las estrategias de adaptación y el desarrollo de nuevas tecnologías (por ejemplo, en campos como la agricultura y la ganadería climáticamente inteligentes), y en el fortalecimiento de los procesos de monitoreo socioambiental y el mejoramiento de los escenarios de cambio climático y los mecanismos de apoyo financiero a la gran diversidad de actores que coexisten en estos territorios únicos del trópico frío (academia, Estado, organizaciones comunitarias, cooperación, etc.).

—CAPÍTULO 13

CONCLUSIÓN: LO BUENO, LO MALO Y LO FEO EN LOS PÁRAMOS DEL ECUADOR

Robert Hofstede | Patricio Mena-Vásconez | Esteban Suárez Robalino

Vista del cerro Puntas desde el pucará de Quitoloma.
Fotografía: Robert Hofstede



Una nueva fotografía del páramo

Este libro presenta una fotografía de los páramos ecuatorianos en el tercer decenio del siglo XXI. Estamos en una época de crisis globales en términos ambientales, climáticos, epidemiológicos y políticos; esto produce desafíos sociales y económicos sin precedentes y que tienen implicaciones en la alta montaña ecuatoriana. A la vez, existen nuevos acuerdos globales y regionales ambientales, hay indudablemente una conciencia mayor, apoyo social genuino y más fondos que nunca en la historia para temas ambientales. Y en medio de este contexto con tantos aspectos negativos, pero con visos de esperanza, ¿cómo se ve esta fotografía de los páramos? A modo de conclusión, podemos ver que tiene cosas bonitas y feas, aspectos buenos y malos, pero sigue siendo un bioma fascinante que es cada día más importante para la realidad y el futuro del país.

Lo bueno

La biodiversidad, los servicios ecosistémicos y la población en los páramos ecuatorianos

La información recopilada en esta publicación ratifica lo espectacular que es el páramo. Su biodiversidad es alta y tiene más especies que cualquier otro bioma de alta montaña en el mundo (Smith y Cleef, 1988). Sin embargo, el mayor valor de la biodiversidad paramera no está en la riqueza de especies sino en su singularidad, es decir, en el gran número de especies que solamente ocurren allí (las endémicas), una diversidad de ecosistemas y una cantidad de formas de vida que coexisten en un espacio relativamente limitado.

Según el análisis de flora incluido en el Capítulo 4, se estima una cantidad de 1735 especies de plantas vasculares en los páramos ecuatorianos. Para poner esto en perspectiva, esto es más que toda la flora vascular de Flandes (región de Bélgica, con 1417 especies; van Landuyt et al., 2006) que tiene una superficie similar (1,3 millones de hectáreas), pero un clima mucho menos extremo que el de la alta montaña. Posiblemente más impresionante es la diversidad de áreas individuales de páramo. Los páramos del Parque Nacional Cajas, por ejemplo, cuentan con 666 especies de plantas vasculares. Solemos asociar el páramo con pastos en el medio de los cuales encontramos florecitas de la familia de las compuestas; de hecho, las Asteráceas y las Poáceas son la primera y la tercera familia más diversa de plantas del páramo. Lo que puede sorprender es que

el páramo sea también tierra de orquídeas, ya que es la segunda familia más diversa, con 173 especies, inclusive por encima de los pastos. De todas las especies que crecen en los páramos, el 40 % se encuentra solamente en el Ecuador, formando complejas comunidades que cambian muchísimo de norte a sur y a lo largo de las gradientes altitudinales.

El Capítulo 5 representa el primer compendio completo sobre la fauna de páramo. En términos generales, este capítulo muestra que, igual que la flora, la fauna del páramo disminuye con la altitud, al mismo tiempo que aumenta el endemismo en prácticamente todos los grupos taxonómicos. En el caso de los mamíferos, entre esas especies especialistas se encuentran animales emblemáticos como el oso andino, que solamente se encuentra en ecosistemas andinos de América del Sur. Asimismo, entre los taxones que por su tamaño son menos visibles, hay muchos especialistas, incluyendo decenas de especies de insectos y varias especies de herpetofauna (anfibios y reptiles) que solamente se encuentran en el páramo. Este patrón se hace aún más notable entre los peces: aunque existen muy pocas especies por encima de los 3000 m de altitud, una de ellas tiene una distribución totalmente restringida a una sola laguna en Carchi. Finalmente, tanto plantas como animales presentan el fenómeno de 'evolución convergente': especies de grupos muy diferentes, han adquirido atribuciones similares como adaptación al ambiente extremo paramero. Esto incluye la pubescencia de hojas y forma de rosetas gigantes en plantas, y la baja fecundidad y mayor longevidad de animales.

Además de la confirmación de la gran singularidad de la fauna en el páramo, los reportes de las últimas décadas también han traído algunas buenas noticias sobre el estado de sus poblaciones: según el último censo, la población de cóndores está aumentando¹ y, considerando el aumento de avistamientos publicados ampliamente en redes sociales,² lo mismo parecería estar ocurriendo con las poblaciones de oso y venados, por lo menos en los páramos que circundan a Quito. Aunque hacen falta más estudios, estos incrementos podrían estar relacionados con una mayor efectividad de las áreas protegidas, una reducción de cacería y un aumento de calidad de hábitat en ciertas zonas del país.

El conocimiento de la ecología del páramo ha avanzado bastante en las últimas décadas. La imagen limitada del páramo como un ecosistema abierto de pajonales está dando lugar a una visión más compleja en la que el páramo se entiende como un mosaico de ecosistemas (pajonales, chaparros, turberas, bosques, zonas periglaciares, humedales) que no solo se diferencian en la

¹ <https://www.eluniverso.com/noticias/2020/07/07/nota/7898427/condores-censo-2020-poblacion-silvestre-ecuador/>

² Por ejemplo, <https://www.youtube.com/shorts/wxO-5ab-8HM>

composición de sus comunidades, sino que pueden tener patrones ecológicos y ecosistémicos fundamentalmente diferentes (Capítulo 6). Si bien tradicionalmente las descripciones se han enfocado en los típicos páramos de pajonales y los bosques andinos, ahora entendemos más sobre los otros ecosistemas del páramo, incluyendo aspectos sobre su funcionamiento y dinámica particulares, y sobre las complejas interacciones entre los aspectos bióticos y abióticos como suelo, el clima y la hidrología. De igual manera, la diversidad de especies varía ampliamente entre los tipos de vegetación, dando lugar a redes tróficas notablemente diferentes. En particular, este capítulo resume los importantes avances de los últimos años en nuestra comprensión de la ecología de las turberas de páramo, la dinámica del gradiente entre bosques andinos y páramos, y la ecología de las zonas periglaciares.

La interacción entre la biodiversidad, los suelos y el agua ha resultado en lo que posiblemente es lo más bonito del páramo: sus servicios ecosistémicos. Las particularidades de los suelos (especialmente de los volcánicos), el clima frío y el altísimo contenido de agua han dado lugar a una lenta descomposición de restos vegetales en el suelo y las turberas, convirtiendo al páramo en un paisaje clave para la mitigación de los efectos del cambio climático. Los suelos bien drenados de los pajonales, por ejemplo, pueden contener entre 100 y 200 MgC ha⁻¹ mientras que las turberas pueden almacenar más de 3000 MgC ha⁻¹ (Capítulos 2 y 6). Gracias al avance en el conocimiento sobre el clima, sobre la formación de los suelos minerales —especialmente los formados en cenizas volcánicas— y sobre la dinámica de materia orgánica en suelos y turberas, ahora comprendemos mucho más sobre el comportamiento del agua en el páramo y sobre las variables ambientales que controlan este servicio ecosistémico en escalas espaciales muy reducidas. Varios estudios recientes, por ejemplo, han mostrado que la precipitación en el volcán Chimborazo pasa de apenas 145 mm/año en el flanco occidental, a 900 mm/año en el suroriental, y que el 30 % de toda la lluvia en el páramo cae en forma de llovizna, mientras que la neblina aportaría cerca de un 22 % (Capítulo 3).

Los avances recientes en el estudio de la hidrología también destacan el importante papel de la vegetación del páramo como almacenador de agua. Se estima que entre 80 y 100 % del agua es interceptada por vegetación. La capacidad máxima de almacenamiento de agua en las acículas del pajonal es de 2 mm. Esta alta capacidad de intercepción, unida a la lluvia relativamente constante durante todo el año y a las características típicas de los suelos del páramo, hacen que estos tengan una excelente capacidad de infiltración y almacenamiento de agua. Aunque este patrón ya era muy conocido, los estudios de las últimas décadas en el Ecuador le han puesto cifras. Así, ahora

sabemos que un páramo puede almacenar entre 300 y 600 mm de agua, o el equivalente de la lluvia de un medio año. El balance hídrico (o sea, la fracción de toda el agua que entra al sistema por la lluvia y que sale en las quebradas y ríos) llega a cifras de entre 30 y 50 % en los páramos del norte, y hasta 70 % en el sur del país. Estudios con isótopos han demostrado el importante rol de los humedales en la regulación hídrica y la relativamente baja contribución (en comparación con otros biomas) del agua de vertientes (es decir, el agua almacenada entre las rocas).

Este libro destaca nuevamente otro de los elementos más positivos de los páramos ecuatorianos: su población. A pesar de los desafíos de vivir en un ambiente extremo y de una histórica desventaja social y económica, esta población sigue desarrollándose, adaptándose y organizándose. En el Capítulo 8 se presenta una reseña detallada de las principales interacciones humanas con el territorio del páramo y se resalta cómo esta historia social ha resultado en la diversidad de visiones, conceptualizaciones y valoraciones que tienen los distintos actores sobre cuáles deberían ser los usos y los no usos del páramo, quiénes deberían tener acceso a los recursos y los beneficios, y, en definitiva, quiénes deberían tomar las decisiones sobre ellos.

La convivencia histórica ha dado lugar a una interacción entre paisaje y uso del territorio, influyéndose mutuamente. Durante siglos, la población humana ha construido la infraestructura que ayudó al transporte de personas y agua, y ha desarrollado diversas prácticas para la producción de alimentos (véanse los Capítulos 9, 10 y 11). Debido a esta historia de interacciones socioambientales, durante los últimos treinta años ha cobrado importancia la visión de los páramos como paisajes culturales, socioecosistemas altoandinos o territorios hidrosociales. Esta visión se ha desarrollado no solo a nivel académico, sino en las políticas y visiones locales y nacionales de desarrollo, así como en la percepción de la gente. Estos ecosistemas han sido reconocidos especialmente como la fuente principal de agua para las grandes y medianas urbes, la agricultura y la hidroenergía, y a la vez como el territorio ancestral de comunidades campesinas e indígenas que se han enfrentado históricamente a estas demandas externas.

Avances en la conservación y el desarrollo sostenible de los páramos ecuatorianos

En comparación con otras publicaciones generales sobre el páramo, como Mena-Vásquez et al. (2001, 2011) y Hofstede et al. (2003, 2014), este libro demuestra lo mucho que nuestro conocimiento sobre el páramo ha incrementado en las

últimas décadas. Si bien todavía nos falta mucho por conocer, es evidente que la información sobre biodiversidad y ecología es cada vez más completa y coherente, y forma una buena base académica para guiar decisiones del manejo en el páramo (Capítulos 4, 5 y 6).

En áreas temáticas donde hasta hace poco existía muy poca información, como hidrología, cambio climático, sociedad, minería e infraestructura, se ha avanzado mucho. El ejemplo sobresaliente es la hidrología del páramo: en una síntesis sobre el estado de la investigación hidrológica en el páramo, Buytaert et al. (2006) identificaron varias brechas de conocimiento. En el Capítulo 3 se demuestra que, durante la última década, se han llenado varios de esos vacíos de conocimiento, incluyendo la dinámica de la lluvia y la niebla, la evapotranspiración, el movimiento de agua en el suelo, los procesos de generación de escorrentía, y el almacenamiento de agua. De igual manera, gracias a una atención global al cambio climático y muchos esfuerzos nacionales apoyados por la cooperación internacional en respuesta a acuerdos multilaterales —como las comunicaciones nacionales y el compromiso determinada a nivel nacional (NDC)— se ha avanzado mucho en el conocimiento sobre la manifestación de cambio climático en el páramo. En el Capítulo 12 se evidencia la gran exposición del páramo y la vulnerabilidad de su sociedad a los efectos del cambio climático, así como los efectos de este fenómeno sobre la biodiversidad, la hidrología, y la capacidad del ecosistema para almacenar carbono orgánico en el suelo. Aunque suene paradójico, mucha de la información que se ha generado sobre los escenarios climáticos ha evidenciado que todavía no sabemos mucho sobre el tema. Esta conclusión es clave porque implica que las políticas públicas y privadas para el manejo del páramo deberían estar basadas en un principio de precaución.

Aunque faltan mucha información cuantitativa, los Capítulos 8 y 9 presentan una enorme riqueza de conocimiento nuevo sobre los procesos históricos, sociales, de uso de la tierra y ecología política, y sobre cómo estos procesos han afectado la percepción de los diferentes actores y su interacción con el paisaje del páramo. A pesar de la amplia preocupación, incluyendo tensiones sociales, sobre el crecimiento de la minería y la proliferación de infraestructura en el páramo, los Capítulos 10 y 11 sobre minería e infraestructura son los primeros trabajos publicados en este tema. Estos análisis complejos sobre la sociedad y los proyectos enfocados en el desarrollo económico deben cambiar la visión clásica, y a veces limitada, de considerar al páramo únicamente como un bioma natural: para desarrollar una gestión efectiva e incluyente, se debe entender la dinámica interacción entre sociedad, economía, política, derechos y ecología.

Las últimas décadas también han visto una serie de iniciativas positivas para la conservación de los páramos. Se han generado acuerdos, leyes y decretos a nivel internacional y nacional que buscan asegurar la buena gestión de los páramos (Capítulo 7). Si bien su aplicación, coordinación y alineamiento son una tarea pendiente, no hay duda de que el marco legal e institucional ha mejorado. Esto incluye la inclusión del páramo en la constitución como ecosistema frágil y, subsecuentemente, las disposiciones en el Código Orgánico del Ambiente y en la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua y sus respectivos reglamentos sobre la conservación, manejo sostenible y restauración del páramo, así como y las responsabilidades institucionales para ejecutarlas. De la misma manera, la aprobación y aplicación de la Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales y el Acuerdo de Escazú sobre el acceso a la Información, la Participación Pública y el Acceso a la Justicia en Asuntos Ambientales, tienen relevancia para la gestión de páramos.

Varias entidades públicas han iniciado programas ambientales que tienen como objetivo la conservación del páramo. Por ejemplo, desde el año 2000 se han incorporado diez nuevas áreas en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas que incluyen páramo y, ahora, un total de casi 673 000 ha de todos los páramos están en el SNAP (Tabla 13.1). Adicionalmente, cuatro reservas de la biosfera, una categoría reconocida internacionalmente, incluyen ecosistemas de páramo. Después de que la convención sobre humedales de importancia internacional (Convención Ramsar) reconociera en el 2002 la importancia de los humedales altoandinos como ecosistemas estratégicos, el Ecuador declaró seis sitios Ramsar que incluyen un total de 112 000 ha de páramo (Capítulo 7). Otro programa emblemático nacional es el Programa Socio Bosque que tiene un capítulo específico para el páramo, con sus propias reglas e incentivos. Este programa ha creado casi 400 áreas protegidas *de facto*, sumando 82 000 ha donde los propietarios (individuales o comunitarios) reciben un incentivo en cambio de la conservación (Figura 13.1). Finalmente, 12 Áreas de Protección Hídrica, creadas en los últimos años, incluyen más de 40 000 ha de páramo (Figura 8.5). El proyecto nacional de restauración de paisajes también está desarrollando un capítulo específico de restauración de paisajes altoandinos, enfocando en el páramo. Finalmente, la declaración de parte de la Asamblea Nacional del día nacional de páramos (23 de Junio) y, asociado a esto, el actual desarrollo del Plan de Acción Nacional para la Conservación, Restauración y Uso Sustentable de los Páramos son muy destacables (véanse los Capítulos 1 y 7).

Tabla 13.1 Superficie de páramo incluido en diferentes figuras de conservación.

Figura de conservación	Superficie de páramo (ha)	Superficie neta (traslape con otras figuras sustraído; ha) ³
Sistema Nacional de Áreas Protegidas	672 009	672 009
Programa Socio Bosque	82 052	72 253
Sitios Ramsar	277 280	112 212
Bosque y Vegetación Protectora	304 337	269 256
Área de Protección Hídrica	42 615	34 394
Total		1 187 124

Fuente: Dirección de Información Ambiental y del Agua, MAATE

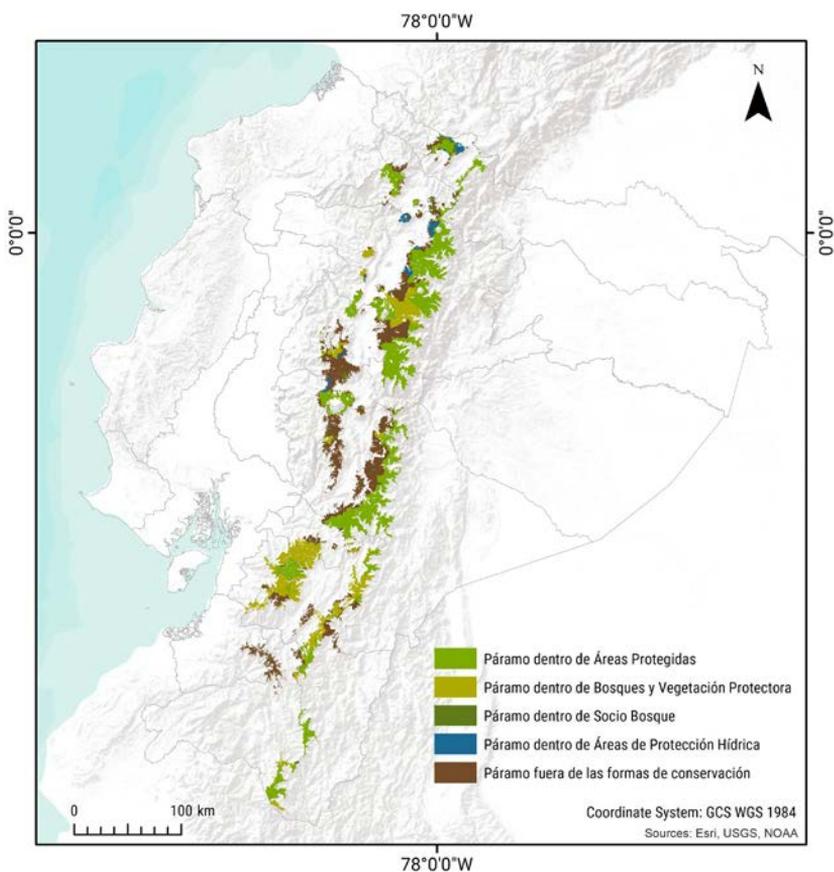


Figura 13.1 Relación de la extensión de páramos dentro y fuera del Sistema Nacional de Áreas Protegidas. Dirección de Información Ambiental y del Agua, MAATE

³ Hay áreas de páramo dentro de varias figuras de conservación. Para calcular el total de páramo en alguna forma de conservación se presenta la superficie neta, es decir, aquella expresada como hectáreas de páramo sustrayendo el traslape con otras figuras.

Otra herramienta importante para la conservación de los páramos ha sido el desarrollo de iniciativas público-privadas para la creación de fondos de agua en áreas de páramo, reconociendo la fundamental relación entre el páramo y los recursos hídricos utilizados por la sociedad. El primero de todos, inclusive a pionero a nivel global, es el fondo de agua para Quito (FONAG), al que luego se sumaron los fondos en Tungurahua (enfocando 100 % al páramo) y otros en el Austro Ecuatoriano (Capítulo 8).

Las entidades públicas, las organizaciones no gubernamentales nacionales, las universidades y los actores sociales, en colaboración con la cooperación internacional, han ejecutado una serie de proyectos para la conservación y el desarrollo sostenible en los páramos del Ecuador. Mucho del conocimiento presentado en este libro fue generado en el contexto de esos proyectos. Es imposible presentar una lista completa de estas iniciativas; nos limitamos a algunos ejemplos de proyectos que han tenido un impacto en la forma en que el país está considerando y gestionando sus páramos.

En la segunda mitad de los años 1990, la Embajada de los Países Bajos financió una serie de proyectos que incluían la conservación de páramos. Entre esos proyectos está el proyecto *Conservación de los páramos del Ecuador* (Proyecto Páramo; Universidad de Ámsterdam, EcoCiencia e Instituto de Montaña; 1998-2002), el primer proyecto dirigido específicamente al páramo y ejecutado a nivel nacional. Este proyecto logró conectar la conservación del páramo con programas de desarrollo rural e involucrar a las comunidades en los esfuerzos de conservación de páramos. Además, en el contexto de este proyecto se estableció el Grupo de Trabajo en Páramos (GTP), un plataforma abierta y participativa de intercambio y colaboración entre diversos actores de los páramos del Ecuador.

El Proyecto Páramo Andino (2002-2006; financiado por GEF, vía el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, y ejecutado por CONDESAN en colaboración con EcoCiencia, el Instituto Alexander von Humboldt, la Universidad de los Andes en Mérida y las Universidades de Ámsterdam y Wisconsin) fue el primer proyecto regional entre los cuatro países andinos con páramo. Esta iniciativa logró una visión transfronteriza y la colaboración entre países, incluyendo una agenda regional emitida por la Comunidad Andina. Además, fue el primer proyecto que incluyó los páramos del norte de Perú, hasta entonces invisibles para la cooperación internacional.

El proyecto *Comunidades de los páramos* (financiado por el Ministerio de Asuntos Exteriores de Finlandia y ejecutado por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), Tropenbos Internacional y el Instituto Alexander Von Humboldt en Colombia, el Instituto de Montaña en Perú y la

Corporación Grupo Randi Randi y Ecopar en el Ecuador) fue ejecutado entre en la segunda década del siglo XXI. Este proyecto fue el primero en incluir la dimensión de adaptación al cambio climático en el páramo y se enfocó específicamente en su dimensión social, incluyendo género en el páramo.

Otra iniciativa regional, con los mismos actores institucionales pero financiada por la Unión Europea, fue el proyecto *Páramos: Biodiversidad y Recursos Hídricos en los Andes del Norte* (2016-2021). Este, también ejecutado entre Colombia, Ecuador y Perú, enfatizaba la gestión institucional local en la gobernanza de los recursos hídricos originados en el páramo.

El Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN) ha ejecutado varios proyectos regionales, incluyendo al Ecuador, que conectan el tema de páramo con cambio climático y manejo de recursos hídricos. El proyecto *Multiplicando beneficios ambientales y sociales en ecosistemas altoandinos* (EcoAndes, financiado por el GEF; 2015-2019) logró, entre otras cosas, cuantificar y monitorear carbono en ecosistemas altoandinos e implementar iniciativas piloto de restauración. El programa de Adaptación al Cambio Climático en Montañas (financiado por la Agencia Suiza para el Desarrollo, actualmente en desarrollo) busca aumentar la resiliencia y la capacidad de adaptación al cambio climático de las comunidades de montaña en todo el mundo, incluyendo los Andes en el Ecuador. En la misma línea, CONDESAN está ejecutando un proyecto GEF (implementado por FAO) sobre la neutralidad de la degradación de la tierra, que busca vincular el tema de páramo con degradación, restauración y adaptación al cambio climático.

Desde la década de los noventa, la cooperación técnica alemana GIZ ha desarrollado una serie de proyectos en la Sierra central dedicados específicamente a la interfase entre el desarrollo rural sostenible y el manejo de los recursos naturales. Debido a que en esta zona el páramo es prácticamente el único ecosistema natural remanente, su manejo tiene una relevancia particular como herramienta para el mejoramiento de la calidad de vida de las poblaciones locales. Estos programas incluyen, entre otros, Gestión Sostenible de Recursos Naturales (GESOREN, 2004-2013), el programa de cambio climático, biodiversidad y desarrollo sostenible (Procambio, 2013-2020) y el actual Programa de Conservación y Uso Sostenible de Ecosistemas de Montaña (Programa Montañas). Estos proyectos han obtenido muchos resultados positivos, especialmente en el apoyo a las comunidades mediante el desarrollo de cadenas de valor para productos agrícolas sostenibles de la alta montaña y el apoyo a gobiernos locales en planificación ambiental.

Este aumento en el número de actividades e iniciativas demuestra que han crecido tanto el conocimiento como el interés en la importancia del páramo,

lo que se ha reflejado también en un aumento de los niveles de financiamiento para proyectos en estos ecosistemas. Sin embargo, el carácter del financiamiento también ha cambiado en las últimas décadas: mientras en gran parte de las décadas 1990 y 2000 la cooperación bilateral de varios países fue una fuente importante de recursos, ahora este apoyo está limitado prácticamente a Alemania, Suiza y la Unión Europea. En cambio, la cooperación multilateral, especialmente con financiamiento del fondo para el medio ambiente mundial (GEF, por su sigla en inglés) ha aumentado. También es evidente que los fondos públicos, gestionados por el Ministerio de Ambiente y los GAD, han aumentado. El financiamiento mixto, como son los fondos de agua, es una nueva modalidad que actualmente también incluye fondos privados de empresas interesadas en el agua (como Cervecería Nacional y Tesalia) o con objetivos de responsabilidad social (como General Motors y Prohubanco).

Otro factor clave que ha contribuido a una mejor gestión del páramo es la colaboración entre personas, instituciones públicas y organizaciones sociales. Si bien la coordinación interinstitucional en temas de gestión ambiental es un desafío para el éxito de muchos procesos, el páramo ecuatoriano ha tenido una experiencia única en el Grupo de Trabajo en Páramos (GTP; Mena-Vásquez et al., 2011). Esta plataforma informal, abierta y transparente funcionó entre 1998 y 2010. Aunque no se concibió más que como un espacio para intercambiar información y debatir temas relacionados con el páramo y publicar el resultado de estos debates, se generó espontáneamente un espacio de contacto entre personas y organizaciones, alineación de actividades, generación de proyectos e incluso inspiración para la creación de política pública. A partir del ejemplo de GTP en el Ecuador se formaron varios grupos similares en Colombia y se generó el Grupo Páramo a nivel andino (Hofstede y Mujica, 2002) que fue instrumental para la colaboración andina en temas de páramo. Por diferentes razones, el GTP dejó de funcionar en la década de los dos mil diez, pero en el 2022, con apoyo de varias organizaciones de cooperación y basado en la buena experiencia del GTP, se creó la Minga de la Montaña como una comunidad de práctica (CdP) multiactores y multiescala, planteada como un esquema innovador que genera espacios independientes que aportan a la gestión del conocimiento de los paisajes de montaña en el Ecuador.⁴ Entre otras tareas, la Minga de la Montaña quiere articular actividades de diferentes instituciones públicas y organizaciones de la sociedad civil, conectar lo local con lo nacional y apoyar el desarrollo de política pública.

⁴ <https://www.mingadelamontana.org/>

Lo malo: amenazas a la integridad ecológica y social de los páramos

La imagen de los páramos del Ecuador que presentamos en este libro también tiene aspectos menos alentadores: a pesar de que el país sigue su camino de desarrollo económico, tecnológico y social, y de que hay una creciente conciencia ambiental entre la población, las amenazas al páramo no han cesado. En las últimas dos décadas algunas presiones han mermado, por ejemplo, las plantaciones de especies forestales exóticas y, aparentemente, los incendios masivos y frecuentes, y la cacería en ciertas regiones. Pero, al mismo tiempo, hay presiones que están en aumento y que dejan una mancha fea sobre nuestra fotografía del páramo.

Las amenazas 'clásicas' a la integridad ecológica y social del páramo son bien conocidas: la ganadería extensiva y la agricultura dan lugar a la pérdida o deterioro de la cobertura vegetal, la desaparición de la fauna, la compactación y erosión de suelos, la pérdida de capacidad de almacenamiento de agua y la contaminación de fuentes hídricas (Capítulos 2-6). Pero, además de estas amenazas, en estas páginas se recogen nuevos problemas socioambientales que afectan la integridad ecológica y humana del páramo. Por ejemplo, ya es notable el efecto de especies introducidas como el *Polylepis racemosa*. Aunque esta especie originaria de Perú hasta hace poco fue promovida como alternativa para la reforestación y agroforestería en los páramos, ahora se sabe que podría formar híbridos con especies nativas del mismo género, deteriorando el acervo genético de las poblaciones locales. Además, estos árboles de rápido crecimiento transforman el paisaje, se expanden sobre áreas que no eran bosques originalmente y podrían tener consecuencias negativas en la regulación hídrica, la conservación de la biodiversidad y el almacenamiento de carbono. Otro problema similar es la trucha, que podría haber desplazado a por lo menos 20 especies de peces nativos y anfibios locales.

Otro fenómeno estudiado más recientemente es el efecto de canales de drenaje en las turberas de páramo. Al desarrollarse en áreas planas con mucha agua, las turberas son sitios propicios para el desarrollo de la agricultura y la ganadería. Sin embargo, para permitir su utilización, la gente suele cavar zanjas que drenan las turberas, eliminando así el exceso de agua del que depende su funcionamiento ecológico. Como resultado de estos drenajes, las turberas se convierten en fuentes de CO₂ hacia la atmósfera, y pierden su capacidad de almacenar carbono y agua (Capítulos 3 y 6).

El Capítulo 9 analiza la forma en la que el desarrollo económico, político y tecnológico a gran escala ha afectado la realidad del páramo. El sistema de monocultivo de papas, asociado a la ganadería intensiva, es un resultado de las tendencias

del mercado y la mecanización agrícola que ha resultado en sobrepastoreo, uso indiscriminado de fertilizantes y pesticidas, y una degradación progresiva de las zonas altas. De igual manera, la nueva industrialización de la zona rural a altitudes menores (por ejemplo, la floricultura de exportación) ha cambiado la economía y sociedad locales, afectando drásticamente el uso del páramo. Esto ha causado una pérdida de usos tradicionales de la tierra basados en la agricultura familiar y la producción diversa y más sostenible. Finalmente, el Capítulo 8 muestra la forma en que las políticas y las iniciativas de gestión de agua y conservación de páramo, pese a ser bien intencionadas, podrían dar lugar a conflictos y mayor marginalización de la población de páramo, como resultado de la falta de inclusión social y participación local durante su diseño e implementación.

Debido a que los biomas de alta montaña son específicamente vulnerables a los efectos del cambio climático, este fenómeno es, sin duda, una de las amenazas que genera mayor preocupación en el páramo (Capítulo 12). Las temperaturas más altas y variables y las alteraciones en los patrones de precipitación afectan a la biota nativa de los páramos; muchas especies suelen tener nichos climáticos estrechos y son, por lo tanto, muy vulnerables al calentamiento y la pérdida de hábitat. Esto genera, a su vez, cambios en la composición y el funcionamiento de los ecosistemas y afecta procesos como la productividad, la evapotranspiración, la descomposición y las tasas de mineralización que afectan, a su turno, la hidrología, el almacenamiento de carbono, la estabilidad del suelo y la biodiversidad de los ecosistemas. De manera similar, los regímenes de temperatura cambiantes afectan la distribución, la salud y la productividad de los cultivos y el ganado, y promueven tanto nuevas plagas, como la expansión de los nichos de especies invasoras.

Los efectos del cambio climático global exacerban el impacto directo de las prácticas inadecuadas de uso de la tierra y de planificación económica. En regiones con altas tasas de transformación de los ecosistemas, agotamiento de la capacidad productiva de los suelos y escasez de agua, estos efectos pueden ser aún mayores bajo escenarios del cambio climático. Además, los efectos del cambio climático agregan una dimensión adicional a las crisis sociales y económicas relacionadas con el medio ambiente. Lo que es válido para el ecosistema, también lo es para las comunidades: la sociedad de la alta montaña es más vulnerable ante los efectos del cambio climático que la población en general, y esto está dando lugar a cambios de medios de vida y a un abandono de la agricultura que se asocia a una migración temporal o permanente hacia las ciudades o el exterior.

Una de las actividades que ha causado mucha preocupación en el páramo es la minería. Esta actividad es relativamente reciente y no fue sino hasta el año 2007 que la minería a gran escala fue considerada como una actividad

estratégica para el desarrollo económico y social del país. El inventario presentado en el Capítulo 10 muestra casi 800 concesiones mineras de oro en la región Andina ecuatoriana, de las cuales la gran mayoría (637) están en Loja y Azuay. Aunque Pichincha, Carchi e Imbabura tienen una menor cantidad de concesiones, la mayoría de estas son de gran minería. De los cinco proyectos mineros a gran escala considerados estratégicos para el país, tres se localizan en zona de páramo; el 7,5 % de todos los páramos del país (113 836 ha) está en concesión de minería metálica y, en total, más del 28 % del páramo del país podría estar afectado de alguna manera por la actividad minera.

Aunque hay todavía poco conocimiento de los posibles impactos de la minería en el Ecuador, hay evidencia de otras regiones (especialmente Perú) que demuestra los principales impactos derivados de la minería a cielo abierto. En general, este tipo de minería representa un impacto irreparable sobre el páramo ya que requiere la remoción total de la cobertura vegetal y el suelo, además de la apertura de caminos, movimiento de tierras y desvío de los cursos naturales de agua. Desde este punto de vista, los impactos de la minería a cielo abierto sobre la biodiversidad y los servicios ecosistémicos del páramo son tan dramáticos que representan la eliminación efectiva del ecosistema. Adicionalmente a estos impactos directos, la minería a cielo abierto también genera emisión de polvo a la atmósfera, ruido y contaminación del agua originada en los campos de lixiviación asociados a las minas. Además de la afectación al recurso hídrico, estas actividades impactan en otros servicios ecosistémicos relacionados con la biodiversidad y la captura y almacenamiento de carbono.

Otro aspecto que, desde muchos puntos de vista es considerado negativo en un paisaje natural del páramo, es la infraestructura creada por la población. El Capítulo 11 es el primer análisis sobre los tipos de infraestructura presentes en el páramo y los principales problemas asociados a ellos. El inventario de obras presentes en el páramo de Ecuador demuestra que la infraestructura de mayor extensión y expansión corresponde a las obras de captación, regulación y transporte de agua (canales, embalses y trasvases), seguida de caminos y vías, torres de electricidad, casetas de control para turismo y piscinas para acuicultura. Inclusive dentro de las áreas protegidas hay presencia de infraestructura de agua para consumo humano y riego, infraestructura vial (incluyendo varias carreteras principales) y turística, todas ellas en aparente contradicción con la principal función de conservación de estas áreas.

La infraestructura ha afectado al páramo de diferentes maneras. Por la naturaleza de la implantación de la infraestructura en el páramo, es innegable que se produce un impacto sobre todo el ecosistema. La construcción de estas obras está asociada con impactos como la remoción de vegetación y suelo, y la

pérdida de la conectividad en el ecosistema. En el caso de infraestructura vial, el efecto indirecto es el aumento de tráfico y presencia humana en las áreas naturales, con los efectos negativos que esto puede conllevar. En los ecosistemas acuáticos, la proliferación de infraestructura construida sin criterios multidisciplinarios ha dado lugar a desviación o eliminación de caudales, cortes de flujo superficial y subterráneo, drenaje de turberas, compactación del suelo, erosión con aporte de nutrientes y minerales, represamiento de ríos, e introducción de especies exóticas para la acuicultura.

La infraestructura humana en el páramo también puede representar oportunidades (Capítulo 11). Al fin y al cabo, la infraestructura de agua asegura que la sociedad pueda aprovechar del servicio ecosistémico principal del páramo: aparte de que el agua potable de la gran mayoría de población andina en el Ecuador es capturada en los páramos, la superficie de riego que es abastecida por este ecosistema alcanza las 613 000 ha y representa cerca del 27 % del total de la superficie regada nacional. Finalmente, las carreteras, y las casetas de control y alojamiento en el páramo brindan otras oportunidades de convivencia entre naturaleza y cultura; todo esto demuestra que el problema no es la infraestructura en sí misma, sino la forma en cómo esta es planificada, instalada y manejada.

Lo feo: hay muchas buenas iniciativas y capacidades institucionales, pero falta su coordinación

Todos los capítulos de este libro sugieren que, aunque hemos avanzado en conocimiento, conciencia y acciones positivas para el páramo, el bioma sigue experimentando fuertes amenazas, mientras que, como sociedad, no logramos plasmar nuestro derecho a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado. La consolidación de este derecho requiere el manejo sostenible de los páramos. Específicamente, aunque existe un complejo y aparentemente completo marco legal, hay varias contradicciones entre leyes y regulaciones (Capítulo 7). De igual manera, los roles y responsabilidades de las instituciones públicas no están claras y existen vacíos y duplicaciones entre las autoridades nacionales y locales encargadas de la gestión del agua, la agricultura y los ecosistemas.

Otro problema fundamental es que el nivel de aplicación de la legislación es bajo: pocos de los instrumentos incluidos en el reglamento del Código Orgánico del Ambiente, entre ellos sobre planes de manejo o incentivos ambientales, están siendo aplicados. En la práctica, las declaraciones positivas, como la de “ecosistema frágil”, los derechos de la naturaleza y el derecho de la población a vivir

en un ambiente sano no han logrado asegurar la conservación del páramo; a veces el propio Estado es el que promueve iniciativas de “desarrollo económico” que van contra la integridad del bioma paramero. Esto incluye proyectos de minería a cielo abierto, infraestructura mal planificada y agroindustria (Capítulos 9 a 11), con permisos otorgados por diferentes organismos públicos.

Igual de malo que el hecho de que el propio Estado ecuatoriano desarrolla proyectos contradictorios a su mandato de conservar el páramo es la falta de control de las actividades ilegales. El capítulo 7, de análisis legal e institucional demuestra la falta de capacidad institucional y el capítulo de minería evidencia que, si bien la minería legal es un desafío, un problema probablemente más grande es la minería ilegal. Se nota que la infraestructura en sí misma no es el problema, sino más bien la forma en que es construida y manejada (Capítulo 11). Finalmente, las tendencias complejas de gobernanza, política pública y diferencias de poder en la sociedad han dado lugar a un profundo desequilibrio social que también afecta intensamente la integridad del socioecosistema (Capítulos 8 y 9).

A nivel de capacidades personales e institucionales para manejar los páramos, se ha avanzado mucho y este libro incluye muchos ejemplos de cómo manejar flora, fauna, suelos y agua; hay experiencias de conservación *in situ*, control de especies invasoras, creación de corredores y restauración de paisajes. También hay varias experiencias de adaptación y mitigación del cambio climático, muchas de ellas emprendidas por las propias comunidades campesinas e indígenas en el ecosistema. Sin embargo, la aplicación a escala de esta capacidad todavía es limitada. Tenemos mucho páramo protegido, pero hay todavía una extensión considerable que no lo está. Más aún, la experiencia en restauración de páramo en el Ecuador está limitada a áreas pequeñas y todavía no contamos con una economía en la alta montaña basada en productos de la agricultura familiar o producción sostenible como la lana de alpaca o las papas nativas.

Finalmente, a pesar de que el conocimiento sobre el páramo ha aumentado mucho, aún quedan muchos vacíos por llenar. Un tema general es que en el Ecuador generamos mucho conocimiento cualitativo valioso, pero poca información cuantitativa. Tenemos datos sobre la flora, pero recién se están publicando cifras sobre fauna. Y aunque el conocimiento sobre la riqueza de especies avanza, este es bastante localizado geográficamente. Por esto, queda la duda sobre si varios taxones raros tienen realmente una distribución restringida geográficamente o si falta conocer su presencia en áreas menos estudiadas.

Tampoco tenemos mapas actualizados sobre tipos de vegetación a escala mayor, ni cartografía que describa los suelos y su capacidad de almacenar agua y carbono a nivel espacial. Igualmente, recién hemos comenzado a inventariar

los humedales, tan importantes para casi todos los aspectos relacionados al páramo. Las cifras actuales sobre el cambio climático nos dan más preguntas que respuestas (Capítulo 12). Lo más crítico es que todavía no tenemos cifras claras sobre la población que vive y depende del páramo, cuáles son sus actividades económicas, y cómo es su tenencia de tierra o su capacidad económica. Sin estos datos críticos, sigue siendo muy difícil desarrollar programas efectivos de conservación, desarrollo y política pública.

Un aporte importante de este libro es la identificación de los principales vacíos de información que se deberían cubrir durante los próximos años en nuestra comprensión de los paisajes de páramo. Entre esos vacíos, en esta sección queremos destacar algunos que, desde nuestro punto de vista, parecen más urgentes o que han sido mencionados en varios capítulos.

Monitoreo a largo plazo: aunque este libro muestra algunos avances sustanciales en los estudios y monitoreo a largo plazo, especialmente en lo que se refiera a hidrología, aún existen muchos aspectos del ambiente y el funcionamiento del páramo que requieren de mediciones sistemáticas, permanentes o con una cobertura geográfica más amplia. El monitoreo y el estudio hidrológico son un ejemplo claro de esta necesidad. Aunque los trabajos realizados en el sur del Ecuador han representado un avance fundamental no solo en el Ecuador, sino también en la región, son escasos o inexistentes estudios similares en otras partes del país (Capítulo 3). En este contexto, es muy difícil evaluar la representatividad de los estudios del sur y, sobre todo, comprender las variables o condiciones ambientales que podrían afectar a los patrones hidrológicos en cuencas con otros usos del suelo, otros sustratos geológicos o diferentes patrones climáticos.

En la misma línea, el monitoreo de las variables climáticas requiere esfuerzos adicionales (Capítulo 12). Esto es cierto, primero, para mejorar la calidad de los datos de temperatura y precipitación, con series de tiempo más largas e ininterrumpidas, y segundo, para lograr que esa información sea más accesible para quienes investigan y se encargan del manejo y gestión de los páramos. Esta necesidad es especialmente importante porque la información climática de alta calidad es indispensable para alimentar los modelos climáticos que necesitamos para pronosticar las respuestas que los páramos exhibirán mientras avanza el cambio climático.

Efectos del cambio climático: aunque se han hecho varios esfuerzos por caracterizar y pronosticar los efectos del cambio climático sobre los ecosistemas y las especies de páramo, esta es una tarea que requerirá nuevos esfuerzos (Capítulo 12). En particular, destacamos dos necesidades urgentes. Por un lado, muchas de las predicciones sobre la trayectoria del clima del páramo en escenarios de cambio climático tienen aún demasiada incertidumbre. Se requiere

información adicional, o quizás modelos diferentes, para reducir la incertidumbre que aún existe alrededor de la dirección e intensidad del cambio climático en los altos Andes. Por otro lado, se requieren más estudios de campo que nos ayuden a comprender y modelar los efectos del cambio climático sobre las especies y los procesos ecológicos del páramo (Capítulos 4-6). Los últimos diez años han visto el desarrollo de algunos estudios de este tipo, especialmente con el uso de cámaras abiertas de calentamiento para la evaluación de los efectos del incremento de temperatura sobre la composición de las comunidades de plantas. Sin embargo, se requieren estudios similares que evalúen estos efectos sobre otros procesos ecosistémicos y sobre la dinámica de carbono en los suelos de páramo.

Restauración y plantaciones de Polylepis: la restauración de los ecosistemas de páramo es una línea de trabajo urgente, pero es al mismo tiempo algo bastante incipiente en el país. La literatura en este tema es limitada, pero la información circunstancial sugiere que muchas de las decenas de iniciativas de restauración de páramos que se han realizado en el Ecuador se han limitado a la plantación de especies nativas y, sobre todo, de árboles de *Polylepis*. Por ejemplo, grandes extensiones de páramo en las cercanías de la laguna de Muertepungo, en la provincia de Pichincha, han sido convertidos en una plantación densa y homogénea de *Polylepis*, transformado dramáticamente el ecosistema de pajonales que existía en esa zona. Este tipo de iniciativa, replicada en muchas zonas del país, sugiere que los proyectos de restauración de páramo muchas veces se hacen con poco criterio técnico, pobre información de base o referencia y casi nulo monitoreo de los impactos. Como destaca el Capítulo 3 de hidrología, la transformación de los páramos de pajonal a plantaciones forestales ya sea con especies nativas o exóticas, tiene el potencial de afectar no solo la diversidad, sino, especialmente, la hidrología del páramo y los servicios ecosistémicos que se derivan de ella. Desde esta perspectiva, el desarrollo de buenas prácticas para el desarrollo e implementación de proyectos de restauración ecológica es uno de los vacíos más urgentes que este análisis ha identificado.

Integración entre ecosistemas: uno de los resultados de este libro es ofrecer una mirada de los páramos desde la complejidad y la diversidad de su paisaje. Pajonales, bosques, turberas, zonas periglaciares y ecosistemas acuáticos están interconectados a lo largo de las cuencas y se relacionan de forma diferente y diversa con las poblaciones humanas (Capítulo 6). En este contexto, algunos de los desafíos grandes que quedan pendientes: caracterizar las interacciones entre los diferentes tipos de ecosistemas en las cuencas de páramo, y cómo esas interacciones influyen sobre sus procesos ecológicos y servicios ecosistémicos; desarrollar una comprensión más detallada sobre los impactos antropogénicos

a los que cada tipo de ecosistema está mayormente expuesto y las iniciativas específicas para mitigarlos; y mejorar nuestra comprensión sobre los factores ambientales que condicionan la distribución y extensión de los ecosistemas de páramo a lo largo de las gradientes de precipitación, elevación, y sustrato geológico de los páramos del país.

Dinámica social y espacial: Este libro ha demostrado que recién empezamos a entender la interacción del páramo con la sociedad. Si bien hay un buen entendimiento de los procesos históricos sociales y culturales que determinan las relaciones del poder y la (falta de) justicia actual (Capítulo 8), mucho de ello es información localizada y fragmentada. Falta una 'narrativa' completa del páramo ecuatoriano que analice a escala nacional la dinámica social que determina el uso y desuso de la tierra, así como las motivaciones socioeconómicas y culturales detrás de ello. Esto debe incluir una actualización del entendimiento de la ruralidad ecuatoriana porque seguimos basándonos en el concepto de la comunidad agrícola marginalizada, mientras que el campo ha visto grandes cambios. Por consecuencia de procesos como la migración, aumento de infraestructura, acceso a tecnología digital y servicios financieros, el campo ecuatoriano está cambiando drásticamente su economía y cultura y esto tiene su influencia, hasta ahora desconocida, sobre las decisiones que toman familias, comunidades y gobiernos locales sobre los páramos. Por esto, es importante entender el socioecosistema desde un punto de ecología política, para identificar la interacción de los factores políticos, económicos y sociales y así entender y buscar soluciones a los conflictos ambientales en el páramo.

Herramientas de buen manejo de paisaje: Aunque todos quienes estamos preocupados por un futuro sostenible del país buscamos un manejo inteligente de sus ecosistemas claves como el páramo, hasta ahora son pocas las soluciones técnicas que realmente hemos logrado aplicar. Están herramientas de conservación, restauración y uso de la tierra disponibles, pero generalmente son prácticas individuales que no consideran la complejidad del paisaje y las interacciones entre la agricultura y factores externos del mercado, la economía política y los cambios globales (Capítulo 9). Esto requiere el desarrollo de más herramientas prácticas de buen uso de la tierra en áreas altoandinas, así como un mejor conocimiento de las externalidades que afectan los medios de vida de las familias rurales y las formas para influir en ellos positivamente.

Llenar todas estas lagunas de información debe abordarse de un modo transdisciplinario que evite la tradicional forma compartimentada de estudiar los ecosistemas y logre así, sin perder especificidad ni especialización, una visión holística de las realidades, problemas y perspectivas de un paisaje especialmente importante y amenazado.

Consideraciones finales: un futuro incierto, pero con esperanza

La fotografía que presenta este libro sobre la situación actual de los páramos ecuatorianos es como estar viendo en vivo uno de los majestuosos paisajes que nos ofrecen las alturas andinas: una profusión de colores, sonidos y texturas casi infinita deleita nuestros sentidos y colma nuestra mente. Es un paisaje que debería existir simplemente porque a lo largo de milenios de dialéctica entre ecología y evolución se estableció una red compleja y dinámica que sigue cambiando. Pero más allá de ese derecho esencial también está el hecho de que esos paisajes son el espacio de vida de las personas que viven en ellos, y que además nos entrega a la gente que vive lejos, a veces sin siquiera percatarnos de que les debemos tanto, una serie de servicios ambientales sin los cuales nuestra vida sería, por decir lo menos, muy complicada.

Pero esta imagen no es ideal. En el lienzo aparecen esas manchas y desgarrros que nos dicen que algo está pasando y que algo hay que hacer. En realidad, hay mucho que hacer para que la imagen no vaya deteriorándose hasta convertirse en un pálido reflejo de lo que aún permanece. Como se ha visto a lo largo del libro y se resume en estas conclusiones, se necesita una acción concertada del Estado, la academia, las instituciones y la gente en los páramos y fuera de ellos para que estos paisajes sigan existiendo y no solo sobreviviendo ante el embate de esa mezcla tóxica que es la modernidad exenta de planificación y conciencia.

Tal vez podemos imaginarnos por un momento que en realidad no estamos contemplando una sola fotografía, sino una película que se va haciendo al paso. Es de esas películas interactivas en las que podemos escoger el final. Pero en este caso, no solo es puro entretenimiento, sino que la gracia está en hacer algo para que la gran mayoría, si no la totalidad, escoja la alternativa que en realidad no es un final. Hemos llegado hasta aquí con esta mezcla de lo bueno y lo malo, y ahora se trata de que haya nuevos capítulos y escenas en los que el paisaje no solo se mantenga, sino que prospere para el bien de las generaciones futuras. Y podemos hacerlo. Ojalá este libro sirva como una base para que se tomen las mejores decisiones a escalas personales, institucionales y estatales que lleven a un mañana justo, solidario y sustentable para propios y extraños, para humanos y no humanos.



Volcán Cotopaxi.

Fotografía: Esteban Suárez Robalino

Editores

Robert Hofstede

Es un holandés que vive y trabaja en los Andes desde hace treinta años. Es biólogo de la Universidad de Ámsterdam y posee un Ph. D. en ecología de páramo. Ha sido investigador y docente de esta misma universidad, director de proyectos en CONDESAN, director regional de la UICN en Suramérica y director de cambio climático en el Centro Internacional de Investigación para el Desarrollo (IDRC) en Canadá. Es miembro fundador de la Corporación Ecopar en el Ecuador y profesor adjunto de la Universidad San Francisco de Quito USFQ. Actualmente trabaja de manera independiente como consultor para diferentes instituciones internacionales para la conservación, desarrollo sostenible y el cambio climático en Latinoamérica. Aunque en su carrera profesional se ha dedicado a la conservación de todos los ecosistemas tropicales, el páramo sigue siendo su especialidad y pasión. Ha desarrollado y liderado programas nacionales e internacionales sobre conservación de páramos en Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. Ha facilitado grupos internacionales de trabajo en páramos, asesorado a gobiernos, publicado una serie de libros y artículos académicos, y ha sido expositor invitado a muchos eventos sobre el tema de manejo y conservación de páramo.

Correo electrónico: hofstederobert@gmail.com

Patricio Mena-Vásquez

Estudió biología en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador en Quito, donde recibió el título de Licenciado en Ciencias Biológicas. Su tesis trató de la evolución convergente entre los páramos sudamericanos y los ecosistemas equivalentes en el África tropical oriental. Gracias a una beca Fulbright LASPAU, cursó una maestría en la City University y el Jardín Botánico de Nueva York, con una tesis de revisión del género de plantas neotropicales *Arcytophyllum*. Su interés en la comunicación le llevó a cursar una maestría en periodismo gracias a una beca del gobierno británico en la Universidad de Gales en Cardiff. Su tesis trató sobre algunas películas de Hollywood supuestamente ambientalistas. En la Universidad de Wageningen, Países Bajos, obtuvo su doctorado en Ciencias Ambientales con una tesis que analiza los conflictos de agua en la zona florícola de la cuenca del río Pisque al norte de Quito. Es miembro fundador de la ONG EcoCiencia, donde ha estado involucrado especialmente en proyectos relacionados con los páramos. Ha sido profesor de varias universidades, ha escrito diversos libros y artículos académicos y de divulgación, y también realiza labores de traducción y edición. Ganó el premio Enrique Garcés de Ciencias Biológicas del Municipio de Quito en 2014 como coautor del libro *El País de la Biodiversidad-Ecuador*.

Correo electrónico: pamv59@gmail.com

Esteban Suárez Robalino

Obtuvo su licenciatura en Biología de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, y su Maestría y Ph. D. en Ecología de Ecosistemas de Cornell University. Desde 2009 se desempeña como Profesor e Investigador en el Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ. Su interés principal está centrado en la ecología y la conservación de los ecosistemas de alta montaña. Actualmente, su investigación busca caracterizar la diversidad y funcionamiento de las turberas de páramo en el Ecuador, su dinámica de carbono, y los potenciales efectos del uso del suelo y el cambio climático y sobre la integridad y salud de estos ecosistemas. Adicionalmente, su grupo de investigación lidera varias iniciativas de restauración de turberas altoandinas, tratando de desarrollar métodos accesibles y económicos para recuperar ecosistemas de montaña.

Correo electrónico: esuarez@usfq.edu.ec

Autores, autoras

Fernando Anaguano-Yancha

Estudió biología en la Universidad Central del Ecuador en Quito, donde recibió el título de Licenciado en Ciencias Biológicas y Ambientales. Su tesis trató acerca de la diversidad de los peces de la laguna Cormorán en el Parque Nacional Sangay, Ecuador. En la actualidad cursa una maestría en Sostenibilidad y Planificación de la Conservación en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Es autor y coautor de algunos artículos científicos enfocados principalmente en la diversidad de peces dulceacuícolas, el parasitismo de isópodos sobre peces y las pesquerías de grandes bagres en la Amazonía ecuatoriana, los cuales se encuentran publicados en revistas indexadas. Desde 2013 forma parte de WCS Programa Ecuador, donde se desempeña como biólogo de campo. Ha trabajado en varios proyectos de conservación en la Amazonía ecuatoriana, monitoreando la ocupación de especies cinegéticas y caracterizando la pesca de subsistencia en comunidades indígenas. Además, lidera el uso de ICTIO en el Ecuador, una aplicación de ciencia ciudadana para el registro de peces amazónicos migratorios. Es miembro de la Red Ecuatoriana de Ictiología y de la Red de Ciencia Ciudadana para la Amazonía.

Correo electrónico: fanaguano@wcs.org

Karla Beltrán Valenzuela

Se graduó en Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE en Quito. Cursó una maestría en Economía y Management Ambiental en la Universidad Luigi Bocconi en Milán (Italia) y una especialización en Cambio Climático y Proyectos MDL en la Universidad Andina Simón Bolívar (Ecuador). Es doctora en Ciencias Ambientales de la Universidad de York (Inglaterra) con una tesis enfocada en evaluar los efectos del cambio climático en servicios ecosistémicos clave que brindan los páramos del Ecuador. Ha trabajado por más de 15 años en varias ONG ambientales (Fundación Natura, EcoCiencia e Intercooperation Latinoamérica) como técnica en Sistemas de Información Geográfica (SIG), coordinadora de proyectos y especialista en cambio climático, enfocando su interés en ecosistemas de alta montaña. Trabajó por tres años como consultora de la SENPLADES fortaleciendo procesos de generación de información ambiental prioritaria para la planificación. Recientemente, colaboró con el PNUD y el MAATE como Coordinadora del Proyecto *Cuarta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización*.

Correo electrónico: karlabeltranv@hotmail.com

Ross Borja

Estudió Economía (B. Sc.) en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador y Desarrollo Rural (M. Sc.) en Cornell University (Nueva York, EE. UU.). Realizó su tesis de Maestría sobre el Monitoreo y Evaluación de las Escuelas de Campo de Agricultores en la Sierra Ecuatoriana. Dirigió el aprendizaje organizacional del Programa de la Región Andina de World Neighbors en Perú, Bolivia y Ecuador. Fue la Representante Nacional de World Neighbors-Ecuador, donde lideró programas de desarrollo local en agricultura sustentable y salud comunitaria con comunidades indígenas y campesinas en la Sierra ecuatoriana. Es cofundadora de la Fundación EkoRural y los últimos diez años ha estado involucrada en desarrollo rural y manejo comunitario de recursos naturales mediante la coordinación de proyectos de investigación y desarrollo y fortalecimiento de capacidades locales. Desde 2009 es la directora ejecutiva de EkoRural.

Correo electrónico: rborja@ekorural.org

Joselin Caiza

Estudió en la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, donde se recibió de Ingeniera en Biotecnología. Su proyecto de titulación fue un análisis de la morfometría geométrica de las hojas compuestas de *Polylepis incana* y *P. racemosa* para diferenciar especies y potenciales híbridos en el Ecuador. Por más de cinco años se dedicó a investigar varios aspectos morfológicos, morfométricos, ecológicos, ambientales y genéticos del género *Polylepis* a nivel nacional. Posteriormente, cursó una maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental en la Universidad a Distancia de Madrid, España, con una tesis sobre economía circular, enfatizando en el reciclaje del Tetra Pak en el Ecuador. Actualmente es colaboradora externa del Proyecto de Vinculación con la Comunidad EcoCentro de EMGIRS-EP, que fomenta la conciencia ambiental en el aprovechamiento de los residuos orgánicos. Ha publicado artículos científicos relacionados con el género *Polylepis* y ha participado en congresos nacionales e internacionales como expositora promoviendo la divulgación científica a la sociedad.

Correo electrónico: joselinkaiza93@gmail.com

Marlon Calispa

Estudió en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, donde se recibió de ingeniero ambiental. Su proyecto de titulación se trató de un estudio de modelación hidrológica de páramos y glaciares en cuencas de interés en el volcán Antisana. Posteriormente cursó una maestría en sensores remotos en la Universidad Autónoma de Barcelona, España, con una tesis que evaluaba los cambios de uso del suelo en la Sierra ecuatoriana utilizando imágenes Landsat. Complementó su

formación con una maestría en Geografía en la Universidad Libre de Bruselas, Bélgica, en donde se tituló con un proyecto de investigación de los procesos de meteorización en cuencas altoandinas en la provincia del Azuay en relación con el cambio de uso del suelo. Actualmente es candidato doctoral por la Universidad Católica de Lovaina, donde investiga los efectos de la vegetación en las propiedades de los suelos de los páramos, con énfasis en los procesos de meteorización y almacenamiento de carbono. Ha sido profesor ocasional y consultor privado. Correo electrónico: marloncalispa@gmail.com

Rolando Céleri Alvear

Ingeniero civil por la Universidad de Cuenca (1997), Máster en Ingeniería de los Recursos Hídricos (2000) y doctor en Hidrología (2007) por la Universidad Católica de Lovaina, Bélgica. Es investigador titular de la Universidad de Cuenca desde el año 2010 donde dirige el Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (iDRHICA). Sus líneas de trabajo se relacionan con la hidrología, los recursos hídricos, el manejo de cuencas hidrográficas y el manejo integral del agua, desde un enfoque de los objetivos de desarrollo sostenible. Ha estudiado la hidrología de los páramos del sur del Ecuador desde el año 2002. Desde el año 2009 implementa, con Patricio Crespo, los Observatorios Ecohidrológicos de Zhurucay y Quinuas. Sus estudios se han centrado en comprender los procesos ecohidrológicos del páramo, principalmente las relaciones entre el agua, la vegetación y el suelo. Asimismo, ha estudiado los impactos del cambio de uso de la tierra sobre la regulación hidrológica de los páramos, en particular las conversiones a plantaciones de pinos, la agricultura y la ganadería intensiva. Es cofundador de la Iniciativa de Monitoreo Hidrológico de los Ecosistemas Andinos (IMHEA). Correo electrónico: rolando.celleri@ucuenca.edu.ec

Segundo Chimbolema

Estudió Biología en la Universidad Central del Ecuador, en la que se graduó de Licenciado en Biología con una investigación acerca de los patrones de diversidad florística de varias localidades del páramo de El Ángel en el norte del Ecuador. Obtuvo una Maestría en Ecoturismo y Manejo de Áreas Naturales de la Universidad Tecnológica Equinoccial. Tiene más de 15 años de experiencia en el estudio de la diversidad florística de los páramos del Ecuador y actualmente trabaja en la Universidad San Francisco de Quito USFQ donde investiga la ecología, la conservación y la restauración de las turberas del páramo. Correo electrónico: schimbolema@usfq.edu.ec

Patricio Crespo Sánchez

Estudió ingeniería civil en la Universidad Católica de Cuenca. Cursó una maestría en Manejo y Conservación de Agua y Suelo en la Universidad de Cuenca, con una tesis sobre la conceptualización hidrológica de una cuenca andina usando modelación semidistribuida. Su interés está en los recursos hídricos; una beca de la Fundación Alemana para la Investigación le llevó a estudiar un doctorado en ciencias naturales en la Universidad de Giessen en Alemania. Su tesis trató sobre el uso de trazadores y modelos hidrológicos para comprender los procesos en una cuenca de bosque amazónico. Actualmente es profesor principal en la Universidad de Cuenca, director del Centro de Hidrología y Clima del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales, y director de la maestría en Hidrología, mención Ecohidrología en la misma Universidad. Ha sido profesor en posgrados de varias universidades, ha escrito diversos artículos científicos y ha sido revisor para varias revistas científicas. Ha dirigido a varios estudiantes de pregrado, maestría y doctorado, y ha dirigido diversos proyectos científicos.

Correo electrónico: patricio.crespo@ucuenca.edu.ec

Sisimac A. Duchicela

Estudió la licenciatura en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador donde obtuvo su título en Ciencias Biológicas. Su investigación durante la licenciatura midió los factores que afectan el crecimiento de tres especies de *Polylepis* en los Andes ecuatorianos. Después de su licenciatura cursó una maestría en Ecología de la Conservación en la Escuela de Recursos Naturales en la Universidad de Michigan-Ann Arbor, Estados Unidos. Durante su maestría colaboró en el diseño, la ejecución y la evaluación de proyectos de restauración. Su proyecto final de maestría evaluó la restauración del Bosque Nacional Tongass en Alaska, Estados Unidos. Finalmente, obtuvo su Ph. D. en Geografía en la Universidad de Texas, Austin. Su investigación estudió las prácticas de restauración en los ecosistemas de alta montaña en Ecuador y Perú. Actualmente es becaria postdoctoral en la Universidad de California, Riverside. Su investigación estudia el impacto del cambio climático sobre la ecología, taxonomía y diversidad funcional de plantas en ecosistemas de alta montaña.

Correo electrónico: s.duchicela@gmail.com

Emilie Dupuits

Es politóloga diplomada de un doctorado en ciencias de la sociedad de la Universidad de Ginebra en Suiza. Es actualmente profesora de relaciones internacionales en la Universidad San Francisco de Quito USFQ. Coordina distintos

proyectos de investigación en el Ecuador y los Andes sobre manejo comunitario de recursos naturales, ecología política, justicia hídrica y políticas de desarrollo, en colaboración con la Universidad Internacional del Ecuador, la Universidad de Ginebra y el Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo Sostenible (IRD). Ha colaborado también en varios estudios regionales sobre políticas de adaptación al cambio climático en los Andes con el Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN).

Correo electrónico: edupuits@usfq.edu.ec

Andrea C. Encalada

Es una ecóloga ecuatoriana con experiencia en el estudio y conservación de los ríos y los organismos que viven en ellos. Estudió su licenciatura en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador y su Ph. D. en Cornell University en los Estados Unidos. En 2004 fundó el Laboratorio de Ecología Acuática de la Universidad San Francisco de Quito USFQ y en 2016 el Instituto de Investigaciones BIOSFERA-USFQ. Ha desarrollado un amplio programa de investigación y colaboración internacional que ha generado más de 70 publicaciones arbitradas, seis capítulos en libros y dos libros. Ha liderado varias iniciativas regionales de conservación, entre las que se destaca su papel como colíder del Panel de Ciencia para la Amazonía (Science Panel for the Amazon), una iniciativa global para generar y compilar la mejor ciencia posible para promover la conservación de la cuenca amazónica a largo plazo. Su grupo de investigación busca la generación y el uso de información científica como herramienta para promover la conservación de la biodiversidad y de los ecosistemas acuáticos, el desarrollo sustentable del país y la mitigación de los problemas socioambientales.

Correo electrónico: aencalada@usfq.edu.ec

David A. Espinel Ortiz

Obtuvo su licenciatura en Biología en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador en 2019. Realizó el estudio evolutivo de las moras y frambuesas del Ecuador, que finalizaron en su disertación de Licenciatura que trató sobre la filogenética de las especies del género *Rubus* del Ecuador. Desde entonces, se ha desempeñado como investigador y técnico del Laboratorio de Botánica Sistemática de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la PUCE. En este laboratorio revisó detalladamente las muestras de *Rubus* en los distintos herbarios ecuatorianos, lo cual le permitió describir por primera vez a *Rubus longistipularis* y *Rubus maquipucunensis*, dos nuevas especies endémicas del Ecuador. También colabora con el Herbario Padre Luis Sodiro (QPLS) del Centro Cultural Biblioteca Ecuatoriana Aurelio Espinosa Pólit. La línea de investigación que sigue incluye la taxonomía

y la evolución de la flora de páramo, con énfasis en el género *Rubus* y la familia Rosaceae. En los últimos años, en conjunto con la Dra. Katya Romoleroux, ha publicado varios artículos científicos en revistas extranjeras y nacionales y tres libros (todos del género *Rubus*). Desde 2019 hasta la fecha se ha desempeñado como tesorero de la Sociedad Ecuatoriana de Biología. En el año 2018 recibió el Premio Enrique Garcés del Municipio de Quito (mención honorífica).
Correo electrónico: david.espinel.ortiz@gmail.com

Marcelo Guamán Hidalgo

Estudió en la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, donde se recibió de Ingeniero en Biotecnología. Su proyecto de titulación trató de una caracterización morfológica y de la germinación de semillas de la familia Asteraceae en los bosques andinos del Ecuador, para buscar especies con potencial para ser almacenadas en un banco de semillas para futuros planes de reforestación. Fue colaborador en el Proyecto BIO-GEEC, que busca preservar la biodiversidad ecuatoriana. Se encuentra cursando una maestría en Desarrollo e innovación de alimentos en la Universidad de las Américas (UDLA). Actualmente es docente a tiempo parcial y consultor privado. También desempeña funciones en una empresa privada realizando planes de muestreo y análisis de suelos que requieren procesos de remediación.

Correo electrónico: mdguahid2022@hotmail.com

Bryan A. Idrovo-Torres

Se graduó como Ingeniero en Gestión Ambiental en la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL). Tiene experiencia profesional en Sistemas de Información Geográfica, cartografía temática del Ecuador, manglares y salitrales. Ha participado en varios proyectos de investigación científica en producción de sedimentos y cambio de cobertura vegetal en cuencas hidrográficas, así como en el análisis cartográfico y la caracterización geoecológica y ambiental en sistemas de humedales altoandinos en el sur del Ecuador.

Correo electrónico: bidrovot@gmail.com

Ricardo Jaramillo

Se recibió de biólogo en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Su tesis trató el efecto de la intensidad de la luz sobre el desarrollo inicial en la germinación de esporas de helechos. Posteriormente, cursó una maestría en biología de la conservación en la PUCE, con una tesis enfocada en las estrategias fisiológicas de dos especies altoandinas como respuesta a la variación de la temperatura del aire en el páramo del volcán Antisana. Desde ahí se ha dedicado al estudio de

la ecología de los páramos, y actualmente es candidato doctoral por la Michigan Technological University, donde investiga la ecología y la restauración de las turberas en los Andes de Ecuador.

Correo electrónico: rmjarami@mtu.edu

Luis Daniel Llambí

Es licenciado en Biología de la Universidad Simón Bolívar (Venezuela) y Doctor en Ecología de la Universidad de York (Inglaterra). Actualmente es coordinador para los Andes del programa global Adaptación en las Alturas (COSUDE-CONDESAN) y profesor titular de Ecología de la Universidad de los Andes (Venezuela). Ha sido profesor visitante de la Universidad de Montana (Fulbright), Universidad de Grenoble (Joseph Fourier) y la UASB-Quito (Prometeo). Su trabajo en el área de la ecología de comunidades y la ecología aplicada se ha enfocado en entender los factores que explican el ensamblaje, dinámica y diversidad de la vegetación y el efecto del uso de la tierra y el cambio climático en los Andes tropicales. Su investigación ha abordado el estudio de la dinámica de la sucesión en la vegetación, las interacciones planta-planta (facilitación/competencia), la diversidad funcional de las plantas alpinas, la estructura y dinámica del límite altitudinal de los bosques y la ecología de las especies invasoras. A su vez, trabaja activamente en el diseño e implementación de estrategias de monitoreo, conservación y restauración de ecosistemas montañosos tropicales, enfatizando en el desarrollo de enfoques transdisciplinarios y participativos, así como en herramientas de diálogo ciencia-política, educación ambiental y adaptación al cambio climático. Es explorador de National Geographic Society y facilitador regional de las redes de monitoreo Gloria-Andes y la Red de Bosques Andinos.

Correo electrónico: llambi@ula.ve

Fausto V. López Rodríguez

Posee una Maestría en Formación de Formadores otorgada por la Universidad de Sevilla y otra en Manejo y Gestión del Medio Natural por parte de la Universidad de Cádiz (España). Es Doctor por la Universidad de Cádiz por el Programa Gestión y Conservación del Mar. Cuenta con más de treinta años de experiencia en temas de gestión ambiental y conservación, específicamente en áreas protegidas, manglares y planificación para la conservación. En la actualidad coordina el grupo de investigación Gobernanza, Biodiversidad y Áreas Protegidas de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (Departamento de Ciencias Biológicas y Agropecuarias) de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL). Fue mentor y fundador de la ONG Fundación Ecológica Arcoíris de Loja, en la cual fue su director por ocho años, y coordinó la Comisión de Minería del Comité Ecuatoriano

para la Defensa de la Naturaleza y el Medio Ambiente (CEDENMA) por más de seis años. Ha publicado varios textos y artículos científicos sobre el Parque Nacional Podocarpus, los humedales y los manglares de la región sur del Ecuador. En la UTPL imparte la cátedra de áreas protegidas desde hace más de 15 años. Correo electrónico: fvlopezx@utpl.edu.ec

Rossana Manosalvas

Tiene una licenciatura en Biología de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador en Quito, una maestría en educación para el desarrollo de la Universidad de Cardiff en la Gran Bretaña y está culminando un doctorado en ecología política en la Universidad de Wageningen, Países Bajos. Ha trabajado por más de treinta años en la búsqueda del desarrollo sostenible y ha combinado la conservación de la naturaleza con la justicia ambiental, especialmente para los grupos más vulnerables como las mujeres y los pueblos indígenas. Ha desarrollado programas de formación sobre gobernanza y la gestión democrática de los recursos naturales. Sus intereses de investigación buscan evidenciar y devolver el rol político a las ciencias y mostrar los conflictos y las luchas de poder alrededor del acceso, uso, control y beneficio de los recursos naturales, especialmente el agua. Estudia los páramos como territorios sociales y naturales. Es parte del colectivo Mujeres por el Agua, que lucha por la descontaminación de los ríos y las quebradas de Quito, el Observatorio de Ríos Andinos, que hace un seguimiento a la construcción de represas y embalses y su impacto en las corrientes fluviales, y pertenece a Justicia Hídrica, una alianza internacional académica y de movilización social. Correo electrónico: rossanamanosalvas@gmail.com

Giovanny M. Mosquera

Estudió Ingeniería Civil en la Universidad de Cuenca. Su tesis trató sobre el uso de trazadores isotópicos para entender procesos de generación de caudal en cuencas de páramo en el sur del Ecuador. Mediante una beca SENESCYT del gobierno ecuatoriano cursó una maestría en Ciencias del Agua en la Oregon State University en los Estados Unidos. Posteriormente, cursó el programa de doctorado en Recursos Hídricos de la Universidad de Cuenca con el apoyo de la Justus Liebig University Giessen en Alemania, en donde desarrolló conocimiento sobre la hidrología subsuperficial y subterránea de ambientes montañosos. Ha sido galardonado con varios premios nacionales e internacionales por su trabajo en ecohidrología tropical, incluyendo el Premio de Mérito a la Investigación Científica en Medio Ambiente otorgado por la SENESCYT en 2014 y el Premio Ignacio Rodríguez-Iturbe por la mejor publicación científica en la revista científica *Ecohydrology* (Wiley) en 2018. Fue representante del comité de científicos

de carrera temprana de la Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas (IAHS) durante el periodo 2018-2022. Actualmente se desempeña como investigador postdoctoral en la Universidad San Francisco de Quito USFQ en donde se encuentra involucrado en proyectos multidisciplinarios en ambientes montañosos tropicales. Ha participado como presentador invitado y panelista tanto en el Ecuador como en el extranjero, incluyendo eventos tales como la American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, la reunión científica de geociencias más grande del planeta.

Correo electrónico: gmosquera@usfq.edu.ec

Priscilla Muriel Mera

Es docente de la Facultad de Ciencias Exactas de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, donde obtuvo su Licenciatura en Ciencias Biológicas. Su tesis doctoral en la Universidad de Aarhus (Dinamarca) fue la botánica sistemática de *Virola* (Myristicaceae), un género de árboles de dosel del Neotrópico, parientes de la nuez moscada. Desde su incorporación a la PUCE ha trabajado en proyectos relacionados con taxonomía de helechos, sistemática y ecología de plantas de ecosistemas altoandinos y cambio climático. Es coeditora de la *Enciclopedia de Plantas Útiles del Ecuador* y autora de las evaluaciones de varias especies del *Libro rojo de plantas endémicas del Ecuador*. También ha participado como taxónoma y especialista en bases de datos y sistemas de información asociados a colecciones biológicas y al monitoreo de la vegetación en redes de investigación internacionales de cambio climático y proyectos de conservación de la biodiversidad. Su tema de investigación actual más importante es el de las plantas y los cambios ambientales en la región altoandina mediante experimentos manipulativos en campo y procesos de monitoreo a largo plazo de la vegetación. El objetivo es fortalecer el desarrollo de medidas de adaptación en los ecosistemas altoandinos frente al cambio climático.

Correo electrónico: epmuriel@puce.edu.ec

Ana E. Ochoa Sánchez

Estudió Ingeniería Civil en la Universidad de Cuenca del Ecuador. Obtuvo una beca del VLIR-USO y estudió en el Programa IUPWARE, una Maestría en Ciencias en Ingeniería de Recursos Hídricos y se graduó en el 2012. La Universidad de Cuenca le otorgó una beca para sus estudios doctorales en el Programa de Doctorado en Recursos Hídricos, del cual se graduó en noviembre del 2019. Actualmente es profesora titular en la Facultad de Ciencia y Tecnología en la Universidad del Azuay en Cuenca, Ecuador. Allí se desempeña también como coordinadora de investigación de la Facultad y Coordinadora de

la Maestría en Cambio Climático, Agricultura y Desarrollo Rural Sostenible. Sus líneas de investigación son la ecohidrología y el cambio climático. Ha publicado varios artículos científicos en esta temática. Ana Elizabeth es miembro de la Red Ecuatoriana de Mujeres Científicas, la Academia de Ciencias del Ecuador y la Global Young Initiative.

Correo electrónico: aechoa@uazuay.edu.ec

Pedro J. Oyarzún

Estudió Agronomía en la Universidad de Wageningen, Países Bajos, y recibió su Masterado en Sistemas de Producción de Cultivos. Escribió su tesis principal en fisiología de cultivos, estudiando la fotosíntesis y las relaciones hídricas en plantas, con tesis menores en fitopatología, entomología tropical y suelos. Trabajó en la Estación Experimental de Cultivos y Hortalizas en Lelystad, donde estudió la ecología de suelos con enfoque en la microflora patógena causante de enfermedades radiculares en leguminosas y en el desarrollo de bioensayos para su evaluación y riesgos de enfermedad en cultivo a campo. El estudio de receptividad de suelos a enfermedades radiculares y factores asociados, en el Instituto de Enfermedades de Plantas (IPO) dio lugar a su tesis doctoral en Ciencias Agronómicas y del Ambiente, en Wageningen University. Como Investigador asociado en el Centro Papa (CIP) en el Ecuador investigó y dirigió la presencia y ecología de enfermedades asociadas a solanáceas. En su calidad de colíder del Programa Andino de Papas, dirigió el Proyecto Fortipapa en el Ecuador, que tomó a su cargo las actividades generales del Programa Nacional de Raíces y Tubérculos (PNRT) del INIAP. Trabajó como asesor regional en programas de Investigación y desarrollo en el Ecuador, Perú y Bolivia con CIP y World Neighbors/Vecinos Mundiales. Es socio fundador de la Fundación EkoRural, organización en la cual se desempeña hasta el presente. Es autor y coautor de numerosas publicaciones científicas y de divulgación.

Correo electrónico: poyarzun@ekorural.org

Myriam Paredes

Tiene títulos de B. Sc. en Agronomía en Zamorano (Honduras), M. Sc. y Ph. D. en Antropología de Cambio en la Universidad de Wageningen (Países Bajos), y un postdoctorado con el apoyo de la Real Academia de Investigación de Holanda. Su tesis doctoral trató la heterogeneidad social entre familias campesinas productoras de papa en la provincia del Carchi. Ha sido docente en varias universidades y actualmente es profesora en FLACSO, donde es coordinadora académica del Departamento de Desarrollo, Ambiente y Territorio. Como profesora del área de Estudios Urbanos Rurales y del Territorio enseña cursos sobre soberanía

alimentaria y sustentabilidad y métodos de investigación social. Su área de investigación es la Soberanía Alimentaria y su entramado con las economías del cuidado. Ha publicado más de 40 artículos académicos, capítulos de libros y libros en el área de soberanía alimentaria y los vínculos sociales urbano-rurales. Correo electrónico mcparedes@flacso.edu.ec

Aura Paucar Cabrera

Estudió Biología en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador en Quito donde, como trabajo de tesis, realizó un inventario biótico de los escarabajos rutelinos (Coleoptera: Scarabaeidae) del Ecuador. Luego, con una beca de la Fundación Nacional de Ciencias (NSF) de los Estados Unidos, obtuvo una maestría en entomología de la Universidad de Nebraska, donde desarrolló su tesis sobre la filogenia del género *Epectinaspis* (Scarabaeidae: Rutelinae). Cursó su doctorado en Biodiversidad y Conservación en la Universidad de Alicante, España, con una tesis sobre los escarabajos dinastinos (Coleoptera: Scarabaeidae) del Ecuador. Sus intereses se centran en la taxonomía y la conservación de insectos, la curación y manejo de colecciones zoológicas, la educación ambiental, la ilustración científica y el diseño web para divulgación científica. Ha publicado varios artículos académicos y libros de naturaleza para niños. Es docente investigadora y responsable del Museo de Zoología LOUNAZ de la Universidad Nacional de Loja, donde recibió un reconocimiento al mérito científico. Es también investigadora asociada del Museo de la Universidad de Nebraska, sección Entomología. Actualmente dirige el proyecto de investigación Uso de escarabajos biorrecicladores (Coleoptera: Scarabaeinae) y consorcios bacterianos del suelo como estrategia para la regeneración de ecosistemas en tres áreas de Loja y Zamora Chinchipe.

Correo electrónico: aurapaucar@gmail.com

Gabriela Pazmiño

Estudió en la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, donde obtuvo el título de Ingeniera en Biotecnología. Su proyecto de titulación fue un estudio de la germinación *in vitro* y la caracterización morfológica de semillas de seis especies de la familia Asteraceae obtenidas del Parque Nacional Cayambe Coca en el Ecuador. Trabajó durante dos años como investigadora aliada del Proyecto BIO-GEEC: Consorcio alemán-ecuatoriano sobre Biodiversidad, y ayudó al establecimiento del High Altitude Seed Bank (HANS-BANK) en la ESPE como coordinadora y asistente técnica por más de un año. Adicionalmente, es consultora y auditora independiente en evaluación y generación de bases de datos para estudios de impacto ambiental en la Amazonía ecuatoriana. Ha participado como

ponente en varios congresos nacionales e internacionales y ha publicado artículos en revistas digitales sobre la importancia de generar estrategias que permitan la conservación de los páramos en el país.

Correo electrónico: gapazmino5@espe.edu.ec

Manuel Peralvo

Es geógrafo con especialidad en el estudio de sistemas socioambientales, modelamiento ambiental para soporte de toma de decisiones y articulación de herramientas de gestión sostenible del territorio en procesos de gobernanza ambiental a múltiples escalas. Tiene 25 años de experiencia trabajando en la región andina, donde ha implementado múltiples iniciativas de desarrollo sostenible en procesos de investigación e intervención que integran enfoques de las ciencias naturales y sociales con acciones de manejo sostenible de la tierra, planificación de uso del suelo, monitoreo socioambiental, conservación y restauración de ecosistemas en un contexto de cambio climático. Actualmente coordina el Proyecto de Neutralidad de Degradación de Tierras en Ecuador, una iniciativa colaborativa entre el Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica, el Ministerio de Agricultura y Ganadería, FAO y CONDESAN que promueve la adopción amplia de prácticas de manejo sostenible de la tierra para evitar y revertir procesos de degradación y recuperar la funcionalidad ecosistémica y productiva de paisajes en el Ecuador.

Correo electrónico: manuel.peralvo@condesan.org

Juan P. Pesántez Vallejo

Estudió Ingeniería Ambiental en la Universidad de Cuenca. En la misma universidad cursó una maestría en Ecohidrología, con una tesis que evaluó el efecto de los factores hidrometeorológicos y de cambio de uso de suelo en las concentraciones de carbono orgánico disuelto en el agua de suelos de una cuenca de páramo en el sur del Ecuador. Su interés en estudiar la ecohidrología de las cuencas de páramo lo llevó a ingresar al programa doctoral en Recursos Hídricos de la Universidad de Cuenca, donde se encuentra analizando cuencas de páramo usando modelos hidrológicos asistidos por trazadores, así como dinámicas de carbono orgánico en el agua de estas cuencas. Actualmente, imparte clases relacionadas con su línea de investigación en varios programas de maestría y trabaja con varios estudiantes de maestría y pregrado que se han interesado en varios aspectos de su área de estudio. Los temas en los que se encuentra trabajando incluyen: calidad ambiental de agua, funcionamiento hidrológico, exportación y dinámica de solutos desde su entrada, movimiento por los suelos, aguas subterráneas y su salida de cuencas andinas.

Correo electrónico: juanpesantez91@gmail.com

Mónica Ribadeneira Sarmiento

Se tituló como abogada y doctora en Jurisprudencia en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Su tesis doctoral fue un triple estudio del régimen legal e institucional de las Galápagos (como provincia, parque nacional y reserva marina). En Europa completó su formación titulándose en dos maestrías, una en Derecho Ambiental (LMM) y otra en Áreas Protegidas (M. Sc.). Ha estudiado derecho económico, derechos humanos y de propiedad intelectual, manejo de biodiversidad y gestión de proyectos en Ecuador, España, Suecia, Alemania, Noruega, Panamá y Estados Unidos. Fue miembro de las delegaciones ecuatoriana y alemana en la negociación internacional del Protocolo de Nagoya de Acceso a Recursos Genéticos. Ha trabajado en Ecuador, Estados Unidos, Alemania y Perú coordinando proyectos globales y regionales para el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Global Environmental Facility (GEF), UICN, Sociedad de Ingenieros Alemanes (VDI), Fundación Alemana para la Investigación Científica (DFG), Banco Alemán de Desarrollo (KfW), Parlamento Andino y Global Land Alliance (GLA), entre las otras. Ha colaborado como consultora de FAO, IICA, Programa Mundial de Alimentos (PMA), WWF, USAID, BID, CARE y GIZ entre otros, así como para varias organizaciones y universidades nacionales. Ha sido evaluadora externa del Fondo de Adaptación del Banco Mundial. Al momento se desempeña como coordinadora de Alliance for Water Stewardship.

Correo electrónico: mribadeneira@gmail.com

Diego Riveros-Iregui

Es profesor Bowman y Gordon Gray de Geografía de la University of North Carolina at Chapel Hill. Recibió un B. Sc. en Geología de la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá (1999), un M. Sc. en Hidrogeología de la Universidad de Minnesota (2004) y un Ph. D. en Hidrología de cuencas de la Universidad Estatal de Montana (2008). Fue becario postdoctoral en la Universidad de Colorado Boulder y profesor asistente en la Universidad de Nebraska antes de mudarse a la UNC en 2013. Ha sido profesor invitado en el Centro Nacional de Investigación Atmosférica en Boulder y actualmente es profesor adjunto de la Universidad San Francisco de Quito USFQ. Recibió el premio J. Carlyle Sitterson a la docencia para estudiantes de primer año, el premio CAREER de la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, un premio académico Fulbright, y el premio de la facultad de la UNC a la excelencia global.

Correo electrónico: diegori@email.unc.edu

Chaquira Romoleroux

Estudió y obtuvo su licenciatura en Ciencias Biológicas y Ambientales en la Universidad Central del Ecuador. Su tesis trató sobre la cuantificación de carbono del suelo en tres bosques presentes en el páramo del Área de Conservación Hídrica Paluguiño: bosque de *Polylepis incana*, bosque de *Polylepis pauta* y pajonal. Es capacitadora en temas de desarrollo sostenible dirigido a guardaparques de la provincia de Napo con el Ministerio de Turismo y la Universidad Ikiam. Participó en el proyecto de la PUCE sobre educación ambiental con unidades educativas en la Estación Científica Yasuní, realizando guías de campo. Trabajó como analista ambiental y de conservación de los recursos naturales en la Dirección de Protección Ambiental del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Rumiñahui. Posteriormente, obtuvo una beca de pasantía otorgada por la Instituzione Cientifica Centro Colibri, en Italia, para realizar una experiencia de trabajo en el manejo, cuidado y estudio de comportamiento de colibríes. Es estudiante de la maestría en Sostenibilidad y Planificación de la Conservación de la PUCE y asistente de investigación en el Laboratorio de Botánica Sistemática de la misma institución. En el año 2019 recibió el Premio al mejor póster científico en Ecología en el V Congreso Internacional de Ecología y Conservación de Bosques de *Polylepis*.

Correo electrónico: ccromoleroux@puce.edu.ec

Katya Romoleroux

Obtuvo su licenciatura en Biología en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Seguidamente logró una beca otorgada por el gobierno danés y realizó su Ph. D. en la Universidad de Aarhus, Dinamarca. Su tesis doctoral fue la taxonomía de la familia Rosaceae para el Ecuador; como uno de los productos de su estudio publicó el tratamiento taxonómico en la revista internacional *Flora of Ecuador*, siendo la primera ecuatoriana en publicar en la mencionada revista. Obtuvo dos becas de la Fundación Alexander von Humboldt para su postdoctorado en la Universidad Ludwig Maximilians de Múnich, Alemania, siendo el tema de su estudio la revisión monográfica de todo el género *Lachemilla* (Rosaceae). Es profesora de botánica y de biología en la PUCE; ha dirigido tesis relacionadas con plantas altoandinas; ha publicado varios artículos científicos en revistas extranjeras y nacionales y cuatro libros; es coeditora de libros y revistas científicas y ha descubierto y descrito algunas especies de plantas nuevas para la ciencia. Fue directora y es curadora del Herbario QCA. Es miembro fundador de la Academia de Ciencias del Ecuador. En el año 2018

recibió el Premio Enrique Garcés del Municipio de Quito (mención honorífica) y en el año 2020 el Premio Nacional Eugenio Espejo en Ciencias.

Correo electrónico: kromoleroux@puce.edu.ec

Daniela Rosero-López

Realizó su carrera de Ingeniería Ambiental en la Universidad Internacional SEK del Ecuador en Quito. Su investigación de tesis se basó en evaluar los niveles de mercurio presentes en los diferentes compartimentos ambientales de la laguna Aucacocha del sistema lacustre Cuyabeno. Su interés por la hidrología y la biofísica le permitió obtener una beca para cursar un diplomado en el Instituto Sueco de Meteorología e Hidrología en Estocolmo. A partir de su aprendizaje en métodos de monitoreo ecohidrológico, implementó con el FONAG el primer proyecto para determinar caudales ecológicos en captaciones de agua potable en el Ecuador. Gracias a una beca del Instituto Francés para el Desarrollo, IRD, realizó una Maestría en Ecología Tropical en la Universidad San Francisco de Quito USFQ; en su tesis evaluó el impacto de las captaciones de agua potable sobre la fauna acuática de los ríos de páramo. Obtuvo su doctorado en ecohidrología en Cornell University con sus tesis para identificar soluciones ambientales para la operación de infraestructura de agua potable en ríos de páramo que alimentan a la ciudad de Quito. Ha realizado varios análisis ecohidrológicos sobre infraestructura de riego y agua potable en ríos de páramo y estudios de caudales ecológicos para la operación de centrales hidroeléctricas. Actualmente es investigadora del Instituto Biósfera de la Universidad San Francisco de Quito USFQ.

Correo electrónico: drosereol@usfq.edu.ec

Yerka Sagredo

Estudió biología en la Universidad Central del Ecuador en Quito, donde recibió el título de Licenciada en Ciencias Biológicas. Su tesis fue *Composición y Estructura Ecológica de la Comunidad de Herpetofauna en el Bosque Protector Abanico, Morona Santiago*. Fue voluntaria del Museo de Historia Natural de la Escuela Politécnica Nacional. Trabajó en el Laboratorio de Herpetología de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, donde continúa siendo investigadora asociada y en el que manejó y curó la colección de anfibios y reptiles. En los dos museos dedicó gran parte de su tiempo al aprendizaje e identificación de la herpetofauna, por lo que tiene amplios conocimientos taxonómicos, ecológicos y de historia natural de estas especies. A nivel de campo, ha trabajado en varios estudios de impactos ambientales y monitoreos en colaboración con grupos multidisciplinarios. A nivel científico, en colaboración con varios investigadores, ha trabajado en la publicación de varias especies nuevas para el Ecuador. Ha dado charlas

relacionadas con ofidismo y ha sido escritora y revisora de varios informes técnicos relacionados a la parte ambiental, también se ha dedicado a su traducción, así como el libro *Monitoreo Biológico Yasuní-Anfibios y Reptiles*. En la actualidad, continúa describiendo especies nuevas de anfibios y reptiles.

Correo electrónico: yevasanu@gmail.com

Pablo Samaniego Eguiguren

Es vulcanólogo del Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD, Francia), adscrito al Laboratorio Magmas y Volcanes (Clermont-Ferrand, Francia). Después de obtener un doctorado de la Universidad Blaise Pascal (Clermont-Ferrand, Francia), trabajó en el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional en Quito en donde fue jefe del equipo de vulcanología del mencionado instituto. Es especialista en el volcanismo y el magmatismo de zonas de subducción, con énfasis en la reconstrucción de la cronología eruptiva y en la evolución petrogenética de los volcanes de arco. Tiene alrededor de 25 años de experiencia en el estudio y la evaluación de los peligros asociados con los volcanes andinos, especialmente en el Ecuador y Perú. Es autor o coautor de más de 65 artículos en revistas científicas internacionales, así como de más de 12 mapas de peligros volcánicos.

Correo electrónico: pablo.samaniego@ird.fr

Santiago D. Santamaría Freire

Realizó sus estudios de tercer nivel en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, donde recibió el título de Ingeniero Geólogo. Su tesis de pregrado la realizó en colaboración con el Instituto Geofísico de la misma institución. En su estudio, recopiló la información geocronológica del arco volcánico ecuatoriano para evaluar la frecuencia eruptiva en el país. Gracias a su investigación, fue aceptado en la Universidad de París-Saclay, Francia, para cursar sus estudios de doctorado en las temáticas de geocronología y vulcanología. En su investigación evidenció que el volcanismo en el Ecuador es mucho más joven de lo pensado, mostrando un incremento en la actividad desde los últimos 600 000 años. Actualmente, trabaja en la estandarización para depósitos volcánicos cuaternarios y la actualización de las cartas geológicas del Ecuador en el Instituto de Investigación Geológico y Energético.

Correo electrónico: santiago.santamaria@geoenergja.gob.ec

Tatiana Santander García

Es bióloga de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador y Magíster en Áreas Protegidas de la Universidad Autónoma de Madrid. Ha trabajado más de veinte años en proyectos de conservación de aves y cuenta con experiencia en el

levantamiento y gestión de fondos. Es una de las coautoras del *Directorio de Áreas Importantes para la Conservación de las Aves y Biodiversidad de Ecuador* (IBAs). Además, ha dedicado parte de su tiempo a la investigación; su principal interés se centra en la ecología de los colibríes de los ecosistemas altoandinos, particularmente de una de las especies más amenazadas, el zamarrillo pechinegro (*Eriocnemis nigrivestis*). Desde 2004 promueve el Censo Neotropical de Aves Acuáticas con el apoyo de una amplia red de personas voluntarias y colaboradoras en los diferentes humedales. Con el Ministerio de Ambiente trabajó en el programa Humedales del Ecuador en temas de gobernanza y desarrollando protocolos para el monitoreo biológico participativo en sitios Ramsar. También ha conducido múltiples procesos de establecimiento de capacidades locales a nivel de comunidades locales, promoviendo la participación como un medio de sensibilización y apropiación. Adicionalmente, es parte del Comité Nacional de Reuniones Ornitológicas de Ecuador desde 2005 y del Grupo de Trabajo de la Lista Roja de Aves del Ecuador. Correo electrónico: tatiana.santanderg@gmail.com

María Claudia Segovia

Obtuvo su licenciatura en Ciencias Biológicas en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, su maestría en Ohio University en Ambiente y Biología Vegetal y su Ph. D. en el Departamento de Botánica de University of Florida. Su investigación se centra en la conservación y la evolución de los ecosistemas altoandinos, principalmente en los bosques andinos del género *Polylepis*. En la actualidad es docente del Departamento de Ciencias de la Vida y Agricultura de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE. Es cofundadora de la Red Ecuatoriana de Mujeres Científicas (REMCI).

Correo electrónico: mcsegovia@espe.edu.ec

Steven G. Sherwood

Estudió Economía (BA, Penn State), Agricultura Tropical/Fitopatología (MPS, Cornell) y Sociología de Conocimientos (Ph. D., Wageningen). Actualmente es investigador en Conocimientos, Tecnología e Innovación para la Fundación EkoRural (Quito) y la Universidad de Wageningen (Países Bajos). Fue el Director Regional del Área Andina para la organización no gubernamental, Vecinos Mundiales. También, ha trabajado con el Centro Internacional de la Papa (CIP), Cornell University y la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) de las Naciones Unidas. Ha sido asesor técnico en varias fundaciones privadas que apoyan la agroecología y es cofundador de diferentes iniciativas de desarrollo rural, incluyendo la Asociación Nacional para el Fomento de la Agroecología de Honduras (ANAFAE), el Colectivo Agroecológico de Ecuador y una red de organizaciones dedicadas

al desarrollo rural centrado en la gente, Groundswell Internacional, con sede en los EE. UU. Sus actuales investigaciones se enfocan en la incertidumbre creciente asociadas con la modernización en la agricultura y los alimentos. Últimamente está dedicado a avanzar en la práctica de la agricultura regenerativa, sobre todo en los movimientos agroecológicos en la región. Ha publicado más de 100 artículos académicos y divulgativos sobre diferentes aspectos de los procesos sociales e institucionales de cambio en las familias y sus hogares, tanto como las instituciones de ciencia, desarrollo y gobierno. Con su esposa son propietarios de la Granja Urkuwayku, una finca familiar orgánica en el volcán Ilaló (valle de Los Chillos), donde son activos en diferentes movimientos rurales y de consumidores.

Correo electrónico: ssherwood@ekorural.org

Petr Sklenář

Estudió y obtuvo su maestría (1994) y doctorado (2000) en Botánica en la Universidad Carolina de Praga, República Checa. Su tesis doctoral fue un estudio de la ecología vegetal de los superpáramos del Ecuador con apoyo de la Universidad de Aarhus, Dinamarca y la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Desde entonces, ha estado involucrado en varios proyectos en los Andes ecuatoriales y zonas templadas con enfoque en filogenia, fitogeografía y ecología de las plantas altoandinas. Como resultado de su beca de postdoctorado, otorgada por la NSF-NATO en el Jardín Botánico de Nueva York (NYBG), publicó, junto con varios coautores, una guía ilustrada de las plantas altoandinas: *Flora Genérica de los Páramos*. Además, ha publicado más de 40 artículos en revistas internacionales con varios temas sobre la flora y ecología de plantas alpinas y altoandinas y ha descubierto y descrito algunas especies de plantas nuevas para la ciencia. Es profesor asociado de Botánica en la Facultad de Ciencias de la Universidad Carolina, donde ha dirigido más de 20 tesis de licenciatura, maestría y doctorado.

Correo electrónico: petr.sklenar@natur.cuni.cz

Carmen Ulloa Ulloa

Estudió biología en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador y recibió su Ph. D. de la Universidad de Aarhus, Dinamarca. Ha hecho toda su carrera profesional en el Missouri Botanical Garden, donde es curadora de botánica. Su investigación se centra en plantas de los páramos y los bosques andinos, en proyectos de colaboración internacional y con colegas en varias instituciones ecuatorianas. Recientemente coordinó la compilación de la lista de plantas vasculares de las Américas y es la editora principal del proyecto *Flora Mesoamericana*. Es autora de numerosos artículos y libros, y ha descubierto y descrito varias especies de plantas nuevas para la ciencia. Imparte cursos sobre plantas andinas, nomenclatura

botánica y edición científica, y ha guiado a estudiantes de pregrado y posgrado. Fue becaria Prometeo, es vicepresidenta de la Academia de Ciencias del Ecuador (2022-2025) y miembro de varias sociedades botánicas internacionales; además, forma parte del Scientific Panel for the Amazon (SPA) y es una National Geographic Explorer. En 2020 recibió la Condecoración Eugenio Espejo por parte del Concejo Metropolitano de Quito por sus contribuciones a las ciencias biológicas; recientemente fue elegida como uno de los miembros distinguidos de la International Biogeography Society 2022.

Correo electrónico: carmen.ulloa@mobot.org

Francisco J. Vasconez Paredes

Es estudiante de doctorado de la Universidad de Bristol (Reino Unido) e investigador del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (Ecuador). Estudió geología en la Escuela Politécnica Nacional donde recibió el título de ingeniero geólogo. Realizó diplomados en EE. UU. y Suiza sobre la vigilancia de volcanes activos y la cuantificación y manejo de riesgos geológicos y climáticos, respectivamente. Actualmente realiza un doctorado a distancia como parte del proyecto internacional Tomorrow's Cities, cuyo tema de investigación es la cuantificación y la simulación numérica de flujos de lodo y escombros. Además, tiene diez años de experiencia como investigador del Instituto Geofísico, con énfasis en el análisis de imágenes satelitales, simulación numérica de fenómenos volcánicos y cartografía. Es autor y coautor de 15 artículos en revistas científicas internacionales, así como de seis mapas de peligros volcánicos.

Correo electrónico: fjvasconez@igepn.edu.ec

Galo Zapata Ríos

Estudió Biología en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador donde obtuvo su licenciatura. Cursó una maestría en ciencias ambientales y biología de la conservación en Ohio University y obtuvo su título de Ph. D. en ecología y conservación de fauna silvestre en la University of Florida (Estados Unidos). Es Director Científico de Wildlife Conservation Society (WCS) en el Ecuador desde 2014; ha trabajado con WCS desde 2001. Ha estado involucrado en una serie de proyectos de investigación y conservación, incluyendo manejo comunitario de fauna silvestre, monitoreo de fauna silvestre a escala de paisaje, evaluación del impacto de especies invasoras, facilitación de la coexistencia entre la gente y la fauna silvestre, y la preparación de planes de acción para especies amenazadas. Ha escrito una variedad de artículos científicos en revistas de mastozoología, ecología y conservación.

Correo electrónico: gzapata@wcs.org

Referencias

- Acevedo D., Llambí, L.D. y Parra, L. (2019). El conflicto entre la producción de agua y la ganadería en los páramos: cercado comunitario de los humedales como alternativa de conservación. En Primack RB y Vidal O (Ed.). *Introducción a la Biología de la Conservación*. Fondo de Cultura Económica. p. 432-436.
- Achene, L., Ferretti, E., Lucentini, L. et al. (2010). Arsenic content in drinking-water supplies of an important volcanic aquifer in central Italy. *Toxicological & Environmental Chemistry* 92: 509-520.
- Acosta-Solís, M. (1968). *Divisiones fitogeográficas y formaciones geobotánicas del Ecuador*. Publicaciones Científicas de la Casa de la Cultura Ecuatoriana.
- Acosta-Solís, M. (1984). *Los páramos andinos del Ecuador*. Publicaciones Científicas M.A.S.
- Acosta, A. (2006). *Breve historia económica del Ecuador*. Corporación Editora Nacional.
- Adler, C., Wester, P., Bhatt, I. et al. (2022). Cross-Chapter Paper 5: Mountains. En Pörtner HO, Roberts DC, Tignor M et al (Ed.). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. P. 2273-2318.
- Aguilar, D. A. (2022). Actividad minera en humedales altoandinos del Ecuador y la emisión de dióxido de carbono. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad* 5.
- Aguirre, W. E., Álvarez-Mieles, G., Anaguano-Yancha, F. et al. (2021). Conservation threats and future prospects for the freshwater fishes of Ecuador: A hotspot of Neotropical fish diversity. *Journal of Fish Biology* 99(4): 1158-1189.
- Aide, T. M. y Grau, H. R. (2004). Globalization, Migration, and Latin American Ecosystems. *Science* 305: 1915-1916.
- Aide, T. M., Clark, M. L., Grau, H. R. et al. (2013). Deforestation and Reforestation of Latin America and the Caribbean (2001-2010). *Biotropica* 45: 262-271.
- Al-Shehbaz, I. A. y Sklenář, P. (2010). *Draba longiciliata* sp. nov. Brassicaceae from Ecuador. *Nordic Journal of Botany* 285: 528-529.
- Albarracín-Zaidiza, J. A., Fonseca-Carreño, N. E. y López-Vargas, L. H. (2019). Las prácticas agroecológicas como contribución a la sustentabilidad de los agroecosistemas. Caso provincia del Sumapaz. *Ciencia y Agricultura* 16: 39-55.
- Albuja, L., Almendáriz, A., Barriga, R. et al. (2012). *Fauna de Vertebrados del Ecuador*. Instituto de Ciencias Biológicas, Escuela Politécnica Nacional.
- Alcamo, J. (2019). Water quality and its interlinkages with the Sustainable Development Goals. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 36: 126-140.
- Alexiades, A. V., y Encalada, A. C. (2017). Distribution and habitat suitability of Andean climbing catfish in the Napo River basin, Ecuador. *Tropical Conservation Science* 10: 194008291770959.
- Allen, G. H. y Pavelsky, T. M. (2018). Global extent of rivers and streams. *Science*, eaat0636.
- Allen, G. H., Pavelsky, T. M. Barefoot, E. A. et al. (2018). Similarity of stream width distributions across headwater systems. *Nature Communications*, 9(1), 610.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO.
- Alvarado-Serrano, D. F. y D'Elia, G. (2013). A new genus for the Andean mice *Akodon latebricola* and *A. bogotensis* (Rodentia: Sigmodontinae). *Journal of Mammalogy*. 94(5): 995-1015.
- Amori, G., Chiozza, F., Patterson, B. D. et al. (2013). Species richness and distribution of Neotropical rodents, with conservation implications. *Mammalia* 77(1): 1-19.

- An, H. (2004). Microeconomic effects of macroeconomic policy changes in Ecuador: potato production after dollarization. *Guelph: Department of Agricultural Economics and Business*, University of Guelph.
- Anaguano-Yancha, F. (2018). Nuevos casos de leucismo en peces andinos del género *Astroblepus*. *Avances en Ciencias e Ingenierías*. 10(1): 146.
- Andermann, T., Faurby, S., Turvey, S. T. et al. (2020). The past and future human impact on mammalian diversity. *Science Advances* 6(36): eabb2313.
- Anderson, E. P. y Maldonado-Ocampo, J. A. (2011). A regional perspective on the diversity and conservation of tropical Andean fishes: fishes of the tropical Andes. *Conservation Biology* 25(1): 30-39.
- Andrade, J. M., Escobar, G. M. y Paredes, D. F. (2019). Análisis en Flujo Permanente de los Factores que Inciden en la Disminución de la Capacidad Hidráulica de la Línea de Conducción del Sistema La Mica-Quito Sur. *INGENIO* 2: 46-57.
- Andrén, H. (1994). Effects of habitat fragmentation on birds and mammals in landscapes with different proportions of suitable habitat: a review. *Oikos* 71(3): 355-366.
- Ansaloni, R., Sevillano, J. I., Vázquez, J. A. y Minga, D. (2022). Analysis of the páramo vascular flora in the Cajas National Park Central Andes, Ecuador. *Mediterranean Botany* 43: 23.
- Anthelme, F., Carrasquer, I., Ceballos, J. L. y Peyre, G. (2022). Novel plant communities after glacial retreat in Colombia: (many) losses and (few) gains. *Alpine Botany* 132: 211-222.
- Anthelme, F., Cauvy-Fraunié, S., Francou, B. et al. (2021). Living at the edge: increasing stress for plants 2-13 years after the retreat of a tropical Glacier. *Frontiers in Ecology and Evolution* 9: 584872.
- Anthelme, F., Jacobsen, D., Macek, P. et al. (2014). Biodiversity patterns and continental insularity in the tropical high Andes. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 46(4): 811-828.
- April-Lalonde, G., Latorre, S., Paredes, M. et al. (2020). Characteristics and Motivations of Consumers of Direct Purchasing Channels and the Perceived Barriers to Alternative Food Purchase: A Cross-Sectional Study in the Ecuadorian Andes. *Sustainability* 12: 6923. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Arce, A., Sherwood, S. y Paredes, M. (2015). Repositioning food sovereignty: Between Ecuadorian nationalist and cosmopolitan Politics. En Trauger, A (Ed.). *Food Sovereignty in Geographical Context: Discourse, Politics and Practice in Place*. Routledge.
- Argerich, A., Haggerty, R., Johnson, S.L. et al. (2016). Comprehensive multiyear carbon budget of a temperate headwater stream, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 121(5), 1306-1315.
- Arismendi, I., Penaluna, B., Gómez-Uchida, D. et al. (2019). Trout and char of South America. En Kershner J L, Williams J E, Gresswell R E, Lobón-Cerviá J (Ed.). *Trout and Char of the World*. American Fisheries Society.
- Ariza-Montobbio, P. y Cuví, N. (2020). Ecosystem-based Adaptation in Ecuador: Good Practices for Adaptive Co- Management. *Ambiente e Sociedade* 23.
- Arízaga-Ildrovo, V., Pesántez, J., Birkel, C., Peña, P., Mora, E. y Crespo, P. (2022). Characterizing solute budgets of a tropical Andean páramo ecosystem. *Science of The Total Environment* 835: 155560.
- Arnalds, Ó. (2013). *The influence of volcanic tephra (ash) on ecosystems*. *Advances in Agronomy*. 1st ed., Vol. 121. Elsevier.
- Arnalds, O. y Stahr, K. (2004). Volcanic soil resources: occurrence, development, and properties. *Catena*. 56: 1-2.

- Arzac, A., Llambí, L. D., Dulhoste, R. et al. (2019). Modeling the effect of temperature changes on plant life-form distribution in a treeline ecotone of the tropical Andes. *Plant Ecology and Diversity* 12(6): 619-632.
- Asamblea Nacional. (2021). Resolución RL-2019-2021-097. Declaratoria de la Asamblea Nacional 23 de junio «Día Nacional de los Páramos».
- Aspden, J. A. y Litherland, M. (1992). The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador. *Tectonophysics* 205(1-3): 187-204.
- Astudillo, P. X., Barros, S., Siddons, D. C. y Zárate, E. (2018). Influence of habitat modification by livestock on paramo bird abundance in southern Andes of Ecuador. *Studies on Neotropical Fauna and Environment* 53(1): 29-37.
- Athens, J. S. (1980). *El proceso evolutivo de las sociedades complejas y la ocupación del periodo tardío Cara en los Andes septentrionales del Ecuador*. IOA Pendoneros.
- Aufdenkampe, A. K., Mayorga, e., Raymond, P.A. et al. (2011). Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(1), 53-60
- Auqui, F. (2016). *Microverticalidad, poder y mercado en los Andes Equinocciales*. Tesis de Maestría. FLACSO.
- Ávalos, V. R. y Hernández, J. (2015). Projected distribution shifts and protected area coverage of range-restricted Andean birds under climate change. *Global Ecology and Conservation* 4: 459-469.
- Ayers, J. y Forsyth, T. (2009). Community-Based Adaptation to Climate Change. Environment. *Science and Policy for Sustainable Development* 51(4): 22-31.
- Bablon, M., Quidelleur, X., Samaniego, P. et al. (2019). Interactions between volcanism and geodynamics in the southern termination of the Ecuadorian arc. *Tectonophysics* 751: 54-72.
- Bablon, M., Quidelleur, X., Samaniego, P. et al. (2020). Volcanic history reconstruction in northern Ecuador: insights for eruptive and erosion rates on the whole Ecuadorian arc. *Bulletin of Volcanology* 82(1): 11.
- Bader, M. Y. (2007). *Tropical alpine treelines: how ecological processes, control vegetation patterns and dynamics*. Tesis de Ph. D.. Wageningen University.
- Bader, M. Y. y Ruijten, J. J. A. (2008). A topography-based model of forest cover at the alpine tree line in the tropical Andes. *Journal of Biogeography* 35: 711-723.
- Bader, M. Y., Llambí, L. D., Case, B. D. et al. (2021). A global framework for linking alpine-treeline ecotone patterns to underlying processes. *Ecography* 43: 1-28.
- Bader, M. Y., Rietkerk, M. y Bregt, A. (2008). A simple spatial model exploring the positive feedbacks at tropical alpine treelines. *Arctic and Antarctic Alpine Research* 40(2): 269-278.
- Bader, M. Y., van Geloof, I. y Rietkerk, M. (2007). High solar radiation hinders tree regeneration above the alpine treeline in northern Ecuador. *Plant Ecology* 191: 33-45.
- Báez, S., Jaramillo, L., Cuesta, F. y Donoso, D. A. (2016). Effects of climate change on Andean biodiversity: a synthesis of studies published until 2015. *Neotropical Biodiversity* 2(1): 181-194.
- Bais, H. P., Weir, T. L., Perry, L. G. et al. (2006). The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. *Annual Review of Plant Biology* 57: 233-266.
- Bakker, J., Moscol-Olivera, M. y Hooghiemstra, H. (2008). Holocene environmental change at the upper forest line in northern Ecuador. *The Holocene* 18(6): 877-893.

- Banco Central del Ecuador. (2022). *Boletín del Sector Minero. Resultados al primer trimestre del 2022*.
- Barba, D., Robin, C., Samaniego, P. y Eissen, J. P. (2008). Holocene recurrent explosive activity at Chimborazo volcano (Ecuador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 176(1): 27-35. ç
- Barberi, F., Coltelli, M., Ferrara, G. et al. (1988). Plio-quaternary volcanism in Ecuador. *Geological Magazine* 125(1): 1-14.
- Barragán, L. y Núñez, M. (2006). *El secreto para una larga vida*. El Grupo de Trabajo en Páramos del Ecuador. Serie Páramo 22.
- Barriga, R. S. (2012). Lista de peces de agua dulce e intermareales del Ecuador. *Politécnica* 30: 83-119.
- Barriga, R. S. y Terneus, E. (2005). Primer hallazgo de una población paleoendémica del pez *Grundulus* cf. *bogotensis* (Humboldt, 1821) en los altos Andes del Ecuador. *Politécnica* 26: 1-13.
- Barsky, O. (1988). *La Reforma Agraria en Ecuador*. Corporación Editora Nacional.
- Barsky, O. y Cosse, G. (1981). *Tecnología y Cambio Social: Las Haciendas Lecheras del Ecuador*. FLACSO.
- Basantes, T., Aragón, J., Albuja, L. y Vázquez, L. (2020). Diagnóstico de los costos, rendimientos de producción y comercialización de papa (*Solanum tuberosum* L.) en la Zona 1 del Ecuador, año 2019. *Revista e-Agronegocios*, 6(2): 103-120.
- Basile, A., Mele, G. y Terribile, F. (2003). Soil hydraulic behaviour of a selected benchmark soil involved in the landslide of Sarno 1998. *Geoderma* 117: 331-346.
- Batjes, N. H. (1996). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Sciences* 47(2): 151-163.
- Bazarov, D., Markova, I., Norkulov, B. et al. (2020). *Operational efficiency of water damless intake*. P. 072051 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing.
- Bastviken, D., Tranvik, L.J., Downing, J.A et al. (2011). Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink. *Science*, 331(6013), 50-50.
- Battin, T. J., Luysaert, S., Kaplan, L.A. et al. (2009). The boundless carbon cycle. *Nature Geoscience*, 2(9): 598.
- Becker, M. y Tutillo, S. (2009). *Historia Agraria y Social de Cayambe*. FLACSO y Ediciones Abya Yala.
- Beckers, B., Berking, J. y Schütt, B. (2013). Ancient water harvesting methods in the drylands of the Mediterranean and Western Asia. *eTopoi Journal for Ancient Studies* 2: 145-164.
- Beltrán, K. (2018). *Effects of Climate Change on Key Ecosystem Services provided by the Ecuadorian Páramo Ecosystems*. (Tesis de Ph. D.). University of York.
- Beltrán, K., Salgado, S., Cuesta, F. et al. (2009). *Distribución espacial, sistemas ecológicos y caracterización florística de los páramos en el Ecuador*. EcoCiencia, Proyecto Páramo Andino, Herbario QCA.
- Bennett, E. L. y Robinson, J. G. (2000). Hunting for the snark. En Robinson J G, Bennett E L (Ed.). *Hunting for Sustainability in Tropical Forests*. Columbia University Press. P.1-9.
- Benstead, J. P. y Leigh, D. S. (2012). An expanded role for river networks. *Nature Geoscience*, 5(10), 678.
- Bernard, B. y Andrade, D. (2011). *Volcanes Cuaternarios del Ecuador Continental*. IGEPN Póster Informativo.

- Bernard, B., Battaglia, J., Proaño, A. et al. (2016). Relationship between volcanic ash fall-outs and seismic tremor: quantitative assessment of the 2015 eruptive period at Cotopaxi volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology* 78(11): 80.
- Bernard, B., Samaniego, P. y Encalada Simbaña, M. (2021). Forecasting the dispersion and fallout of volcanic ash during a crisis: Assessment of the September 20, 2020 eruption at Sangay volcano in Ecuador. En Abstract volume of the 2021 EGU General Assembly. Vol. EGU21-13871. Copernicus Meetings. [consultado el 4 de febrero de 2021]. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU21/EGU21-13871.html>.
- Bernard, B., Samaniego, P., Mastin, L. et al. (2022). Forecasting and communicating the dispersion and fallout of ash during volcanic eruptions: lessons from the September 20, 2020 eruptive pulse at Sangay volcano, Ecuador. *Frontiers in Earth Science* 10: 912835.
- Berrones, G. (2022). *Fog in the Andean páramo: measurements, dynamics, and its influence on soil hydrology and evapotranspiration processes*. Tesis. Universidad de Cuenca.
- Berrones, G., Crespo, P., Ochoa-Sánchez, A., Wilcox, B. P. y Célieri, R. (2022). Importance of Fog and Cloud Water Contributions to Soil Moisture in the Andean Páramo. *Hydrology* 9: 54.
- Berrones, G., Crespo, P., Wilcox, B. P. et al. (2021). Assessment of Fog Gauges and Their Effectiveness in Quantifying Fog in the Andean Páramo. *Ecohydrology*: e2300.
- Blaustein, A. (1994). Chicken little or Nero's fiddle? A perspective on declining amphibian populations. *Herpetologica* 50(1): 85-97.
- Blaustein, A. y Johnson, P. (2003). The complexity of deformed amphibians. *Frontiers in Ecology and Environment* 1(2): 87-94.
- Boelens, R. y Seemann, M. (2014). Forced engagements: Water security and local rights formalization in Yanque, Colca Valley, Peru. *Human Organization* 73(1): 1-12.
- Boelens, R., Hoogesteger, J. y Rodríguez de Francisco, J. C. (2014). Commoditizing water territories: The clash between Andean water rights cultures and payment for environmental services policies. *Capitalism Nature Socialism* 25(3): 84-102.
- Bonacic, C., Amaya-Espinel, J. D. e Ibarra, J. T. (2016). Human-wildlife conflicts: an overview of cases and lessons from the Andean Region. En Aguirre A A, Sukumar R (Ed.). *Tropical Conservation: perspectives on local and global priorities*. Oxford University Press. P.109-125.
- Bonadonna, C., Costa, A., Folch, A. y Koyaguchi, T. (2015). Tephra Dispersal and Sedimentation. En *The Encyclopedia of Volcanoes*. Elsevier. P. 587-597. [Consultado el 22 de mayo de 2016]. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978012385938900033X>.
- Boom, A., Mora, G., Cleef, A. M. y Hooghiemstra, H. (2001). High altitude C4 grasslands in the northern Andes: relicts from glacial conditions? *Review of Palaeobotany and Palynology* 115(3-4): 147-160.
- Borgia, A., Aubert, M., Merle, O. y Vries, B. van W de. (2010). What is a volcano? *Geological Society of America Special Paper*. 470: 1-9.
- Borja, P., Iñiguez, V., Crespo, P. et al. (2008). *Caracterización hidráulica de Andosoles e Histosoles del austro del Ecuador*. XI Congreso Ecuatoriano de Ciencias del Suelo: 1-10.
- Bradley, R. S., Vuille, M., Díaz, H. F. y Vergara, W. (2006). Threats to water supplies in the tropical Andes. *Science* 312(5781): 1755-6.
- Bray, T. L. (1992). Archaeological Survey in Northern Highland Ecuador: Inca Imperialism and the Pais Caranqui. *World Archaeology* 24: 218-233.

- Bray, T. y Echeverría, J. (2014). Al final del Imperio: el sitio arqueológico Inca-Caranqui en la Sierra septentrional del Ecuador. *Antropología Cuadernos de Investigación* 13: 127-150.
- Briffa, J., Sinagra, E. y Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon* 6 (9): e04691.
- Bristow, C. R. (1973). *Guide to the geology of the Cuenca Basin, southern Ecuador*. Ecuadorian Geological and Geophysical Society.
- Brito, J. y Fernández de Córdova, J. (2016). Nuevas localidades y ampliación de la distribución del cuy silvestre de Patzelt *Cavia patzelti* (Rodentia: Caviidae) en Ecuador. *Mastozoología Neotropical* 23(1): 157-163.
- Brito, J., Tinoco, N., Curay, J. et al. (2019). Diversidad insospechada en los Andes de Ecuador: filogenia del grupo "cinereus" de *Thomasomys* y descripción de una nueva especie (Rodentia, Cricetidae). *Mastozoología Neotropical* 26(2): 308-330.
- Brumfield, R. T. y Edwards, S. V. (2007). Evolution into and out of the Andes: a Bayesian analysis of historical diversification in *Thamnophilus* antshrikes. *Evolution* 61(2): 346-367.
- Brunschön, C. y Behling, H. (2010). Reconstruction and visualization of upper forest line and vegetation changes in the Andean depression region of southeastern Ecuador since the last glacial maximum - A multi-site synthesis. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 163: 139-152.
- Bueno, A. y Llambí, L. D. (2015). Facilitation and edge effects influence vegetation regeneration in old-fields at the tropical Andean forest-line. *Applied Vegetation Science* 18(4): 613-623.
- Buitrago-Suárez, U. A., Mojica Corzo, J. I. y Bonneau, L. K. (2015). Habitat perturbation and survival strategies of the Andean catfish *Astroblepus mariae* (Fowler, 1919). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 39(150): 36-41.
- Butcher, S., Bell, A. F., Hernandez, S. y Ruiz, M. (2021). Evolution of Seismicity During a Stalled Episode of Reawakening at Cayambe Volcano, Ecuador. *Frontiers in Earth Sciences* 9: 1-20.
- Butman, D. y Raymond, P.A. (2011). Significant efflux of carbon dioxide from streams and rivers in the United States. *Nature Geoscience*, 4(12), 839.
- Buytaert, W. y Bièvre, B. de. (2012). Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes. *Water Resources Research* 48(8): 1-13.
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B. et al. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth Science Reviews* 79: 53-72.
- Buytaert, W., Céleri, R., Timbe, L. (2009). Predicting climate change impacts on water resources in the tropical Andes: Effects of GCM uncertainty. *Geophysical Research Letters* 36:n/a-n/a.
- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P. et al. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the South Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology* 329: 413-421.
- Buytaert, W., Cuesta-Camacho, F. y Tobón, C. (2011). Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Global Ecology and Biogeography* 20(1): 19-33.
- Buytaert, W., De Bièvre, B., Wyseure, G. y Deckers, J. (2004). The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land use on the hydrology of catchments in the Andes. *Hydrology and Earth System Sciences* 8: 108-114.

- Buytaert, W., Deckers, J. y Wyseure, G. (2007). Regional variability of volcanic ash soils in south Ecuador: The relation with parent material, climate and land use. *Catena* 70(2): 143-154.
- Buytaert, W., Deckers, J., Wyseure, G. (2006c). Description and classification of non-allophanic Andosols in south Ecuadorian alpine grasslands (páramo). *Geomorphology* 73(3-4): 207-221.
- Buytaert, W., Iñiguez, V. y Bièvre, B. de. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *Forest Ecology and Management* 251: 22-30.
- Buytaert, W., Iñiguez, V., Célleri, R. et al. (2006). Analysis of the Water Balance of Small Páramo Catchments in South Ecuador. En Krecek J. y Haigh M (Ed.). *Environmental Role of Wetlands in Headwaters. NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences*, vol 63. Springer.
- Buytaert, W., Vuille, M., Dewulf, A. et al. (2010). Uncertainties in climate change projections and regional downscaling in the tropical Andes: Implications for water resources management. *Hydrology and Earth System Sciences* 14: 1247-1258.
- Buytaert, W., Wyseure, G., De Bièvre, B. y Deckers, J. (2005). The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrological Processes* 19(20): 3985-3997.
- Cabezas, R. y Castellano-Jara, F. (2022). Altos costos de producción de papa en Ecuador, desde la pandemia del COVID-19, obligan a cambiar de línea de negocio en Carchi. *El Universo*. Disponible en <https://www.eluniverso.com/noticias/ecuador/altos-costos-de-produccion-de-papa-en-ecuador-desde-la-pandemia-del-covid-19-obligan-a-cambiar-de-linea-de-negocio-en-carchi-nota/> (consultado el 7 de abril de 2023).
- Cabrera-Balarezo, J. J., Sucozhañay-Calle, A. E., Crespo-Sánchez, P. J. y Timbe-Castro, L. M. (2022). Applying hydrological modeling to unravel the effects of land use change on the runoff of a paramo ecosystem. *DYNA* 89: 68-77.
- Cabrera, O., Aguirre, Z. y Maza, B. (2001). *Planificación para la conservación de sitios*. Páramos del Parque Nacional Podocarpus, Fundación ecológica Arcoiris y The Nature Conservancy.
- Cabrera, S., López, M. y Tartarotti, B. (1997). Phytoplankton and zooplankton response to ultraviolet radiation in a high-altitude Andean lake: short- versus long-term effects. *Journal of Plankton Research* 19(11): 1565-1582.
- Caiza, J. C., Corredor, D., Galárraga, C. et al. 2021. Geometry morphometrics of plant structures as a phenotypic tool to differentiate *Polylepis incana* Kunth. and *Polylepis racemosa* Ruiz & Pav. reforested jointly in Ecuador. *Neotropical Biodiversity* 7: 121-134.
- Calderón-Loor, M., Cuesta, F., Pinto, E. y Gosling, W. D. (2020). Carbon sequestration rates indicate ecosystem recovery following human disturbance in the equatorial Andes. *PLoS One*. 15(3): 1-23.
- Calderón-Loor, M., Romero-Saltos, H., Cuesta, F. et al. (2013). *Monitoreo de contenidos y flujos de carbono en gradientes altitudinales altoandinos*. Protocolo 1 - Versión 1. CONDESAN/COSUDE.
- Calispa, M., van Ypersele, R., Pereira, B. et al. (2021). Soil organic carbon stocks under different páramo vegetation covers in Ecuador's northern Andes. EGU General Assembly 2021, online, 19-30 Apr 2021, EGU21-4121
- Calpa-Anaguano, E. V., Graham, C. H. y da Silva, F. R. (2021). Pleistocene climate oscillations and habitat connectivity contributed to avian beta-diversity in the megadiverse Colombian paramo ecosystems. *Journal of Biogeography* 48(12): 3004-3015.

- Camuñez, J. A. y Lomas, K. R. (2020). The Inca Trail (Qhapac Ñan) as a Contribution to Sustainable Tourism in Ecuador. En *Technology, Sustainability and Educational Innovation (TSIE)*. Springer. P. 406-420.
- Cañadas, L. (1983). *El Mapa Bioclimático y Ecológico del Ecuador*. MAG-PRONAREG.
- Cárdenas, M. F., Tobón, C. y Buytaert, W. (2017). Contribution of occult precipitation to the water balance of páramo ecosystems in the Colombian Andes. *Hydrological Processes* 31: 4440-4449.
- Carrillo-Rojas, G., Silva, B., Rollenbeck, R. et al. (2019). The breathing of the Andean highlands: Net ecosystem exchange and evapotranspiration over the paramo of southern Ecuador. *Agricultural and Forest Meteorology* 265: 30-47.
- Carrillo, J. D., Forasiepi, A., Jaramillo, C. y Sánchez-Villagra, M. R. (2015). Neotropical mammal diversity and the Great American Biotic Interchange: spatial and temporal variation in South America's fossil record. *Frontiers in Genetics* 5: 451.
- Cartagena, Y., López, M., Reinoso, I. y Córdova, J. (2003). *Huacho rozado: evaluación y fortalecimiento de un sistema de labranza reducida en papa*. Informe Final Proyecto INIAP-PROMSA IQCV-067. INIAP. P. 152.
- Cartwright, I. y Morgenstern, U. (2015). Transit times from rainfall to baseflow in headwater catchments estimated using tritium: the Ovens River, Australia. *Hydrology and Earth System Sciences* 19: 3771-3785.
- Carvajalino-Fernández, J. M., Bonilla Gómez, M. A., Giraldo-Gutiérrez, L. y Navas, C. A. (2021). Freeze tolerance in Neotropical frogs: an intrageneric comparison using *Pristimantis* species of high elevation and medium elevation. *Journal of Tropical Ecology* 37(3): 118-125.
- Cas, R. A. F. y Wright, J. V. (1996). *Volcanic successions: modern and ancient: a geological approach to processes, products and successions*. Chapman & Hall.
- Castiglione, G. M., Hauser, F. E., Liao, B. S. et al. (2017). Evolution of nonspectral rhodopsin function at high altitudes. *PNAS* 114(28): 7385-7390.
- Castino, F. y Bookhagen, B., Strecker, M. R. (2017). Oscillations and trends of river discharge in the southern Central Andes and linkages with climate variability. *Journal of Hydrology* 555: 108-124.
- Castro, M. (2011). Proyecto "Creación de Capacidades para la Valoración Socioeconómica de los humedales altoandinos": Una valoración económica del almacenamiento de agua y carbono en los bofedales de los páramos ecuatorianos. La experiencia en Oña-Nabón-Saraguro-Yacuambi y el Frente Suroccidental de Tungurahua. EcoCiencia/Wetlands International/UTPL/MAE.
- Caulfield, M. (2019a). *Piecing together complexity: the co evolution of agroecosystem patterns, and natural resource management*. Ph.D. Dissertation, Farming Systems Ecology. Wageningen University.
- Caulfield, M. E., Fonte, S. J., Groot, J. C. J. et al. (2020). Agroecosystem patterns and land management co-develop through environment, management, and land-use interactions. *Ecosphere* 11: e03113.
- Caulfield, M., Bouniol, J., Fonte, S. J. y Kessler, A. (2019). How rural out-migrations drive changes to farm and land management: A case study from the rural Andes. *Land Use Policy* 81: 594-603.
- Caulfield, M., Groot, J. C. J., Fonte, S. J. et al. (2020). Live barriers and associated organic amendments mitigate land degradation and improve crop productivity in hillside agricultural systems of the Ecuadorian Andes. *Land Degradation & Development* 31: 1650-1661.

- Cauvy-Fraunié, S., Andino, P., Espinosa, R. et al. (2016). Ecological responses to experimental glacier-runoff reduction in alpine rivers. *Nature Communications* 7: 12025.
- Cauvy-Fraunié, S., Espinosa, R., Andino, P. et al. (2014). Relationships between stream macroinvertebrate communities and new flood-based indices of glacial influence. *Freshwater Biology* 59: 1916-1925.
- Céleri, R. y Feyen, J. (2009). The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems: Importance, Knowledge Status, and Perspectives. *Mountain Research and Development* 29: 350-355.
- Celleri, R., Willems, P., Buytaert, W. y Feyen, J. (2007). Space-time rainfall variability in the Paute basin, Ecuadorian Andes. *Hydrological Processes* 21: 3316-3327.
- Chamorro, A. (2020). Expanding the Green Revolution to Small farmers in Ecuador (1970-1990s). *Études rurales* 205: 162-181.
- Chapman, F. (1926). The distribution of bird-life in Ecuador. A contribution to the study of the origin of Andean bird-life. Bulletin of the. *American Museum of Natural History* 55: 1-784.
- Charbonnier, S. J., Germa, A., Connor, C. B. et al. (2013). Evaluation of the impact of the 2010 pyroclastic density currents at Merapi volcano from high-resolution satellite imagery, field investigations and numerical simulations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 261: 295-315.
- Chávez-Caiza, J. P. y Burbano-Rodríguez, R. T. (2021). Cambio climático y sistemas de producción agroecológica, orgánica y convencional en los cantones Cayambe y Pedro Moncayo. *Letras Verdes* 20: 149-166.
- Churchman, J. G. y Lowe, D. J. (2012). Alteration, Formation, and Occurrence of Minerals in Soils. In: Huang PM, Y. L., Sumner ME (Ed.). *Handbook of Soil Sciences*. CRC Press.
- Cisneros, I. I. (1987). Guanguilquí: el agua para los runas. *Ecuador Debate* 14: 161-182.
- Cleef, A. (1981). The vegetation of the páramos of the Colombian Cordillera Oriental. *Mededelingen van het Botanisch Museum en Herbarium van de Rijksuniversiteit te Utrecht* 4811: 1-320.
- Código Civil. (2005). Codificación publicada en el Suplemento al Registro Oficial 46 del 24 de junio de 2005 (incluye la última reforma del 8 de julio de 2019).
- Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización. (2010). Suplemento del Registro Oficial 303 de 19 de octubre de 2010 (incluye la última modificación del 16 de enero de 2015).
- Código Orgánico del Ambiente. (2017). Suplemento del Registro Oficial 983 de 12 de abril de 2017.
- Coira, B., Davidson, J., Mpodozis, C. y Ramos, V. (1982). Tectonic and magmatic evolution of the Andes of northern Argentina and Chile. *Earth-Science Reviews* 18(3-4): 303-332.
- Collot, J. Y., Sanclemente, E., Nocquet, J. M. et al. (2017). Subducted oceanic relief locks the shallow megathrust in central Ecuador. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 122(5): 3286-3305.
- Colmet-Daage, F., Cucalón, F., Delaune, M. et al. (1973). *Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques*. Parties 1 a 4. ORSTOM.
- Coloma, L. A. (2016). El Jambato negro del páramo, *Atelopus ignescens*, resucitó. Disponible en: <http://otonga.org/el-jambato-negro-del-paramo-atelopus-ignescens-resucito/>.
- Comas, X., Terry, N., Hribljan, J. A. et al. (2017). Estimating belowground carbon stocks in peatlands of the Ecuadorian páramo using ground-penetrating radar (GPR). *Journal of Geophysics Research Biogeosciences*. 122(2): 370-386.

- Constitución de la República del Ecuador. (2008). Registro Oficial 449 de 20 de octubre de 2008.
- Convenio de Ramsar. (1992). Registro Oficial 33 del 24 de septiembre de 1992.
- Coppus, J., Endara, L., Nonhebel, M. et al. (2001). El estado de salud de algunos páramos en el Ecuador: una metodología de campo. En Mena-Vásquez P, Medina G y Hofstede R (Ed.). *Los Páramos del Ecuador. Particularidades, problemas y perspectivas*. Abya Yala y Proyecto Páramo. P. 219-240.
- Córdova, M., Carrillo-Rojas, G., Crespo, P. et al. (2015). Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM). Method for Calculating Reference Evapotranspiration Using Limited Data. *Mountain Research and Development*, 35(3): 230-239.
- Corea, C., de la Aldea, E. y Lewkowicz, I. (2003). La comunidad, entre lo público y lo privado. *Campo Grupal* 2: 12-13.
- Correa, A., Breuer, L., Crespo, P. et al. (2019). Spatially distributed hydro-chemical data with temporally high-resolution is needed to adequately assess the hydrological functioning of headwater catchments. *Science of The Total Environment* 651: 1613-1626.
- Correa, A., Ochoa-Tocachi, B., Birkel, C. et al. (2020). A concerted research effort to advance the hydrological understanding of tropical páramos. *Hydrological Processes* 34(24): 4609-4627.
- Correa, A., Windhorst, D., Crespo, P. et al. (2016). Continuous versus event-based sampling: how many samples are required for deriving general hydrological understanding on Ecuador's páramo region? *Hydrological Processes* 30: 4059-4073.
- Correa, A., Windhorst, D., Tetzlaff, D. et al. (2017). Temporal dynamics in dominant runoff sources and flow paths in the Andean Páramo. *Water Resources Research*
- Corte Constitucional. (2022). Sentencia No 45-15-IN/22. Declaratoria de Inconstitucionalidad por la forma de la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua y su Reglamento.
- Cosse, G. (1980). Reflexiones acerca del estado, el proceso político y la política agraria en el caso ecuatoriano: 1964-1977. En Murmis M (Ed.). *Ecuador: Cambios en el Agro Serrano*. FLACSO y CEPLAES. P. 391-436.
- Costales, P. y Costales, A. (1971). *Reforma Agraria*. Editorial Casa de la Cultura.
- Coutêaux, M. M., Sarmiento, L., Bottner, P. et al. (2002). Decomposition of standard plant material along an altitudinal transect (65-3968 m) in the tropical Andes. *Soil Biology and Biochemistry* 34(1): 69-78.
- Couwenberg, J. y Fritz, C. (2012). Towards developing IPCC methane emission factors for peatlands (organic soils). *Mires & Peat*, 10.
- Crespo, P. (Coord.). (2012). *Puentes entre alturas - La sistematización del Proyecto Páramo Andino en Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú*. CONDESAN.
- Crespo, P. J., Feyen, J., Buytaert, W. et al. (2011). Identifying controls of the rainfall-runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *Journal of Hydrology* 407: 164-174.
- Crespo, P., Céleri, R., Buytaert, W. et al. (2010). Land use change impacts on the hydrology of wet Andean páramo ecosystems. *IAHS-AISH Publication*: 71-76.
- Cresso, M., Clerici, N., Sánchez, A. y Jaramillo, F. (2020). Future climate change renders unsuitable conditions for paramo ecosystems in Colombia. *Sustainability* 12(20): 1-13.
- Crissman, C. C., Espinosa, P., Ducrot, C. E. H. et al. (1998). The case study site: physical, health, and potato farming systems in Carchi Province. En Antle JM, Crissman CC y Capalbo SM (Ed.). *Economic, Environmental, and Health Tradeoffs in Agriculture: Pesticides and the Sustainability of Andean Potato Farming*. Kluwer Academic Publishers. P. 85-120

- Cuatrecasas, J. (1934). *Observaciones geobotánicas en Colombia*. Trabajos Museo Nacional Ciencias Naturales, Serie Botánica 27:1-144.
- Cuatrecasas, J. (1958). Aspectos de la vegetación natural de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas y Físicas* 10: 221-264.
- Cuatrecasas, J. (1968). Páramo vegetation and its life forms. *Colloquium Geographicum* 9: 163-186.
- Cuatrecasas, J. (1989). Frailejónal, típico cuadro de la vida vegetal en los páramos andinos. *Revista Academia Colombiana de Ciencias Exactas* 728: 457-461.
- Cuesta, F., Báez, S., Muriel, P. y Salgado, S. (2014). La vegetación de los páramos del Ecuador. *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos*: 105-143.
- Cuesta, F. et al. (s. f.). En prensa Compositional shifts of alpine plant communities across the high Andes. *Global Ecology and Biogeography*.
- Cuesta, F., Llambí, L. D., Huggel, C. et al. (2019). New land in the Neotropics: a review of biotic community, ecosystem and landscape transformations in the face of climate and glacier change. *Regional Environmental Change* 19(6): 1623-1642.
- Cuesta, F., Merino-Viteri, A., Muriel, P. et al. (2015). *Escenarios de impacto del cambio climático sobre la biodiversidad del Ecuador continental y sus implicaciones en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas Quito: Ministerio de Ambiente del Ecuador. CONDESAN*. Escuela de Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. P. 82.
- Cuesta, F., Muriel, P., Llambí, L. D. et al. (2017). Latitudinal and altitudinal patterns of plant community diversity on mountain summits across the tropical Andes. *Ecography* 40(12): 1381-1394.
- Cuesta, F., Salgado, S., Báez, S. et al. (2013a). *Rosetal caulescente y Herbazal del Páramo frailejones*. En Ministerio del Ambiente del Ecuador. Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental. Subsecretaría de Patrimonio Natural. P. 137-139.
- Cuesta, F., Salgado, S., Báez, S. et al. (2013b). *Bosque siempreverde del páramo*. En Ministerio del Ambiente del Ecuador. Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental. Subsecretaría de Patrimonio Natural. P. 132-134.
- Cuesta, F., Salgado, S., Báez, S. et al. (2013c). *Herbazal ultrahúmedo subnival del páramo*. En Ministerio del Ambiente del Ecuador. Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental. Subsecretaría de Patrimonio Natural. P. 151-153.
- Cuesta, F., Salgado, S., Báez, S. et al. (2013d). *Herbazal húmedo subnival del páramo*. En Ministerio del Ambiente del Ecuador. Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental. Subsecretaría de Patrimonio Natural. P. 149-151.
- Cuesta, F., Salgado, S., Báez, S. et al. (2013e). *Herbazal y Arbustal siempreverde subnival del páramo*. En Ministerio del Ambiente del Ecuador. Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental. Subsecretaría de Patrimonio Natural. P. 147-149.
- Cuesta, F., Tovar, C., Llambí, L. D. et al. (2020). Thermal niche traits of high alpine plant species and communities across the tropical Andes and their vulnerability to global warming. *Journal of Biogeography* 47(2): 408-420.
- Curiel Yuste, J. y Hereš, A. M., Ojeda, G. et al. (2017). Soil heterotrophic CO₂ emissions from tropical high-elevation ecosystems (Páramos) and their sensitivity to temperature and moisture fluctuations. *Soil Biology and Biochemistry* 110: 8-11.
- Dahlgren, R. A., Macías, F., Camps, M. et al. (2008). Andosols. En Chesworth W (Ed.). *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer. P. 39-46.

- Dahlgren, R. A., Saigusa, M. y Ugolini, F. C. (2004). The Nature, Properties and Management of Volcanic Soils. *Advances in Agronomy* 82: 113-182.
- Dahlgren, R., Shoji, S. y Nanzyo, M. (1993). *Mineralogical Characteristics of Volcanic Ash Soils. In: Volcanic Ash Soils. Genesis, properties and utilization*. Elsevier.
- Davidson, E. A. y Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* 440(7081): 165-173.
- Daza Torres, M. C., Hernández Flórez, F. y Triana, F. A. (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía* 67: 7189-7200.
- De Crop, W., Pauwels, E., Van Hoorebeke, L. y Geerinckx, T. (2013). Functional morphology of the Andean climbing catfishes (Astroblepidae, Siluriformes): alternative ways of respiration, adhesion, and locomotion using the mouth. *J. Morphol.* 274(10): 1164-1179.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J. et al. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 137(656): 553-597.
- Deleuze, G. y Guattari, F. (2000). *Anti-Edipus. Capitalism and schizophrenia*. University of Minnesota Press.
- Delmelle, P., Opfergelt, S., Cornelis, J. T. y Ping, C. L. (2015). Volcanic Soils. En Sigurdsson H, Houghton B, Stix J, McNutt S (Ed.). *Encyclopedia of Volcanoes* 4. Elsevier. P. 1253-1264.
- Dib, H. (2022). Impact du type de couvert végétal sur la stabilité biologique de la matière organique dans les sols du páramo andin Étude de cas dans la réserve écologique de l'Antisana, Équateur. *Faculté des Bioingénieurs, Université Catholique de Louvain*.
- DiNapoli, R. J., Lipo, C. P., Brosnan, T. et al. (2019). Rapa Nui (Easter Island) monument (ahu) locations explained by freshwater sources. *PLOS ONE* 14: e0210409.
- Douillet, G. A., Pacheco, D. A., Kueppers, U. et al. (2013). Dune bedforms produced by dilute pyroclastic density currents from the August 2006 eruption of Tungurahua volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology* 75(11): 762.
- Douillet, G. A., Tsang-Hin-Sun, È., Kueppers, U. et al., (2013). Sedimentology and geomorphology of the deposits from the August 2006 pyroclastic density currents at Tungurahua volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology* 75(11): 765.
- Downing, J. A., Cole, J.J. Duarte, C. et al. (2012). Global abundance and size distribution of streams and rivers, *Inland Waters*, 2(4), 229-236.
- Druitt, T. H. (1998). *Pyroclastic density currents*. Geological Society, London, Special Publications. 145(1): 145-182.
- Duarte-Abadía, B., Galarza Suárez, L. e Hidalgo-Bastidas, J. P. (2023). ¿Seguridad hídrica urbano-rural en los fondos de agua? Un análisis desde las relaciones de poder, la participación y la co-creación de conocimientos. *Journal of Political Ecology* 30(1).
- Dudgeon, D. (2012). Threats to freshwater biodiversity globally and in the Indo-Burma biodiversity hotspot. En Allen DJ, Smith KG, Darwall RW (Ed.). *The Status and Distribution of Freshwater Biodiversity in Indo-Burma*. IUCN. P. 1-25.
- Dufek, J., Esposti Ongaro, T. y Roche, O. (2015). Pyroclastic Density Currents. In: The Encyclopedia of Volcanoes. *Elsevier*. P. 617-629.
- Dupuits, E. (2021). Coproducción de imaginarios de justicia hídrica y desarrollo verde en Ecuador. *European Review of Latin American and Caribbean Studies* 111: 19-37.
- Dupuits, E. y Mancilla García, M. (2022). Knowledge politics around water, development and ecosystem services in Ecuador: creative encounters and resistances. *Alternautas* 9(2): 1-35.

- Dupuits, E., Llambí, L. D. y Peralvo, M. (2022). Implementing climate change adaptation policies across scales: challenges for knowledge coproduction in Andean mountain socio-ecosystems. *Mountain Research and Development* 42(2): A1-A11.
- Duque, A., Stevenson, P. R. y Feeley, K. J. (2015). Thermophilization of adult and juvenile tree communities in the northern tropical Andes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112(34): 10744-10749.
- Echeverría, M., Mur, R. J., Lindao, V. et al. (2018). *Quantification of organic carbon stored in the soil in the paramo of Iqualata, Chimborazo province-Ecuador*. AIP Conference Proceedings 1. AIP Publishing.
- Erwin, T. L. (1985). The taxon pulse: a general pattern of lineage radiation and extinction among Carabid beetles. En Ball G E (Ed.). *Taxonomy, Phylogeny, and Zoogeography of Beetles and Ants*. W Junk Publishers. P. 437-472.
- ESPAC. (2019). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua* (ESPAC). Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC).
- Espín Bedón, P., Audin, L., Doin, M. P. et al. (2022). Unrest at Cayambe Volcano revealed by SAR imagery and seismic activity after the Pedernales subduction earthquake, Ecuador (2016). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 428: 107577.
- Espinosa, J., Moreno, J. y Bernal, G. (2022). *Suelos de la Sierra*. Espinosa J, Moreno J y Bernal G (Ed.). Instituto Geográfico Militar (IGM).
- Esquivel-Hernández, G., Mosquera, G. M., Sánchez-Murillo, R. et al. 2019. Moisture transport and seasonal variations in the stable isotopic composition of rainfall in Central American and Andean Páramo during El Niño conditions (2015-2016). *Hydrological Processes* 33: 1802-1817.
- Eswaran, H., Berg, E. y Reich P. 1993. Division S-5 Notes Organic Carbon in Soils of the World. *Soil Science Society of America Journal*. 57: 192-194.
- Etter, A. y Villa, A. (2000). Andean Forests and Farming Systems in part of the Eastern Cordillera (Colombia). *Mountain Research and Development* 20(3): 236-245.
- F., Román-Dañobeytia, F. y Crespo, P. (2022). Progress in understanding the hydrology of high-elevation Andean grasslands under changing land use. *Science of the Total Environment*, 804, 150112.
- Fadrige, B., Baéz, S., Duque, Á. et al. (2018). Widespread but heterogeneous responses of Andean forests to climate change. *Nature* 564: 207-212.
- Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 34: 487-515.
- Fang, C., Smith, P., Moncrieff, J. B. y Smith, J. U. (2005). Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature. *Nature*. 433(7021): 57-59.
- FAO. (2017). *Global Soil Organic Carbon Database*. FAO-UN-CMCC.
- Farley, K. A. y Kelly, E. F. (2004). Effects of afforestation of a páramo grassland on soil nutrient status. *Forest Ecology and Management* 195(3): 281-290.
- Farley, K. A., Bremer, L. L., Harden, C. P. y Hartsig, J. (2013). Changes in carbon storage under alternative land uses in biodiverse Andean grasslands: Implications for payment for ecosystem services. *Conservation Letters* 6(1): 21-27.
- Farley, K., Kelly, E. y Hofstede, R. (2004). Soil Organic Carbon and Water Retention after Conversion of Grasslands to Pine Plantations in the Ecuadorian Andes. *Ecosystems* 7: 729-739.
- Favier, V., Coudrain, A., Cadier, E., Francou, B. et al. (2010). Evidence of groundwater flow on Antizana ice-covered volcano, Ecuador. *Hydrological Sciences Journal*, 53(1): 278-291

- Fehse, J. C., Hofstede, R. G. M., Aguirre, N. et al. (2002). High altitude tropical secondary forests: a competitive carbon sink? *Forest Ecology and Management* 163: 9-25.
- Feyertag, J., Childress, M., Flynn, R. et al. (2020). *Prindex: Comparative Report. A global assessment of perceived tenure security from 140 countries*. ODI
- Figueró, M. L. y Rafael, V. (2013). Diversidad del género *Drosophila* (Diptera, Drosophilidae) en el páramo de Papallacta, Pichincha, Ecuador. *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas* 34(1-2): 151-165.
- Fjeldså, J. (2002). *Polylepis* forests - vestiges of a vanishing Andean ecosystem. *Ecotropica* 8: 111-123.
- Fjeldså, J. y Krabbe, N. (1990). *Birds of the High Andes: a manual to the birds of the temperate zone of the Andes and Patagonia, South America*. Svendborg: Zoological Museum, University of Copenhagen.
- Flachier Troya, A.L. (2016). *Análisis de metodologías para el estudio de Caudales Ecológicos. Casos de estudio en ríos altoandinos ecuatorianos*. Tesis de Licenciatura. PUCE.
- Flantua, S. G., O'Dea, A., Onstein, R. E. et al. (2019). The flickering connectivity system of the north Andean páramos. *Journal of Biogeography* 468: 1808-1825.
- Flora, C. B. y Flora, J. L. (1989). An historical perspective on institutional transfer. En Compton L (Ed.). *The Transformation of International Agricultural Research and Development*. Boulder y Londres: Lynne Rienner Publishers. P.7-32.
- Flores-Ochoa, J. (1977). *Pastores de Puna uywamichiq punarunakuna*. Lima: Instituto de Estudios Peruanos.
- Flores, S., Groten, U., Lugo, S. y Mena-Vásconez, P. (2012). Gente, vida y agua en los cerros. Una sistematización del Proyecto Páramo Andino en el Ecuador. *EcoCiencia*.
- Fonte, S. J., Vanek, S. J., Oyarzún, P. et al. (2012). Chapter Four - Pathways to Agroecological Intensification of Soil Fertility Management by Smallholder Farmers in the Andean Highlands. En Sparks DL (Ed.). *Advances in Agronomy*. Academic Press. P. 125-184.
- Freeman, B. G., Song, Y., Feeley, K. J. y Zhu, K. (2021). Montane species track rising temperatures better in the tropics than in the temperate zone. *Ecology Letters* 24(8): 1697-1708.
- Freile, J. F., Brinkhuizen, D. M., Greenfield, P. J. et al. (2022). *Lista de las Aves del Ecuador/ Checklist of the Birds of Ecuador*. Comité Ecuatoriano de Registros Ornitológicos.
- Freile, J., Pardo-González, A. y Ordóñez-Delgado, L. (2022). Connectivity corridors in the northern Andes: review of experiences. *Áreas Naturales Protegidas Scripta* 9(1): 1-25.
- García-Rodeja, E., Silva, M. y Macías, F. (1987). Andosols developed from non-volcanic materials in Galicia. *Journal of Soil Sciences* 38: 573-591.
- García, V. J., Márquez, C. O., Isenhardt, T. M. et al. (2019). Evaluating the conservation state of the páramo ecosystem: An object-based image analysis and CART algorithm approach for central Ecuador. *Heliyon* 5(10): e02701.
- Germann, V. y Langergrabe, G. (2022). Going Beyond Global Indicators-Policy Relevant Indicators for SDG 6 Targets in the Context of Austria. *Sustainability* 14: 1647.
- Girija Veni, V., Srinivasarao, C., Sammi Reddy, K. et al. (2020). Soil health and climate change. En Vara Prasad MN y Pietrzykowski M (Ed.). *Climate Change and Soil Interactions*. Elsevier. P. 751-767.
- Global Volcanism Program (GVP). (2023). *Volcanoes of the World* (v.5.0.2; 23 Jan 2023). https://volcano.si.edu/volcanolist_holocene.cfm.
- Gómez, C., Fernandez, M. y García, M. (2009). Adaptation in agricultural systems to climate change in highlands of the Andes. *OP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 6 412022.

- Gompper, M. E. (2014). The dog-human-wildlife interface: assessing the scope of the problem. En Gompper M E (Ed.). *Free-Ranging Dogs and Wildlife Conservation*. Oxford University Press. P. 9-54.
- Gondard, P. (1984). *Agricultura de altura*. Ecuador Debate 6: 25-47.
- Gondard, P. (1988). Land use in the Andean region of Ecuador: From inventory to analysis. *Land Use Policy* 5: 341-348.
- Gondard, P. y Mazurek, H. (2001). *30 años de reforma agraria y colonización en Ecuador: 1964-1994: dinámicas espaciales. Dinámicas territoriales: Ecuador, Bolivia, Perú, Venezuela*. IRD y PUCE. P. 15-40
- González-Martínez, M. D., Huguet, C., Pearse, J., McIntyre, N. y Camacho, L. A. (2019). Assessment of potential contamination of Paramo soil and downstream water supplies in a coal-mining region of Colombia. *Applied Geochemistry* 108: 104382.
- González-Zeas, D., Erazo, B., Lloret, P. et al. (2019). Linking global climate change to local water availability: Limitations and prospects for a tropical mountain watershed. *Science of The Total Environment* 650: 2577-2586.
- González-Zeas, D., Rosero-López, D., Muñoz, T. et al. (2022). Making thirsty cities sustainable: A nexus approach for water provisioning in Quito, Ecuador. *Journal of Environmental Management* 320: 115880.
- González-Zeas, D., Rosero-López, D., Walter, T. et al. (2019). Designing eco-friendly water intake portfolios in a tropical Andean stream network. *Water Resources Research* 55: 6946-6967.
- González, G., Bustamante, A. y Grez, A. A. (2018). Touching the sky: Coccinellids (Coleoptera: Coccinellidae) at high altitudes in South America. *Neotropical Entomology* 48(2): 225-238.
- Good, S. P., Noone, D. y Bowen, G. (2015). Hydrologic connectivity constraints partitioning of global terrestrial water fluxes. *Science* 349: 175-177.
- Goodman, D., Dupuis, E. M. y Goodman, M. K. (2012). *Alternative Food Networks: Knowledge, Practice, and Politics*. Routledge
- Gortaire, R. (2014). *Respuestas del pasado para la Agricultura del futuro - Sistemas Ingeniosos de Patrimonio Agrícola* (SIPAN). FAO y Ministerio Cultura y Patrimonio del Ecuador.
- Gortaire, R. (2016). Agroecología en el Ecuador: Proceso histórico, logros, y desafíos. *Antropología Cuadernos de Investigación* 17: 12-38.
- Gray, C. L. (2009). Rural out-migration and smallholder agriculture in the southern Ecuadorian Andes. *Population and Environment* 30(4-5): 193-217.
- Gray, C. L. y Bilborrow, R. E. (2014). Consequences of out-migration for land use in rural Ecuador. *Land Use Policy* 36: 182-191.
- Grubb, P. J., Lloyd, J. R., Pennington, T. D. y Páez-Bimos, S. (2020). A historical baseline study of the páramo of Antisana in the Ecuadorian Andes including the impacts of burning, grazing and trampling. *Plant Ecol Divers* 13(3-4): 225-256.
- Guarderas, P., Smith, F. y Dufrene, M. (2022). Land use and land cover change in a tropical mountain landscape of northern Ecuador: Altitudinal patterns and driving forces. *PLoS ONE* 17: e0260191.
- Guayasamín, J. M., Ribas, C. C., Carnaval, A. C. et al. (2021). Chapter 2: Evolution of Amazonian Biodiversity. En Nobre C et al. (Ed.). *Amazon Assessment Report 2021*. United Nations Sustainable Development Solutions Network.
- Gutscher, M. A., Malavieille, J., Lallemand, S. y Collot, J. Y. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters* 168(3): 255-270.

- Guzmán, P., Batelaan, O., Huysmans, M. y Wyseure, G. (2015). Comparative analysis of baseflow characteristics of two Andean catchments, Ecuador. *Hydrological Processes* 29: 3051-3064.
- Hall, M. L. (1977). *El volcanismo en el Ecuador*. IPGH, Sección Nacional del Ecuador.
- Hall, M. L. y Beate, B. (1991). El Volcanismo Plio-Cuaternario en los Andes del Ecuador. En Mothes P (Coord.). *El Paisaje Volcánico de la Sierra Ecuatoriana*. Colegio de Geógrafos del Ecuador P. 5-18.
- Hall, M. L. y Mothes, P. A. (2008). Quilotoa volcano - Ecuador : An overview of young dacitic volcanism in a lake- filled caldera. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 176: 44-55.
- Hall, M. L. y Wood, C. A. (1985). Volcano-tectonic segmentation of the northern Andes. *Geology* 13(3): 203.
- Hall, M. L., Mothes, P. A., Samaniego, P. et al. (2017). Antisana volcano: A representative andesitic volcano of the eastern cordillera of Ecuador: Petrography, chemistry, tephra and glacial stratigraphy. *Journal of South American Earth Sciences* 73: 50-64.
- Hall, M. L., Samaniego, P., Le Pennec, J. L. y Johnson, J. B. (2008). Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 176(1): 1-6.
- Hansen, B., Rodbell, D., Seltzer, G. et al. (2003). Late-glacial and Holocene vegetational history from two sites in the western Cordillera of southwestern Ecuador. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 194(3): 79-108.
- Hanson, J. D., D'Elia, G., Ayers, S. B. et al. (2015). A new species of fish-eating rat, genus *Neusticomys* (Sigmodontinae), from Ecuador. *Zoological Studies* 54(49): 1-11.
- Haraway, D. (2016). *Manifestly Haraway*. University of Minnesota Press.
- Harden, C. P. (1993). Land Use, Soil Erosion, and Reservoir Sedimentation in an Andean Drainage Basin in Ecuador. *Mountain Research and Development* 13: 177.
- Harden, C. P. (1996). Interrelationships between Land Abandonment and Land Degradation: A Case from the Ecuadorian Andes. *Mountain Research and Development* 16: 274-280.
- Harden, C. P., Hartsig, J., Farley, K. A. et al. (2013). Effects of Land-Use Change on Water in Andean Paramo Grassland Soils. *Annals of the Association of American Geographers* 103: 375-384.
- Hardy, S. P., Hardy, D. R. y Gil, K. C. (2018). Avian nesting and roosting on glaciers at high elevation, cordillera Vilcanota, Peru. *Wilson Journal of Ornithology* 130(4): 940-957.
- Harling, G. (1979). The vegetation types of Ecuador—a brief survey. En Larsen K y Holm-Nielsen L.B. (Ed.). *Tropical Botany*. Academic Press.
- Harpp, K. S., Wanless, V. D., Otto, R. H. et al. (2005). The Cocos and Carnegie aseismic ridges: A trace element record of long-term plume-spreading center interaction. *Journal of Petrology*. 46(1): 109-133.
- Harsh, J., Chorover, J. y Egidio, N. (2002). Allophane and Imogolite. In J.B. Dixon & D.G. Schulze (Eds.), *Soil Mineralogy with Environmental Applications* (pp. 291-322). Soil Science Society of America.
- Hatt, S., Artru, S., Bédart, A. et al. (2016). Towards sustainable food systems: the concept of agroecology and how it questions current research practices. *A review. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, Gembloux*.
- Hayes, T., Murtinho, F. y Wolff, H. (2017). The impact of payments for environmental services on communal lands: An analysis of the factors driving household land-use behavior in Ecuador. *World Development*, 93, 427-446.

- Hayes, T., Murtinho, F. y López, M. (2022). *Incentivos para la conservación: ¿una herramienta que apoya el manejo comunitario sostenido de recursos naturales?* Seattle University, FLACSO Ecuador, NSF.
- Hedberg, I. y Hedberg, O. (1979). Tropical-alpine life-forms of vascular plants. *Oikos*, 33, 297-307.
- Henfrey, T., Feola, G., Penha-Lopes, G., Sekulova, F. y Esteves, A.M. (2023). Rethinking the sustainable development goals: Learning with and from community-led initiatives. *Sustainable Development*, 31(1), 21-222.
- Herrador-Valencia, D. y Paredes, M. (2016). Cambio climático y agricultura de pequeña escala en los Andes ecuatorianos: un estudio sobre percepciones locales y estrategias de adaptación. *Journal of Latin American Geography*, 15, 101-121.
- Herrera, M., Carpio, H. y Chávez, G. (1999). *Estudio sobre el Subsector de la Papa en el Ecuador*. Quito: Programa Nacional de Raíces y Tubérculos, Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP).
- Hess, C.G. (1990). Moving up-moving down: agro-pastoral land-use patterns in the Ecuadorian Paramos. *Mountain Research and Development*, 10(4), 333-342.
- Hidalgo, J.P. (2010). *Dinámica de acumulación de derechos de agua y conflictos. Estudio de caso de la Acequia Tabacundo, Ecuador*. (Tesis de MSc). Wageningen University.
- Hidalgo, J.P., Boelens, R. y Vos, J. (2017). De-colonizing water. Dispossession, water insecurity, and Indigenous claims for resources, authority, and territory. *Water History*, 9(1), 67-85.
- Hidrobo, J., Costa, M. da, Prat, C. et al. (2015). Sistemas de producción en áreas con canchagua habilitada en la Sierra Norte de Ecuador. *Siembra*, 2, 116-127.
- Hille, S.M. y Cooper, C.B. (2015). Elevational trends in life histories: revising the pace-of-life framework. *Biological Reviews*, 90, 204-213.
- Hillel, D. (2004). *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier Academic Press.
- Himley, M. (2009). Nature conservation, rural livelihoods, and territorial control in Andean Ecuador. *Geoforum*, 40(5), 832-842.
- Hind, D. N. (2022). A new genus, *Rockhausenia* Compositae: Senecioneae: Senecioninae. *Kew Bulletin*, 773, 691-714.
- Hofstede, R. (2020). Carihuairazo: el nevado que se va. *Ecuador Terra Incognita*, 120, 32-41.
- Hofstede, R. G. M. (1995a). Effects of livestock farming and recommendations for management and conservation of páramo grasslands (Colombia). *Land Degradation & Development*, 6, 133-147.
- Hofstede, R. G. M. (1995b). *Effects of burning and grazing on a Colombian páramo ecosystem*. (Doctoral dissertation). University of Amsterdam, Amsterdam.
- Hofstede, R. G. M. y Rossenaar, A.J.G.A. (1995). Biomass of grazed, burned, and undisturbed Paramo Grasslands, Colombia. II. Root mass and aboveground: Belowground ratio. *Arctic and Alpine Research*, 27, 13-18.
- Hofstede, R. G. M., Dickinson, K. J. M., Mark, A. F. y Narváez, E. (2014). A Broad Transition from Cloud Forest to Páramo Characterizes an Undisturbed Treeline in Parque Nacional Llanganates, Ecuador. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 46(4), 975-986.
- Hofstede, R. G. M., Lips, H., Jongsma, W. y Sevink, J. (1998). *Geografía, ecología y forestación en la sierra alta del Ecuador*. Ediciones Abya Yala.
- Hofstede, R. G. M., Mondragon, M. X. y Rocha, C. M. (1995). Biomass of grazed, burned, and undisturbed Paramo grasslands, Colombia. 1. Aboveground vegetation. *Arctic and Alpine Research*, 27, 1-12.

- Hofstede, R. y Llambí, L. D. (2020). Plant Diversity in Páramo-Neotropical High Mountain Humid Grasslands. In M.I. Goldstein & D.A. DellaSala (Eds.), *Encyclopedia of the World's Biomes 1* (pp. 362-372). Amsterdam: Elsevier.
- Hofstede, R. y Mujica, E. (2002). Birth of the Páramo Group. An international network of people, institutions, and projects working on páramo. *Mountain Research and Development*, 22, 83-84.
- Hofstede, R., Calles, J., López, V. et al. (2014). *Los páramos andinos. ¿Qué sabemos?. Estado de conocimiento del impacto del cambio climático en el ecosistema páramo*. UICN.
- Hofstede, R., Coppins, R., Mena-Vásconez, P. et al. (2002). El estado de conservación de los páramos de pajonal en el Ecuador. *Ecotropicos*, 15(1), 3-18.
- Hofstede, R., Groenendijk, J. P., Coppins, R. et al. (2002). Impact of pine plantations on soils and vegetation in the Ecuadorian High Andes. *Mountain Research and Development*, 22, 159-167.
- Hofstede, R., Segarra, P. y Mena-Vásconez, P. (Eds.). (2003). *Los Páramos del Mundo. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos*. Global Peatland Initiative/NC-IUCN/ EcoCiencia.
- Hofstede R., Vásconez, S. y Cerra, M. (2015). *Vivir en los páramos. Percepciones, vulnerabilidades, capacidades y gobernanza ante el cambio climático*. UICN.
- Holguín-González, J. E., Boets, P., Alvarado, A. et al. (2013). Integrating hydraulic, physico-chemical and ecological models to assess the effectiveness of water quality management strategies for the River Cuenca in Ecuador. *Ecological Modelling*, 254, 1-14.
- Hooghiemstra, H. (1984). Vegetational and climatic history of the high plain of Bogota, Colombia: a continuous record of the last 3.5 million years. *Dissertationes Botanicae*, 79.
- Hooghiemstra, H., Wijninga, V. M. y Cleef, A. M. (2006). The paleobotanical records of Colombia: implications for biogeography and biodiversity. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 93, 297-325.
- Hooghiemstra, H. y van der Hammen, T. (2004). Quaternary ice-age dynamics in the Colombian Andes: developing an understanding of our legacy. *Philosophical Transactions of the Royal Society London B*, 359, 173-181.
- Hotchkiss, E., Hall Jr, R., Sponseller, R., et al. (2015). Sources of and processes controlling CO₂ emissions change with the size of streams and rivers, *Nature Geoscience*, 8(9), 696.
- Hribljan, J. A., Suarez, E., Bourgeau-Chavez, L. et al. (2017). Multidate, multisensor remote sensing reveals high density of carbon-rich mountain peatlands in the páramo of Ecuador. *Global Change Biology*, 23(12), 5412-5425.
- Hribljan, J. A., Suárez, E., Heckman, K. A. et al. (2016). Peatland carbon stocks and accumulation rates in the Ecuadorian páramo. *Wetlands Ecology and Management*, 24(2), 113-127.
- Hsu, C. H., Jeng, W. L., Chang, R. M. et al. (2001). Estimation of potential lifetime cancer risks for trihalomethanes from consuming chlorinated drinking water in Taiwan. *Environmental Research*, 85, 77-82.
- Huggel, C., Huggel, C., Scheel, M., Albrecht, F., Andres, N., Calanca, P., Jurt, C., Khabarov, N., Mira-Salama, D., Rohrer, M., Salzmann, N., Silva, Y., Silvestre, E., Vicuña, L. y Zappa, M. (2015). A framework for the science contribution in climate adaptation: Experiences from science-policy processes in the Andes. *Environmental Science and Policy*, 47, 80-94.
- Hughes, R. A. y Pilatásig, L. F. (2002). Cretaceous and Tertiary terrane accretion in the Cordillera Occidental of the Andes of Ecuador. *Tectonophysics*, 345(1), 29-48.

- Humboldt, A. y Bonpland, A. (1807). *Essai sur la géographie des plantes, accompagné d'un tableau physique des régions équinoxiales, Fondé sur des mesures exécutées, depuis le dixième degré de latitude boréale jusqu'au dixième degré de latitude australe, pendant les années 1799, 1800, 1801, 1*. Chez Levrault, Schoell et Compagnie.
- Hungerbühler, D., Steinmann, M., Winkler, W. et al. (2002). Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador. *Earth-Science Reviews*, 57(1-2), 75-124.
- Huttunen, J. T., Alm, J., Liikainen, A., et al. (2003). Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions. *Chemosphere*, 52(3), 609-621.
- IEE & GAD-Pichincha. (2013). *Sistemas productivos, cantón Pedro Moncayo*. Quito: Instituto Ecuatoriano de Electrificación y Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Pichincha.
- Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos (INEC). (2001). *Fascículos Censales del IV Censo de Población y V de Vivienda, Cantón Pedro Moncayo*. Quito.
- Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos (INEC). (2010). *Censo de población y vivienda*. Quito.
- Iñiguez, V., Morales, O., Cisneros, F., Bauwens, W. y Wyseure, G. (2016). Analysis of the drought recovery of Andosols on southern Ecuadorian Andean páramos. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 2421-2435.
- IUCN. (2022). *The IUCN Red List of Threatened Species*. Version 2022-1. Recuperado de <https://www.iucnredlist.org>
- Izco, J., Pulgar, Í., Aguirre, Z. y Santin, F. (2007). Estudio florístico de los páramos de pajonal meridionales de Ecuador. *Revista Peruana de Biología*, 142, 237-246.
- J. J. (2021). Review of the subprovinces and districts of the páramo biogeographic province, northern South America. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 92, 923557.
- Jacobsen, D. y Dangles, O. (2017). *Ecology of high altitude waters*. Oxford University Press.
- Jacobsen, D., Milner, A. M., Brown, L. E. y Dangles, O. (2012). Biodiversity under threat in glacier-fed river systems. *Nature Climate Change*, 2, 361-364.
- Jansen, B., Tonneijck, F. H. y Verstraten, J. M. (2011). Selective Extraction Methods for Aluminium, Iron and Organic Carbon from Montane Volcanic Ash Soils. *Pedosphere*, 21(5), 549-565.
- Jantz, S. M., Barker, B., Brooks, T. M. et al. (2015). Future habitat loss and extinctions driven by land-use change in biodiversity hotspots under four scenarios of climate-change mitigation. *Conservation Biology*, 29(4), 1122-1131.
- Jaramillo, P., Poats, S. V., & Valdospinos, C. (2020). *La gobernanza del agua de riego en la subcuenca del Río El Ángel, Ecuador*. Corporación Grupo Randi Randi.
- Jones, M. (2003). The Concept of Cultural Landscape: Discourse and Narratives. En Palang, H. y Fry, G. (Eds.), *Landscape Interfaces - Cultural Heritage in Changing Landscapes* (pp. 21-51). Springer Science+Business Media.
- Jørgensen, P. M. y León-Yáñez, S. (1999). *Catalogue of the vascular plants of Ecuador 75*. Missouri Botanical Garden.
- Jørgensen, P. M., Ulloa Ulloa, C., Madsen, J. E. y Valencia, R. (1995). A floristic analysis of the high Andes of Ecuador. En Churchill, S. P., Balslev, H., Forero, E. y Luteyn, J. (Eds.), *Biodiversity and Conservation of Neotropical Montane Forests* (pp. 221-237). New York: New York Botanical Garden.
- Joslin, A. (2021). Intersections of Conservation, Cattle, and Culture in Ecuador's Páramo Grasslands. *Mountain Research and Development*, 41, R1-R7.

- Josse, C., Cuesta, F., Navarro, G. et al. (2008). Ecosistemas de los Andes del Norte y Centrales. Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. Lima: Secretaría General de la Comunidad Andina, Programa Regional ECOBONA-Intercooperation, CONDESAN, Proyecto Páramo Andino, Programa BioAndes, EcoCiencia, NatureServe, IAVH, LTA-UNALM, ICAE-ULA, RUMBOL SRL.
- Josse, C., Navarro, G., Comer, P. et al. (2003). *Ecological systems of Latin America and the Caribbean: A working classification of terrestrial systems*. NatureServe.
- Joussein, E., Petit, S., Churchman, J. et al. (2005). Halloysite clay minerals - a review. *Clay Mineralogy*, 40(4), 383-426.
- Juan, J. y Ulloa A. de. (1748). *Relacion historica del viage a la America Meridional hecho de orden de S. Mag. para medir algunos grados de meridiano terrestre y venir por ellos en conocimiento de la verdadera figura y magnitud de la tierra, con otras observaciones astronómicas, y físicas*. Antonio Marín.
- Kang, J., Ma, X. y He, S. (2017). Evidence of high-altitude adaptation in the Glyptosternoid fish, *Creteuchiloglanis macropterus* from the Nujiang River obtained through transcriptome analysis. *BMC Evolutionary Biology*, 17(1), 229.
- Kaufhold, S., Kaufhold, A., Jahn, R. et al. (2009). A new massive deposit of allophane raw material in Ecuador. *Clay Mineralogy*, 57(1), 72-81.
- Kaufhold, S., Ufer, K., Kaufhold, A. et al. (2010). Quantification of allophane from Ecuador. *Clay Mineralogy*, 58(5), 707-716.
- Keating, P.L. (1997). An inventory of plant species in the Páramo de Cajanuma, Podocarpus National Park Ecuador. *Phytologia*, 83, 333-344.
- Keating, P. L. (2000). Chronically disturbed páramo vegetation at a site in southern Ecuador. *Journal of the Torrey Botanical Society*, 127, 162-171.
- Kelfoun, K., Gueugneau, V., Komorowski, J-C. et al. (2017). Simulation of block-and-ash flows and ash-cloud surges of the 2010 eruption of Merapi volcano with a two-layer model: MODEL OF THE 2010 ERUPTION OF MERAPI. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(6), 4277-4292.
- Kellner, E., Waddington, J. y Price, J. (2005). Dynamics of biogenic gas bubbles in peat: Potential effects on water storage and peat deformation, *Water Resources Research*, 41, W08417.
- Kerr, J. B. y Fioletov, V. E. (2008). Surface ultraviolet radiation. *Atmosphere-Ocean*, 46(1), 159-184.
- Kerr, M. S. (2004). *A Phylogenetic and Biogeographic analysis of Sanguisorbae (Rosaceae), with emphasis on the Pleistocene radiation of the high Andean genus Polyplepis*. (Tesis de Ph. D.). Faculty of the Graduate School of the University of Maryland.
- Kessler, M. (2002). The elevational gradient of Andean plant endemism: varying influences of taxon-specific traits and topography at different taxonomic levels. *Journal of biogeography*, 29(9), 1159-1165.
- Klaus, J. y McDonnell, J. J. (2013). Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation. *Journal of Hydrology*, 505, 47-64.
- Knapp, G. (1988). *Ecología cultural prehispánica del Ecuador*. Banco Central del Ecuador.
- Knapp, G. (1991). *Andean Ecology: Adaptive Dynamics in Ecuador*. Westview Press.
- Knapp, G. (2017). Mountain Agriculture for Global Markets: The Case of Greenhouse Floriculture in Ecuador. *Annals of the American Association of Geographers*, 107, 511-519.
- Koenen, M. T. y Gale, S. (2000). Effects of fire on birds in páramo habitat of northern Ecuador. *Ornitología Neotropical*, 11, 155-163.

- Kolka, R., Rabenhorst, M. y Swanson, D. (2012). Histosols. In Ming-Huang, P., Li, Y. y Summer, M. (Eds.), *Handbook of Soil Sciences. Properties and processes* (2nd Ed.). CRC Press.
- Körner, C. (1995). *Alpine plant diversity: a global survey and functional interpretations. In Arctic and alpine biodiversity: patterns, causes and ecosystem consequences* (pp. 45-62). Springer.
- Körner, C., Berninger, U., Daim, G. et al. (2022). Long-term monitoring of high-elevation terrestrial and aquatic ecosystems in the Alps: a five-year synthesis. *Ecology monthly*, 14(2), 48-69.
- Kowalska, A. y Grobelak, A. (2020). Organic matter decomposition under warming climatic conditions. In Vara, M. y Pietrzykowski, M. (Eds.), *Climate Change and Soil Interactions* (pp. 397-412). Elsevier.
- Kpienbaareh, D., Luginaah, I., Bezner Kerr, R. et al. (2022). Assessing local perceptions of deforestation, forest restoration, and the role of agroecology for agroecosystem restoration in northern Malawi. *Land Degradation & Development*, 33, 1088-1100.
- Kraul, C. (2014). *Mining showdown in Andes over unique Páramo lands. Yale Environment 360*. Recuperado de https://e360.yale.edu/features/mining_showdown_in_andes_over_unique_paramo_lands.
- Krynak, K. L., Wessels, D. G., Imba, S. M. et al. (2020). Call survey indicates rainbow trout farming alters glassfrog community composition in the Andes of Ecuador. *Amphib. Reptile Conservation*, 14(2), e234.
- La Marca, E., Lips, K., Lötters, S., Puschendorf, R., Ibáñez, R., Rueda-Almonacid, J. V. y Gascon, C. (2005). Catastrophic population declines and extinctions in Neotropical harlequin frogs (Bufonidae: Atelopus). *Biotropica*, 37(2), 190-201.
- Lægaard, S. (1992). Influence of fire in the grass páramo vegetation of Ecuador. In H. Balslev & J.L. Luteyn (Eds.), *Paramo: An Andean Ecosystem under Human Influence* (pp. 151-170). Academic Press.
- Lahuatte, B., Mosquera, G. M., Páez-Bimos, S. et al. (2022). Delineation of water flow paths in a tropical Andean headwater catchment with deep soils and permeable bedrock. *Hydrological Processes*, 36, e14725.
- Lambertini, M., Leape, J., Marton-Lefèvre, J. et al. (2011). Invasives: a major conservation threat. *Science*, 333(6041), 404-405.
- Landázuri, C. N. (1995). *Los Curacazgos Pastos Prehispánicos: Agricultura y Comercio, Siglo XVI*. Banco Central del Ecuador.
- Lane, K. (2009). Engineered highlands: The social organization of water in the ancient north-central Andes (AD 1000-1480). *World Archaeology*, 41, 169-190.
- Larco, K., Mosquera, G. M., Jacobs, S. R. et al. (2023). Factors controlling the temporal variability of streamflow transit times in tropical alpine catchments. *Journal of Hydrology*, 617, 128990.
- Larrea, C. (2006). *Hacia una historia ecológica del Ecuador. Propuestas para el debate*. Corporación Editora Nacional.
- Latorre, S., Hollenstein, P., González-Rodríguez, M., Schmitz, S. (2022). Ecuadorian peasantries amidst the agri-food globalization: Social differentiation and diverse livelihood strategies in a cut flower exporting territory. *Journal of Rural Studies*, 93, 28-42.
- Latour, B. (2017). On Actor-Network Theory. A Few Clarifications, Plus More Than a Few Complications. *Philosophical Literary Journal Logos*, 27(1), 173-197.
- Lazo, P. X., Mosquera, G. M., Cárdenas, I. et al. (2023). Flow partitioning modeling using high-resolution electrical conductivity data during variable flow conditions in a tropical montane catchment. *Journal of Hydrology*, 617, 128898.

- Lazo, P. X., Mosquera, G. M., McDonnell, J. J. y Crespo, P. (2019). The role of vegetation, soils, and precipitation on water storage and hydrological services in Andean Páramo catchments. *Journal of Hydrology*, 572, 805–819.
- Lee Jr. T.E., Tinoco N. y Brito J. (2022). A new species of Andean mouse of the genus *Thomasomys* (Cricetidae, Sigmodontinae) from the eastern Andes of Ecuador. *Vertebrate Zoology*, 72, 219–233.
- León-Yáñez, S. (2011). Endemismo en los páramos. En S. León-Yáñez, R. Valencia, N. Pitman et al. (Eds.), *Libro Rojo de Plantas Endémicas del Ecuador* (2da ed., pp. 34–38). Publicaciones del Herbario QCA, Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- LeRoy, N. y Schmidt, J. (2016). How dams can go with the flow. *Science*, 353, 1099–1100.
- Ley de Minería. (29 de enero de 2009). Registro Oficial Suplemento 517.
- Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua. (2014). Suplemento del Registro Oficial 305 de 6 de agosto de 2014.
- Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales. (2016). Suplemento del Registro Oficial 711 de 14 de marzo de 2016.
- Liao, W. B., Lu, X. y Jehle, R. (2014). Altitudinal variation in maternal investment and trade-offs between egg size and clutch size in the Andrew's toad. *Journal of Zoology*, 293(2), 84–91.
- Liberg, O., Chapron, G., Wabakken, P. et al. (2012). Shoot, shovel and shut up: cryptic poaching slows restoration of a large carnivore in Europe. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1730), 910–915.
- Ligot, N. (2018). *Stocks et mécanismes de stabilisations du carbone dans les sols du páramo équatorien: impact du pâturage*. Université Catholique de Louvain.
- Litherland, M., Aspden, J. A. y Jemielita, R. A. (1994). The metamorphic belts of Ecuador. Keyworth, Nottingham: British Geological Survey (Overseas Memoir Institute of Geological Sciences).
- Llambí, L. D. (2015). Estructura, diversidad y dinámica de la vegetación en el ecotono bosque-páramo: revisión de la evidencia en la Cordillera de Mérida. *Acta Biológica Colombiana*, 20(3), 5–20.
- Llambí, L. D. y Garcés, A. (2021). *Adaptación al Cambio Climático en los Andes: vacíos y prioridades para la gestión del conocimiento*. Programa Adaptación en las Alturas. CONDESAN y COSUDE.
- Llambí, L. D. y Rada, F. (2019). Ecological research in tropical alpine ecosystems of the Venezuelan páramo: past, present and future. *Plant Ecology and Diversity*, 12(6), 519–538.
- Llambí, L. D. y Sarmiento, L. (1998). Biomasa microbiana y otros parámetros edáficos en una sucesión secundaria del páramo venezolano. *Ecotrópicos*, 11(1), 1–14.
- Llambí, L. D., Durbecq, A., Cáceres-Mago, K. et al. (2020). Interactions between nurse-plants and an exotic invader along a tropical alpine elevation gradient: growth-form matters. *Alpine Botany*, 130, 59–73.
- Llambí, L. D., Hupp, N., Saez, A. y Callaway, R. (2018). Reciprocal interactions between a facilitator, natives and exotics in tropical alpine plant communities. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 30, 82–88.
- Llambí, L. D., Melfo, A., Gámez, L. E. et al. (2021). Vegetation assembly, adaptive strategies and positive interactions during primary succession in the forefield of the last Venezuelan glacier. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9.
- Løjtnant, B. y Molau, U. (1983). Analysis of a virgin páramo plant community on Volcán Sumaco, Ecuador. *Nordic Journal of Botany*, 3(6), 567–574.

- Londoño, C., Cleef, A. y Madriñán, S. (2014). Angiosperm flora and biogeography of the páramo region of Colombia, Northern Andes. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2092, 81-87.
- López-Sandoval, S. y Maldonado, P. (2019). Change, Collective Action, and Cultural Resilience in Páramo Management in Ecuador. *Mountain Research and Development*, 39(4), R1-R9.
- López, M. F. (2004). *Agricultural and Settlement Frontiers in the Tropical Andes: the Páramo Belt of Northern Ecuador, 1960-1990*. Institut für Geographie an der Universität Regensburg.
- López, S. (2004). *Agricultural and Settlement Frontiers in the Tropical Andes: The Páramo Belt of Northern Ecuador, 1960-1990*. (Tesis de Ph. D.). Institut für Geographie, Universität Regensburg, Selbstverlag, Germany.
- López, S., Robertsdotter, A. y Paredes, M. (2017). Space, Power and Locality: the Contemporary Use of Territorio in Latin American Geography. *Journal of Latin American Geography*, 16, 43-67.
- López, S., Wright, C. y Costanza, P. (2017). Environmental change in the equatorial Andes: linking climate, land use, and land cover transformations. *Remote Sensing*, 8, 291-303.
- Lowe, D. J. (1986). Controls on the rates of weathering and clay mineral genesis in airfall tephros: a review and New Zealand case study. *Rates Chem Weather rocks Miner*, January, 265-330.
- Lozano, P. y Mena-Vásconez, P. (2013). Arbustal siempreverde montano alto del Páramo del sur. En Ministerio del Ambiente del Ecuador. *Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental* (pp. 136-137). Subsecretaría de Patrimonio Natural.
- Lozano, P., Cleef, A. y Bussmann, R. (2009). Phytogeography of the vascular páramo flora of Podocarpus National Park, south Ecuador. *Arnaldoa*, 162, 69-85.
- Lucantoni, D., S., M. R., Goïta, M., Veyret-Picot, M. et al. (2023). Evidence on the multidimensional performance of agroecology in Mali using TAPE. *Agricultural Systems*, 204, 103499.
- Luteyn, J. (1999). *Páramos. A Checklist of Plant Diversity, Geographical Distribution and Botanical Literature*.
- Luteyn, J. L. (ed.). (1999). *Páramos: A checklist of plant diversity, geographical distribution, and botanical literature*. NYBG.
- Luzieux, L. D. A., Heller, F., Spikings, R. et al. (2006). Origin and Cretaceous tectonic history of the coastal Ecuadorian forearc between 1 N and 3 S: Paleomagnetic, radiometric and fossil evidence. *Earth and Planetary Science Letters*, 249(3-4), 400-414.
- Ma, W., y Yamanaka, T. (2016). Factors controlling inter-catchment variation of mean transit time with consideration of temporal variability. *Journal of Hydrology*, 534, 193-204.
- MAATE. (2021a). *Boletín de Estadísticas de Incendios Forestales*. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE).
- Maavara, T., Chen, Q., Van Meter, K. et al. (2020). River dam impacts on biogeochemical cycling. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 103-116.
- Madriñán, S., Cortés, A. J. y Richardson, J. E. (2013). Páramo is the world's fastest evolving and coolest biodiversity hotspot. *Frontiers in Genetics*, 4, 192.
- MAE, MAGAP e IEE. (2018). *Cobertura y uso de la tierra*. Quito.
- MAE. (2006). Acuerdo No 155 *Normas Técnicas Ambientales para la prevención y control de la contaminación ambiental para los sectores eléctrico, telecomunicaciones y transporte: Caudales ecológicos*. Quito.
- MAE. (2014). *Sistema de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental*. Subsecretaría de Patrimonio Natural.

- Malandrino, P., Russo, M., Ronchi, A. et al. (2015). Increased thyroid cancer incidence in a basaltic volcanic area is associated with non-anthropogenic pollution and biocontamination. *Endocrine*, 53, 471-479.
- Malcolm, J. R., Liu, C., Neilson, R. P., Hansen, L. y Hannah, L. (2006). Global warming and extinctions of endemic species from biodiversity hotspots. *Conservation Biology*, 20(2), 538-548.
- Maldonado, G. y De Bièvre, B. (Eds.). (2011). *Paramundi: Segundo Congreso Mundial de Páramos, Vida en las Alturas: Memorias*. CONDESAN y Ministerio del Ambiente del Ecuador.
- Malo-Larrea, A., Santillán, V. y Torracchi-Carrasco, E. (2022). Looking inside the Blackbox: Cuenca's water metabolism. *Plos one*, 17, e0273629.
- Mani, M. S. (1968). *Ecology and Biogeography of High Altitude Insects*. La Haya: W. Junk Publishers.
- Manosalvas, R., Hoogesteger, J. y Boelens, R. (2021). Contractual Reciprocity and the Re-Making of Community Hydrosocial Territories: The case of La Chimba in the Ecuadorian páramos. *Water*, 13(11), 1600.
- Manosalvas, R., Hoogesteger, J. y Boelens, R. (2023). Imaginaries of Place in Territorialization Processes: Transforming the Oyacachi Páramos through Nature Conservation and Transfers in the Ecuadorian Highlands. *Environment and Planning C: Politics and Space*, 0(0).
- Marín, F., Dahik, C. Q., Mosquera, G. M., Feyen, J., Cisneros, P., y Crespo, P. (2018). Changes in soil hydro-physical properties and SOM due to pine afforestation and grazing in Andean environments cannot be generalized. *Forests*, 10(1), 17.
- Marín, F., Dahik, C., Mosquera, G. et al. Mark, B. G., French, A. et al. (2017). Glacier loss and hydro-social risks in the Peruvian Andes. *Global and Planetary Change*, 159, 61-76.
- Martín-Torrijos, L., Sandoval-Sierra, J. V., Muñoz, J. et al. (2016). Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) threaten Andean amphibians. *Neotropical Biodiversity*, 2(1), 26-36.
- Martínez-Godoy, D. (2016). Territorios campesinos vinculados a la agroindustria: un análisis de las transformaciones territoriales desde la economía de la proximidad. El caso de las comunidades lecheras en Cayambe- Ecuador. Eutopía. *Revista de Desarrollo Económico Territorial*, 41-55.
- Martínez-Valle, L. y North, L. L. (2009). *Vamos dando la vuelta: Iniciativas endógenas de desarrollo local en la Sierra ecuatoriana*. FLACSO.
- Martínez, L. (2013). Flores, trabajo y territorio: el caso Cotopaxi. Eutopía. *Revista de Desarrollo Económico Territorial*, 75-100.
- Matovelle, C. (2022). Páramo to Pasture Conversion in a Mountain Watershed: Effects on Water Quality and Quantity. *Mountain Research and Development*, 41(4), R74-R81.
- Mavarez, J. (2019). A Taxonomic Revision of Espeletia (Asteraceae). The Venezuelan Radiation. *Harvard Papers in Botany*, 24(2), 131-244.
- McCain, C. M. y Grytnes, J. A. (2010). Elevational gradients in species richness. In Kehrer-Sawatzki, H. (Ed.), *Encyclopedia of Life Sciences* (pp. 1-10). Chichester: John Wiley & Sons.
- McClelland, G. B. y Scott, G. R. (2019). Evolved mechanisms of aerobic performance and hypoxia resistance in high-altitude natives. *Annual Review of Physiology*, 81(1), 561-583.
- McDaniel, P. A., Lowe, D. J. y Arnalds, O. (2012). Andisols. In Huang, P. M. y Summer, M. E. (Eds.), *Handbook of Soil Sciences* (2nd ed., pp. 33.29-33.48). Boca Raton: CRC Press.
- McGuire, K. J. y McDonnell, J. J. (2006). A review and evaluation of catchment transit time modeling. *Journal of Hydrology*, 330, 543-563.

- McKnight, J. Y., Harden, C. P. Schaeffer, S. M. (2017). Soil CO₂ flux trends with differences in soil moisture among four types of land use in an Ecuadorian páramo landscape. *Physical Geography*, 38(1), 51-61.
- McManamay, R. A., Oigbokie, C. O., Kao, S.-C. y Bevelhimer, M. S. (2016). Classification of US hydropower dams by their modes of operation. *River Research and Applications*, 32, 1450-1468.
- McNamara, K. E. y Buggy, L. (2017). Community-based climate change adaptation: a review of academic literature. *Local Environment*, 22(4), 443-460.
- Medina, G., Mena-Vásconez, P. y Josse, C. (1999). El páramo como espacio de mitigación de carbono atmosférico. *Serie Páramo*, 1 (Introducción).
- Medina, G. y Mena-Vásconez, P. (2001). Los páramos en el Ecuador. In Mena-Vásconez, P., Medina, G. y Hofstede, R. (Eds.), *Los páramos del Ecuador-Particularidades, problemas, perspectivas* (pp. 1-52). Abya Yala.
- Megens, S., Vos, J. y Manosalvas, R. (2022). Crafting co-governance: challenges of the long overdue Pesillo-Imbabura regional drinking water project in Ecuador. *Revista Latinoamericana de Desarrollo Económico*, 38, 95-118.
- Memories of the NYBG. Bronx: The NYBG Press.
- Mena-Valenzuela, P. y Valdiviezo-Rivera, J. (2016). Leucismo en *Astroblepus ubidiai* (Pellegrin 1931) (Siluriformes: Astroblepidae), de la provincia de Imbabura, Ecuador. *Biota Colombiana*, 17(1), 131-136.
- Mena-Vásconez, P. (2001). El estado de salud de los páramos en el Ecuador: una aproximación conceptual. In Mena-Vásconez, P., Medina, G. y Hofstede, R. (Eds.), *Los Páramos del Ecuador. Particularidades, problemas y perspectivas* (pp. 189-216). Abya Yala y Proyecto Páramo.
- Mena-Vásconez, P. y Balslev, H. (1986). Comparación entre la Vegetación de los Páramos y el Cinturón Afroalpino. *Reports from the Botanical Institute, University of Aarhus*, 12, 1-54.
- Mena-Vásconez, P., Boelens, R. y Vos, J. (2016). Food or Flowers? Contested transformations of community food security and water use priorities under new legal and market regimes in the Ecuadorian highlands. *Journal of Rural Studies*, 44, 227-238.
- Mena-Vásconez, P., Boelens, R. y Vos, J. (2020). Roses: the latest chapter in the conflicted history of controlling irrigation water in the Ecuadorian Andes. *Water History*, 12, 205-226.
- Mena-Vásconez, P., Boelens, R., Vos, J. y Vincent, L. (2017). Fighting over water values: diverse framings of flower and food production with communal irrigation in the Ecuadorian Andes. *Water International*, 42, 443-461.
- Mena-Vásconez, P., Castillo, A., Flores, S. et al. (Eds.). (2011). *Páramo. Paisaje estudiado, habitado, manejado e institucionalizado*. EcoCiencia/Abya Yala/ECOBONA.
- Mena-Vásconez, P. et al. (In prep). *A new boom of small export rose farms after COVID 19* (expected for 2023).
- Mena-Vásconez, P., Medina, G. y Hofstede, R. (Eds.). (2001). *Los Páramos del Ecuador. Particularidades, problemas y perspectivas*. Abya Yala y Proyecto Páramo.
- Mena-Vásconez, P., Vos, J., van Ommen, P. y Boelens, R. (2018). *Flores, acaparamiento del agua y responsabilidad empresarial social: certificación de la producción de rosas y reclamos por la justicia ambiental en el Ecuador*. Cuadernos de Geografía, 101, 189-214.
- Menéndez-Guerrero, P. y Graham, C. (2013). Evaluating multiple causes of amphibian declines of Ecuador using geographical quantitative analyses. *Ecography*, 36(1), 001-014.

- Mera, V. (2001). Prácticas sociales, uso de recursos y percepciones sobre la naturaleza: una caracterización social de los páramos ecuatorianos. In Mena-Vásconez, P., Medina, G. y Hofstede, R. (Eds.), *Los Páramos del Ecuador. Particularidades, problemas y perspectivas* (pp. 89-120). Abya Yala y Proyecto Páramo.
- Merino-Ibarra, M., Monroy-Ríos, E., Vilaclara, G. et al. (2008). Physical and chemical limnology of a wind-swept tropical highland reservoir. *Aquatic Ecology*, 42, 335-345.
- Messerli, B. y Ives, J. D. (Eds.). (1997). *Mountains of the World. A Global Priority*. Parthenon Publishing Group.
- Mestanza-Ramón, C., Ordóñez-Alcívar, R., Argüello-Guadalupe, C. et al. (2022). History, socioeconomic problems and environmental impacts of gold mining in the Andean Region of Ecuador. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 9(3), 1190.
- Meyer, H. (1993). *En los altos Andes del Ecuador*. Abya-Yala.
- Meyers, A. (1976). Die Inka in Ekuador: Untersuchungen anhand ihrer materiellen Hintelassenschaft. *Bonn: Bonner Amerikanistische Studien, Estudios Americanistas de Bonn* 6.
- Meyers, A. (1998). *Los Incas en el Ecuador. Análisis de los restos materiales*. Banco Central y Abya Yala.
- Michaud, F., Witt, C. y Royer, J.-Y. (2009). Influence of the subduction of the Carnegie volcanic ridge on Ecuadorian geology: Reality and fiction. Backbone of the Americas: Shallow subduction, plateau uplift, and ridge and terrane collision. *Memoir of the Geological Society of America*, 204, 217-228.
- Miles, A., DeLonge, M. S. y Carlisle, L. (2017). Triggering a positive research and policy feedback cycle to support a transition to agroecology and sustainable food systems. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 41, 855-879.
- Minaya, V., Corzo, G., Romero-Saltos, H., Van Der Kwast, J. et al. (2016). Altitudinal analysis of carbon stocks in the Antisana páramo, Ecuadorian Andes. *Journal of Plant Ecology*, 9(5), 553-563.
- Minaya, V., Suarez, V. C., Wenninger, J. y Mynett, A. (2021). Runoff generation from a combined glacier and páramo catchment within the Antisana Reserve in Ecuador. *Journal of Ecohydrology*, 1-16.
- Minga, D., Cordero, P., Donoso-Correa, M. et al. (2019). El microrrefugio de Uchucay: Un relicto de bosque interandino con una importante riqueza arbórea en el sur del Ecuador. *Pirineos*, 174, e047.
- Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (2020). Viceministerio de Minas. *Plan Nacional de Desarrollo del Sector Minero 2020 - 2030*. Quito.
- Ministerio del Ambiente de Ecuador. (2009). *Política de Ecosistemas Andinos de Ecuador*. Dirección Nacional Forestal/Dirección de Biodiversidad.
- Ministerio del Ambiente de Ecuador. (2013). Sistema de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental. Subsecretaría de Patrimonio Natural. Quito.
- Mitchell, T. D., Carter, T. R., Jones, P. D. et al. (2004). A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: The observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100). *Tindal Centre Working Paper* 55. Retrieved from http://www.ipcc-data.org/docs/tyndall_working_papers_wp55.pdf
- Mojica, A. y Guerrero, J. (2013). Evaluation of pesticide movement towards Tota Lake catchment, Colombia. *Revista Colombiana de Química*, 42, 29-38.
- Molano, J. (2002). *El páramo: Producción social del espacio en las altas montañas ecuatoriales*. Ediciones Uniandes.

- Monasterio, M. (Ed.). (1980). *Estudios Ecológicos en los Páramos Andinos*. Universidad de los Andes.
- Montenegro-Díaz, P., Ochoa-Sánchez, A., Céleri, R. y Montgomery, K. (2006). Variation in temperature with altitude and latitude. *Journal of Geography*, 105(3), 133-135.
- Montenegro-Díaz, P., Ochoa-Sánchez, A., y Céleri, R. (2019). Impact of tussock grasses removal on soil water content dynamics of a tropical mountain hillslope. *Ecohydrology*, 12(8), e2146.
- Morán-Tejeda, E., Ceballos, J. L., Peña, K. et al. (2018). Recent evolution and associated hydrological dynamics of a vanishing tropical Andean glacier: Glaciar Las Conejeras, Colombia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 5445-5461.
- Moreno-Cárdenas, P. A. y Novillo-González, M. (2020). First record of *Thomasomys cinereus* Thomas, 1882 (Rodentia, Cricetidae, Sigmodontinae) in Ecuador. *Therya*, 11(1), 41-45.
- Moreno, J., Yerovi, F., Herrera, M. et al. (2018). Soils from the Highlands. In J. Espinosa, J. Moreno y G. Bernal (Eds.), *The Soils of Ecuador* (pp. 79-111). Cham: Springer International Publishing.
- Moreno, J., Yerovi, F., Herrera, M. et al. (2022). Suelos de la Sierra. In J. Espinosa, J. Moreno y G. Bernal (Eds.), *Suelos del Ecuador: Clasificación, uso y manejo* (p. 103). Instituto Geográfico Militar.
- Moret, P. (2005). *Los Coleópteros Carabidae del Páramo en los Andes del Ecuador: Sistemática, ecología y biogeografía*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Moret, P. (2009). Altitudinal distribution, diversity and endemism of Carabidae (Coleoptera) in the páramos of Ecuadorian Andes. *Annales de la Société entomologique de France*, 45(4), 500-510.
- Moret, P., Aráuz, M. A., Gobbi, M. et al. (2016). Climate warming effects in the Tropical Andes: First evidence for upslope shifts of Carabidae (Coleoptera) in Ecuador. *Insect Conservation and Diversity*, 9(4), 342-350.
- Moret, P., Muriel, P., Jaramillo, R. y Dangles, O. (2019). Humboldt's tableau physique revisited. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116, 2889-2894.
- Moret, P., Muriel, P., Jaramillo, R. et al. (2021). Resurvey of vascular plants and soil arthropods on the summit of Mount Corazón (Andes of Ecuador) after 140 Years. *Neotropical Biodiversity*, 7(1), 238-245.
- Morocho, C. C. y Chuncho, G. (2019). Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión. *Bosques Latitud Cero*, 9(2), 71-83.
- Morrone, J. J. (2008). Endemism. In *Encyclopedia of Ecology* (Second Edition), 3, 81-86.
- Morueta-Holme, N., Engemann, K., Sandoval-Acuña, P. et al. (2015). Strong upslope shifts in Chimborazo's vegetation over two centuries since Humboldt. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 112(41), 12741-12745.
- Moscol-Olivera, M. y Cleef, A. (2009). Vegetation composition and altitudinal distribution of Andean rain forests in El Ángel and Guandera reserves, northern Ecuador. *Phytocoenologia*, 39(2), 5-46.
- Mosquera, G. M., Céleri, R., Lazo, P. X., Vaché, K. B., Perakis, S. S. y Crespo, P. (2016a). Combined Use of Isotopic and Hydrometric Data to Conceptualize Ecohydrological Processes in a High-Elevation Tropical Ecosystem. *Hydrological Processes*, 30(17), 2930-2947.

- Mosquera, G. M., Córdova, M., Céleri, R., Crespo, P., Campozano, L., Padrón, R. S., Carrillo-Rojas, G., Vimos-Lojano, D. J. (2016b). *Ecohydrological Observatories in High-elevation Tropical Ecosystems - Field Guide and Research Results*. Universidad de Cuenca.
- Mosquera, G. M., Hofstede, R., Bremer, L. et al. (2023). Frontiers in Páramo Water Resources Research: A Multidisciplinary Assessment. *Science of The Total Environment*, 892, 164373.
- Mosquera, G. M., Marín, F., Stern, M., Bonnesoeur, V., Ochoa-Tocachi, B. Mosquera, G. M., Segura, C., Vaché, K. B., Windhorst, D., Breuer, L. y Crespo, P. (2016c). Insights into the water mean transit time in a high-elevation tropical ecosystem. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 2987-3004.
- Mosquera, G.M., Marín, F., Stern, M. et al. (2022). Progress in understanding the hydrology of high-elevation Andean grasslands under changing land use. *Science of the Total Environment* 804: 150112.
- Mosquera, G., Crespo, P., Breuer, L. et al. (2020a). Water transport and tracer mixing in volcanic ash soils at a tropical hillslope: A wet layered sloping sponge. *Hydrological Processes*, 34, 2032-2047.
- Mosquera, G., Lazo, P. X., Céleri, R. et al. (2015). Runoff from tropical alpine grasslands increases with areal extent of wetlands. *Catena*, 125, 120-128.
- Mosquera, G., Lazo, P., Cárdenas, I. y Crespo, P. (2012). Identificación de las principales fuentes de agua que aportan a la generación de escorrentía en zonas Andinas de páramo húmedo mediante el uso de los isótopos estables deuterio ($\delta^2\text{H}$) y oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$). *Maskana*, 3(2), 87-105.
- Mosquera, G., Marín, F., Feyen, J. et al. (2020b). A field, laboratory, and literature review evaluation of the water retention curve of volcanic ash soils: How well do standard laboratory methods reflect field conditions? *Hydrological Processes*, 35(1), e14011.
- Mothes, P. A. y Hall, M. L. (2008). The Plinian fallout associated with Quilotoa's 800 yr BP eruption, Ecuadorian Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 56-69.
- Mountain Research Initiative EDW Working Group. (2015). Elevation dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 5(5), 424-430.
- Muellner-Riehl, A. N., Schnitzler, J., Kissling, W. D. et al. (2019). Origins of global mountain plant biodiversity: Testing the 'mountain-geobiodiversity hypothesis'. *Journal of Biogeography*, 46(12), 2826-2838.
- Muir, A. P., Biek, R., Thomas, R. y Mable, B. K. (2014). Local adaptation with high gene flow: temperature parameters drive adaptation to altitude in the common frog (*Rana temporaria*). *Molecular Ecology*, 23(3), 561-574.
- Mulas, M., Chunga, K., Leon, D. O. G. y Segovia, K. F. E. (2019). Sedimentological study of distal rain-triggered lahars: the case of West Coast of Ecuador. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 26(1), 1-17.
- Munang, R., Thiaw, I., Alverson, K. et al. (2013). Climate change and Ecosystem-based Adaptation: a new pragmatic approach to buffering climate change impacts. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(1), 67-71.
- Muñoz-Tobar, S. I. y Caterino, M. S. (2020). Mountains as islands: species delimitation and evolutionary history of the ant-loving beetle genus *Panabachia* (Coleoptera, Staphylinidae) from the northern Andes. *Insects*, 11(64), 1-19.

- Muriel, P., Báez, S., Cuesta, F. et al. (2014). Herramientas para el manejo de información florística y ecológica de los páramos del Ecuador: Lista anotada de especies y base de datos cuantitativa. En F. Cuesta, J. Sevink, L. D. Llambí, B. de Bièvre y J. Posner (Eds.), *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos* (pp. 145-173). CONDESAN.
- Murra, J. (1972). El control vertical de un máximo de pisos ecológicos en la economía de las sociedades andinas. En I. Ortiz de Zúñiga (Ed.), *Visita de la Provincia de León de Huánuco* (pp. 429-476). Instituto de Estudios Peruanos.
- Murra, J. V. (2002). *El Mundo Andino: Población, Medio Ambiente y Economía*. Instituto de Estudios Peruanos.
- Murtinho, F. (2016). What facilitates adaptation? An analysis of community-based adaptation to environmental change in the Andes. *International Journal of the Commons*, 10(1), 119-141.
- Nair S y Protzen J-P. (2021). *The Inka built environment*. En: *The Inka Empire*. Austin: University of Texas Press. P. 215-232.
- Nanzyo, M. (2002). Unique properties of volcanic ash soils. *Global Journal of Environmental Research*, 6(2), 99-112.
- Natividad, P., Omonte-Ferrufino, M. C., Mayer de Scurrah, M. y Sherwood, S. (2020). Enabling more regenerative agriculture, food and nutrition in the Andes: The relational bio-power of 'seeds'. In J. Duncan, M. Carolary J. S. C. Wiskerke (Eds.), *The Routledge Handbook of Sustainable and Regenerative Food Systems* (pp. 304-317). Earthscan/Routledge.
- Navarrete, E., Morante-Carballo, F., Dueñas-Tovar, J. et al. (2022). Assessment of geosites within a natural protected area: A case study of Cajas National Park. *Sustainability*, 14, 3120.
- Navas, C. A. (1999). Biodiversidad de anfibios y reptiles en el páramo: una visión eco-fisiológica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas*, 23, S465-S474.
- NCI. (2020). *Sangay Podocarpus: El Primer Corredor de Conectividad de Ecuador Oficialmente Declarado*. Retrieved from https://www.natureandculture.org/wp-content/uploads/2020/07/2020-Sangay-Podocarpus-E-News_Final.pdf
- Neall, V. E. (2009). Volcanic Soils. In W. Verheye (Ed.), *Encyclopedia of Land Use, Land Cover and Soil Sciences VII* (pp. 1-10). UNESCO-EOLSS.
- Nieto-Cabrera, C. y Vicuña, A. (2015). Las tierras y territorios rurales como escenarios funcionales para la práctica de la Economía Popular y Solidaria en Ecuador: algunos elementos sobre su uso y aprovechamiento. *Siembra*, 2, 1-13.
- Nishimura, S., Noguchi, T. y Shindo, H. (2008). Distribution of charred plant fragments in particle size fractions of Japanese volcanic ash soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, 54(4), 490-494.
- Nocquet, J.-M., Villegas-Lanza, J. C., Chlieh, M. et al. (2014). Motion of continental slivers and creeping subduction in the northern Andes. *Nature Geoscience*, 7(4), 287-291.
- Noguera-Urbano, E. (2017). El endemismo: diferenciación del término, métodos y aplicaciones. *Acta Zoológica Mexicana*, 33(1), 89-107.
- Noonan, G. R. (1982). The subgenus *Anisotarsus* Chaudoir (genus *Notiobia* Perty; Coleoptera: Carabidae) in South America. *The Coleopterists Bulletin*, 36(4), 531-548.
- Novillo, A. y Ojeda, R. A. (2012). Diversity and distribution of small mammals in the South American dry Andes. *Austral Ecology*, 37(7), 758-766.

- Ochoa, A., Campozano, L., Sánchez, E., Gualán, R. y Samaniego, E. (2016). Evaluation of downscaled estimates of monthly temperature and precipitation for a Southern Ecuador case study. *International Journal of Climatology*, 36, 1244–1255.
- Ochoa, A., Pineda, L., Crespo, P., y Willems, P. (2014). Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates and WRF retrospective precipitation simulation over the Pacific-Andean region of Ecuador and Peru. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 3179–3193.
- Ochoa-Sánchez, A., Crespo, P., Carrillo-Rojas, G., et al. (2019). Actual Evapotranspiration in the High Andean Grasslands: A Comparison of Measurement and Estimation Methods. *Frontiers in Earth Science*, 7, 55.
- Ochoa-Sánchez, A., Crespo, P., Carrillo-Rojas, G., et al. (2020). Unravelling evapotranspiration controls and components in tropical Andean tussock grasslands. *Hydrological Processes*, 34(9), 2117–2127.
- Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., De Bièvre, B., et al. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, 30(22), 4074–4089.
- Oliveira de Nascimento, F., Cheng, J., y Feijó, A. (2021). Taxonomic revision of the pampas cat *Leopardus colocola* complex (Carnivora: Felidae): an integrative approach. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 191(2), 575–611.
- OMM. (2023). El Niño/La Niña Hoy. Boletín Técnico. Organización Meteorológica Mundial, febrero, p. 4. <https://filecloud.wmo.int/share/s/PsfjrklrQPuKvKsqgnEJWA>
- Onore, G. (2005). Edible insects in Ecuador. En Paoletti, M. G. (Ed.). *Ecological Implication of Minilivestock. Potential of Insects, Rodents, Frogs and Snails* (pp. 343–352). Science Publishers, Inc.
- Ordóñez-Delgado, L., Székely, P., Székely, D., et al. (2020). *Plan de Acción para la Conservación de los Anfibios del Abra de Zamora*. Universidad Técnica Particular de Loja y Naturaleza y Cultura Internacional.
- Orellana-Alvear, J., Céleri, R., Rollenbeck, R., y Bendix, J. (2019). Optimization of X-Band Radar Rainfall Retrieval in the Southern Andes of Ecuador Using a Random Forest Model. *Remote Sensing*, 11, 1632.
- Ortega-Andrade, H. M., Rodes Blanco, M., Cisneros-Heredia, D. F., et al. (2021). Red List assessment of amphibian species of Ecuador: a multidimensional approach for their conservation. *PLoS ONE*, 16(5), e0251027.
- Ortiz, P. (2009). Páramos y agro: entre el colonialismo y las herencias neoliberales. En *Gente y Ambiente de Páramo: Realidades y Perspectivas en el Ecuador* (pp. 55–84). EcoCiencia y Abya Yala.
- Oyarzún, P. J., Borja, R. M., Sherwood, S., y Parra, V. (2013). Making sense of agrobiodiversity, diet, and intensification of smallholder family farming in the Highland Andes of Ecuador. *Ecology of Food and Nutrition*, 52, 515–541.
- Pabón-Caicedo, J. D., Arias, P. A., Carril, A. F. et al. (2020). Observed and projected hydroclimate changes in the Andes. *Frontiers in Earth Sciences*, 8, 1–29.
- Pacific, V. J., Jencso K.G. y McGlynn, B.L. (2010). Variable flushing mechanisms and landscape structure control stream DOC export during snowmelt in a set of nested catchments. *Biogeochemistry*, 99, 193–211.
- Padrón, P. S., Pyrcz, T. W. y Willmott, K. R. (2021). A contribution towards resolving the systematics of the high-altitude tropical Andean Satyrine genus *Altopedaliodes* Forster, 1964 (Lepidoptera, Nymphalinae: Satyrinae). *Neotropical Entomology*, 50(5), 767–803.

- Padrón, R. S., Wilcox, B. P., Crespo, P. y Céleri, R. (2015). Rainfall in the Andean Páramo: New Insights from High-Resolution Monitoring in Southern Ecuador. *Journal of Hydrometeorology*, 16, 985-996.
- Padrón, R., Feyen, J., Córdova, M., Crespo, P. y Céleri, R. (2020). Rain gauge inter-comparison quantifies differences in precipitation monitoring. *La Granja*, 31, 7-20.
- Páez-Bimos, S., Molina, A., Calispa, M. et al. (2023). Soil-vegetation-water interactions controlling solute flow and transport in volcanic ash soils of the high Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(7), 1507-1529.
- Páez-Bimos, S., Villacís, M., Morales, O. et al. (2022). Vegetation effects on soil pore structure and hydraulic properties in volcanic ash soils of the high Andes. *Hydrological Processes*, 36, e14678.
- Páez, N. B. y Ron, S. R. (2019). Systematics of Huicundomantis, a new subgenus of Pristimantis (Anura, Strabomantidae) with extraordinary cryptic diversity and eleven new species. *Zookeys*, 868, 1-112.
- Palacios, J., Naveda-Rodríguez, A. y Zapata-Ríos, G. (2018). Large mammal richness in Llanganates National Park, Ecuador. *Mammalia*, 82(4), 309-314.
- Paredes, M. (2010). *Potatoes, pests, and pesticides: Heterogeneity in the context of agricultural modernization in the Highland Andes of Ecuador*. (Doctoral dissertation). Wageningen University.
- Paredes, M., Prado, P. y Sherwood, S. (2020). Las Redes Alternativas de Alimentos como contra-movimiento: el encuentro entre la modernización y la soberanía alimentaria en Ecuador. In E. Daza, T. Atrackery R. Lizano (Coords.), *Cambio climático, biodiversidad y sistemas agroalimentarios, avances y retos a 10 años de la Ley Orgánica del Régimen de la Soberanía Alimentaria en Ecuador* (pp. 125-142). Quito: Universidad Politécnica Salesiana.
- Paredes, M., Soto, M. y Muñoz, F. (2013). *Informe del proyecto Evaluación de las actividades de promoción del consumo de la quinua y el chocho, en cuatro comunidades del cantón Saquisilí, Cotopaxi, Ecuador*. FLACSO.
- Parfitt, R. L. (2009). Allophane and imogolite: Role in soil biogeochemical processes. *Clay Mineralogy*, 44(1), 135-155.
- Parfitt, R. L., Russell, M. y Orbell, G. E. (1983). Weathering sequence of soils from volcanic ash involving allophane and halloysite, New Zealand. *Geoderma*, 29(1), 41-57.
- Parfitt, R. L., Saigusa, M. y Cowie, J. D. (1984). Allophane and halloysite formation in a volcanic ash bed under different moisture conditions. *Soil Science*, 138(5), 360-364.
- Parmesan, C. y Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421, 37-42.
- Parodi, A., Valencia-Salazar, S., Loboguerrero, A. M. et al. (2022). The sustainable transformation of the Colombian cattle sector: *Assessing its circularity*. PLOS Climate, 1, e0000074.
- Parra, R., Bernard, B., Narváez, D. et al. (2016). Eruption Source Parameters for forecasting ash dispersion and deposition from vulcanian eruptions at Tungurahua volcano: Insights from field data from the July 2013 eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 309, 1-13.
- Parra, V., Sales Nunes, P. y Torres-Carvajal, O. (2020). Systematics of Pholidobolus lizards (Squamata, Gymnophthalmidae) from southern Ecuador, with descriptions of four new species. *Zookeys*, 954, 109-156.
- Patiño, S., Hernández, Y., Plata, C. et al. (2021). Influence of land use on hydro-physical soil properties of Andean páramos and its effect on streamflow buffering. *CATENA*, 202, 105227.

- Paucar-Cabrera, A. (2005). A catalog and distributional analysis of the Rutelinae (Coleoptera: Scarabaeidae) of Ecuador. *Zootaxa*, 948(1), 1-92.
- Pazmiño-Otamendi, G. (2020). *Incaspis simonsii*. In O. Torres-Carvajal, G. Pazmiño-Otamendi, F. Ayala-Varelay D. Salazar-Valenzuela (Eds.), *Reptiles del Ecuador. Versión 2022.0. Museo de Zoología*, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Retrieved from <https://bioweb.bio/faunaweb/reptiliaweb/FichaEspecie/Incaspis%20simonsii>
- Peacock, A. J. (1998). Oxygen at high altitude. *BMJ*, 317(7165), 1063-1066.
- Pearson, D. L., Buestán, J. y Navarrete, R. (1999). The tiger beetles of Ecuador: their identification, distribution and natural history (Coleoptera: Cicindelidae). *Contributions Entomology International*, 3(2), 187-315.
- Pelayo, R., Llambí, L. D., Gámez, L. E. et al. (2021). Plant phenology dynamics and pollination networks in summits of the high tropical Andes: a baseline for monitoring climate change impacts. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9(679045), 1-15.
- Peña, P., Pesántez, J., Birkel, C. et al. (2023). How do storm characteristics influence concentration-discharge hysteresis in a high-elevation tropical ecosystem? *Journal of Hydrology*, 619, 129345.
- Percival, H. J., Parfitt, R. L. y Scott, N. A. (2000). Factors Controlling Soil Carbon Levels in New Zealand Grasslands Is Clay Content Important? *Soil Sciences Society of America Journal*, 64(5), 1623-1630.
- Perez, C., Nicklin, C., Sherwood, S. et al. (2010). Climate Change in the High Andes: Implications and Adaptation Strategies for Small-scale Farmers. *International Journal of Environmental*, 6, 71-88.
- Perrigo, A., Hoorn, C. y Antonelli, A. (2020). Why mountains matter for biodiversity. *Journal of Biogeography*, 472, 315-325.
- Pesántez, J., Birkel, C., Mosquera, G. M. et al. (2021). High-frequency multi-solute calibration using an in situ UV-visible sensor. *Hydrological Processes*, 35(9), e14357.
- Pesántez, J., Mosquera, G. M., Crespo, P. et al. (2018). Effect of land cover and hydro-meteorological controls on soil water DOC concentrations in a high-elevation tropical environment. *Hydrological Processes*, 32, 2624-2635.
- Peyre, G., Balslev, H. y Font, X. (2018). Phytoregionalisation of the Andean páramo. *PeerJ*, 6, e4786.
- Peyre, G., Osorio, D., François, R. y Anhelme, F. (2021). Mapping the páramo land-cover in the Northern Andes. *International Journal of Remote Sensing*, 42, 7777-7797.
- Pinos-Morocho, D., Morales-Matute, O. y Durán-López, M. E. (2021). Suelos de páramo: Análisis de percepciones de los servicios ecosistémicos y valoración económica del contenido de carbono en la sierra sureste del Ecuador. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(2), 151-173.
- Ploeg, J. D. van der. (2003). *The Virtual Farmer: Past, Present, and Future of the Dutch Peasantry*. Royal van Gorcum.
- Podwojewski, P., Poulenard, J., Toulkeridis, T. y Gräfe, M. (2022). Polygenic soils in the southern central Ecuadorian highlands as the result of long-lasting pedogenesis, geodynamic processes and climate change. *Journal of South American Earth Sciences*, 120, 104096.
- Podwojewski, P., Poulenard, J., Zambrana, T. y Hofstede, R. (2002). Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the páramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). *Soil Use and Management*, 18, 45-55.
- Podwojewski, P. y Germain, N. (2005). Short-term effects of management on the soil structure in a deep tilled hardened volcanic-ash soil (cangahua) in Ecuador. *European Journal of Soil Science*, 56, 39-51.

- Podwojewski, P. y Poulénard, J. (2000). *Los suelos del páramo*. Serie Páramo 5.
- Ponce-Jara, M. A., Castro, M., Pelaez-Samaniego, M. R. et al. (2018). Electricity sector in Ecuador: An overview of the 2007-2017 decade. *Energy Policy*, 113, 513-522.
- Pouchon, C., Fernández, A., Nassar, J. M. et al. (2018). Phylogenomic analysis of the explosive adaptive radiation of the Espeletia complex Asteraceae in the tropical Andes. *Systematic Biology*, 676, 1041-1060.
- Poulénard, J., Podwojewski, P., Janeau, J. L. y Collinet, J. (2001). Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: Effect of tillage and burning. *Catena*, 45, 185-207.
- Poulénard, J., Podwojewski, P. y Herbillion, A. J. (2003). Characteristics of non-allophanic Andisols with hydric properties from the Ecuadorian páramos. *Geoderma*, 117(3-4), 267-281.
- Pourrut, P. (1994). *L'eau en Equateur, principaux acquis en hydroclimatologie*. Collection Etude et Thèses. Orstom.
- Pronaturaleza. (2021). *Perfil de Ecosistema. Hotspot de Biodiversidad de los Andes Tropicales. Critical Ecosystem Partnership Fund*. Recuperado de <https://www.cepf.net/sites/default/files/tropical-andes-ecosystem-profile-2021-spanish.pdf>.
- Puertas, M. (2017, 24 de octubre). *Ecuador: la minería en los páramos de Azuay y el temor a perder fuentes de agua*. Mongabay Latam.
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P. et al. (2012). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. *Suelos Ecuatoriales*, 42(2), 138-153.
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A. et al. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *Cryosphere*, 7(1), 81-102.
- Rada, F., Azócar, A. y García-Núñez, C. (2019). Plant functional diversity in tropical Andean páramos. *Plant Ecology and Diversity*, 12, 539-553.
- Ramírez-Jaramillo, S., Reyes-Puig, C., Batallas, D. y Yáñez-Muñoz, M. (2018). Ranas terrestres en los ecosistemas surandinos de Ecuador IV: una nueva especie de *Pristimantis* (Anura: Strabomantidae) de los páramos sur del Parque Nacional Sangay. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 10(1), 1-18.
- Ramón, G. (2006). *El poder y los norandinos. La historia en las sociedades norandinas del siglo XVI*. Universidad Andina Simón Bolívar y Corporación Editora Nacional.
- Ramón, J., Correa, A., Timbe, E. et al. (2021). Do mixing models with different input requirements yield similar streamflow source contributions? Case study: A tropical montane catchment. *Hydrological Processes*, 35, e14209.
- Ramon, P., Vallejo Vargas, S., Mothes, P. A. et al. (2021). Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional, the Ecuadorian Seismology and Volcanology Service. *Volcanica*, 4(1), 93-112.
- Ramos, J., Gordon, K. y Ramírez, J. (2021). Efectos provocados por el Covid-19 en la red productiva ecuatoriana. *Revista Cuestiones Económicas: Memorias VI Encuentro Internacional de Economía Resumen*, 037, 22-27.
- Ramsay, P. (1992). *The páramo vegetation of Ecuador: the community ecology, dynamics and productivity of tropical grasslands in the Andes*. Bangor University.
- Ramsay, P. y Oxley, E. (2001). An assessment of aboveground net primary productivity in Andean grasslands of central Ecuador. *Mountain Research and Development*, 21(2), 161-167.

- Ratcliffe, B. C., Cave, R. D. y Paucar-Cabrera, A. (2020). *The Dynastine scarab beetles of Ecuador* (Coleoptera: Scarabaeidae: Dynastinae). *Bulletin of the University of Nebraska State Museum*, 32, 1-586.
- Raymond, P. A., Hartmann, J., Lauerwald, R. et al. (2013). Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature*, 503(7476), 355.
- Razowski, J. y Wojtusiak, J. (2008). Tortricidae (Lepidoptera) from the mountains of Ecuador. Part 1: Southern highlands. *Acta Zoologica Cracoviana*, 51(1-2), 7-41(35).
- Recharte, J. y Gearheard, J. (2001). Los páramos altamente diversos del Ecuador: ecología política de una ecorregión. En P. Mena-Vásquez, G. Medinay R. Hofstede (Eds.), *Los Páramos del Ecuador. Particularidades, problemas y perspectivas* (pp. 55-86). Abya Yala y Proyecto Páramo.
- Reglamento a la Ley de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua. (2015). Suplemento del Registro Oficial 483 de 20 de abril de 2015.
- Reglamento a Ley Orgánica de Tierras Rurales Territorios Ancestrales. (2017). Registro Oficial Suplemento 920 de 11 de enero de 2017.
- Reglamento al Código Orgánico del Ambiente. (2019). Suplemento del Registro Oficial 507 de 12 de junio de 2019.
- Ribadeneira Sarmiento, M. (2016). Recursos genéticos y conocimientos tradicionales en el Convenio sobre la Diversidad Biológica y el Protocolo de Nagoya, algunas dificultades jurídicas y operativas. En T. S. Roca (Ed.), *Biodiversidad y Propiedad Intelectual en Disputa: Situación, Propuestas y Políticas Públicas* (pp. 181-198). Universidad ESAN.
- Ribadeneira Sarmiento, M. (2019). ¿Es el Código Orgánico del Ambiente el nuevo driver contra la conservación de la biodiversidad? *USFQ Law Review*, 6(1), 181.
- Ríos-Touma, B., Acosta, R. y Prat, N. (2014). The Andean Biotic Index (ABI): revised tolerance to pollution values for macroinvertebrate families and index performance evaluation. *Revista de Biología Tropical*, 62(2), 249-273.
- Ríos-Touma, B., Cuesta, F., Rázuri-Gonzales, E. et al. (2022). Elevational biodiversity gradients in the Neotropics: perspectives from freshwater caddisflies. *PLoS ONE*, 17(8), e0272229.
- Rivera, D. y Rodríguez, C. (2011). *Guía divulgativa de criterios para la delimitación de páramos de Colombia*. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Riveros-Iregui, D. A., Covino, T. P. y González-Pinzón, R.A. (2018). The Importance of and Need for Rapid Hydrologic Assessments in Latin America. *Hydrological Processes*, 32.
- Riveros-Iregui, D. A., McGlynn, B-L. Emanuel, R.E. y Epstein, H.E. (2012). Complex terrain leads to bidirectional responses of soil respiration to inter-annual water availability. *Global Change Biology*, 18(2): 749-756.
- Robinson, H. (1997). New species of *Aphanactis* in Ecuador and Bolivia and new combinations in Selloa Heliantheae: *Asteraceae*. *Brittonia*, 49, 71-78.
- Rocci, K. S., Lavalley, J. M., Stewart, C. E. y Cotrufo, M. F. (2021). Soil organic carbon response to global environmental change depends on its distribution between mineral-associated and particulate organic matter: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 793, 148569.
- Rodríguez de Francisco, J. C. (2013). *PES, Peasants and Power in Andean Watersheds: Power relations and payment for environmental services in Colombia and Ecuador*. (Doctoral dissertation). Wageningen University.
- Rodríguez-Espinosa, P. F., Jonathan, M. P., Morales-García, S. S. et al. (2015). Metal enrichment of soils following the April 2012-2013 eruptive activity of the Popocatepetl volcano, Puebla, Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187, 1-7.

- Rodríguez, M., Acevedo-Novoa, D., Machado, D. et al. (2019). Ecohydrology of the Venezuelan páramo: water balance of a high Andean watershed. *Plant Ecology and Diversity*, 12(6), 573-591.
- Román-Valencia, C., Ruiz, R. y Barriga, R. (2005). Una nueva especie ecuatoriana del género de peces andinos *Grundulus* (Characiformes: Characidae). *Revista de Biología Tropical*, 53(3-4), 537-544.
- Romanowski, S. y Jackson, S. T. (2009). *Essay on the geography of plants: Alexander von Humboldt and Aimé Bonpland*. University of Chicago Press.
- Romoleroux, K., Pérez, A., León-Yáñez, S., Quintana, C. et al. (2018). *Base de datos del Herbario QCA*. Versión 1.0. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Recuperado de <https://bioweb.bio/portal/>
- Romoleroux, K., Tandalla, D., Erler, R. y Navarrete, H. (2016). *Plantas vasculares de los bosques de Polylepis en los páramos de Oyacachi*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Ron, S. R., Merino-Viteri, A. y Ortiz, D. A. (2022). *Anfibios del Ecuador*. Versión 2022.0. Museo de Zoología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Recuperado de <https://bioweb.bio/faunaweb/amphibiaweb>
- Rosero-López, D., Knighton, J., Lloret, P. y Encalada, A. C. (2020). Invertebrate response to impacts of water diversion and flow regulation in high-altitude tropical streams. *River Research and Applications*, 36, 223-233.
- Rosero-López, D., Todd, W. M., Flecker, A. S. et al. (2022). A whole-ecosystem experiment reveals flow-induced shifts in a stream community. *Communications Biology*, 5, 420.
- Rosero-López, D., Walter, M. T., Flecker, A. S. et al. (2019). Streamlined eco-engineering approach helps define environmental flows for tropical Andean headwaters. *Freshwater Biology*, 64, 1315-1325.
- Rosero, P., Crespo-Pérez, V., Espinosa, R. et al. (2021). Multi-taxa colonisation along the foreland of a vanishing equatorial glacier. *Ecography*, 44, 1010-1021.
- Ross, C., Fildes, S. y Millington, A. (2017). Land-Use and Land-Cover Change in the Páramo of South-Central Ecuador, 1979-2014. *Land*, 6, 46.
- Rossel, P., Oliveros, V., Ducea, M. N. et al. (2013). The Early Andean subduction system as an analog to island arcs: Evidence from across-arc geochemical variations in northern Chile. *Lithos*, 179, 211-230.
- Rudel, T. K., Coomes, O. T., Moran, E. et al. (2005). Forest transitions: towards a global understanding of land use change. *Global Environmental Change*, 15, 23-31.
- Ruiz, D. (2011). Estudio del recurso hídrico en la alta montaña frente a condiciones climáticas cambiantes. Estudio de caso: cuenca alta río Claro, Parque Nacional Natural Los Nevados. En S. G. Maldonado & B. De Bievre (Eds.), *Paramundi. 2do congreso mundial de páramos*. Memorias. CONDESAN y Ministerio del Ambiente del Ecuador.
- Ruiz, L. (2017). Adverse environmental effects of tourism on communities in the Ecuadorian highlands region. *Current Urban Studies*, 5, 348.
- Saberi, L., McLaughlin, R. T., Crystal Ng, G. H. et al. (2019). Multi-scale temporal variability in meltwater contributions in a tropical glacierized watershed. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23, 405-425.
- Salgado, S., Cuesta, F., Báez, S. et al. (2013a). *Arbustal siempreverde y Herbazal del páramo*. En Ministerio del Ambiente del Ecuador. *Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental* (pp. 134-135). Subsecretaría de Patrimonio Natural.

- Salgado, S., Cuesta, F., Báez, S. et al. (2013b). *Herbazal del páramo. En Ministerio del Ambiente del Ecuador. Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental* (pp. 139-141). Subsecretaría de Patrimonio Natural.
- Salomon, F. (1980). *Los Señores Etnicos de Quito en la época de los Incas*. Instituto Otavaleño de Antropología.
- Samaniego, P., Barba, D., Robin, C. et al. (2012). Eruptive history of Chimborazo volcano (Ecuador): A large, ice-capped and hazardous compound volcano in the Northern Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 221-222, 33-51.
- SAMDMQ (Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito y C40). (2020). *Plan de Acción de Cambio Climático de Quito 2020*. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito.
- Sánchez-Nivicela, J., Celi-Piedra, E., Posse-Sarmiento, V. et al. (2018). A new species of *Pristimantis* (Anura, Craugastoridae) from the Cajas Massif, southern Ecuador. *ZooKeys*, 751, 113-128.
- Sandoya, V., Pauchard, A. y Cavieres, L. (2017). Natives and non-natives plants show different responses to elevation and disturbance on the tropical high Andes of Ecuador. *Ecology Evolution*, 7, 7909-7919.
- Santamaría, S. (2021). *Reconstruction of the eruptive history of central Ecuador volcanoes: constraints on the spatio-temporal evolution of the Andean volcanism*. Université Paris-Saclay.
- Santamaría, S., Quidelleur, X., Hidalgo, S. et al. (2022). Geochronological evolution of the potentially active Iliniza Volcano (Ecuador) based on new K-Ar ages. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 424, 107489.
- Sarmiento, F. O. (2002). Anthropogenic Change in the Landscapes of Highland Ecuador. *Geographical Review*, 92, 213-234.
- Sarmiento, F. O. (2012). *Contesting Páramo: A Critical Biogeography of the Northern Andean Highlands*. Charlotte: Kona Publishing and Media Group.
- Sarmiento, F. O. y Frolich, L. M. (2002). Andean cloud forest tree lines: Naturalness, agriculture and the human dimension. *Mountain Research and Development*, 22(3), 278-287.
- Sarmiento, L., Llambí, L. D., Escalona, A. y Márquez, N. (2003). Vegetation patterns, regeneration rates and divergence in an old-field succession of the high tropical Andes. *Plant Ecology*, 166, 145-156.
- Sarmiento, L. y Bottner, P. (2002). Carbon and nitrogen dynamics in two soils with different fallow times in the high tropical Andes: indications for fertility restoration. *Applied Soil Ecology*, 19(1), 79-89.
- Schaefer, S. A., Chakrabarty, P., Geneva, A. J. y Sabaj Pérez, M. H. (2011). Nucleotide sequence data confirm diagnosis and local endemism of variable morphospecies of Andean astrolepid catfishes (Siluriformes: Astrolepididae). *Zoological Journal of the Linnean Society*, 162(1), 90-102.
- Schneider, C.L., Herrera, M., Raisle et al. (2020) Carbon Dioxide (CO₂) Fluxes from Terrestrial and Aquatic Environments in a High-Altitude Tropical Catchment. *Journal of Geophysical Research – Biogeosciences* 125, e2020JG005844.
- Schoolmeester, T., Johansen, K. S., Alfthan, B. et al. (2018). *Atlas de Glaciares y Aguas Andinos. El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos*. UNESCO y GRID-Arendal.
- Schulz, C. y Adams, W. M. (2022). Addressing conflict over dams: The inception and establishment of the World Commission on Dams. *Water History*, 14, 289-308.

- Schütte, P., Chiaradia, M. y Beate, B. (2010). Geodynamic controls on Tertiary arc magmatism in Ecuador: Constraints from U-Pb zircon geochronology of Oligocene-Miocene intrusions and regional age distribution trends. *Tectonophysics*, 489(1-4), 159-176.
- Segovia, M. C. (2011). Los riesgos de la reforestación de los páramos con especies exóticas: el caso *Polylepis racemosa*. *Propuestas Andinas*, 4, 1-4.
- Seimon, T. A., Seimon, A., Daszak, P. et al. (2007). Upward range extension of Andean anurans and chytridiomycosis to extreme elevations in response to tropical deglaciation. *Global Change Biology*, 13(1), 288-299.
- Senar, O., Webster, K. y Creed, I. (2018). Catchment-Scale Shifts in the Magnitude and Partitioning of Carbon Export in Response to Changing Hydrologic Connectivity in a Northern Hardwood Forest. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123.
- Sevillano-Ríos, C. S., Rodewald, A. D. y Morales, L. V. (2018). Ecología y conservación de las aves asociadas con *Polylepis*: ¿qué sabemos de esta comunidad cada vez más vulnerable? *Austral Ecology*, 28, 216-228.
- Sevillano-Ríos, C. S., Rodewald, A. D. y Morales, L. V. (2020). Alpine birds of South America. In Goldstein, M. Y. y DellaSala, D. (Eds.), *Encyclopedia of the World's Biomes* (pp. 492-504). Amsterdam: Elsevier.
- Sevink, J. y Hofstede, R. (2013). Los árboles como elemento importante del páramo. In Cuesta, F., Sevink, J., Llambí, L. D., de Bièvre, B. y Posner, J. (Eds.), *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos* (pp. 422-442). Lima-Quito: CONDESAN.
- SGCA, PE/BM, US/GEF, US/MAE/PRAA, EC/FONAG, EC. (2011). *Sistema de monitoreo para evaluar la disponibilidad de agua y evolución de los impactos asociados al cambio climático en la parte alta de la cuenca del río Guayllabamba y en las microcuencas Papallacta y Antisana. Estudio sobre Caudales Ecológicos*. Quito.
- Sherwood, S. (2009). Learning from Carchi: Agricultural Modernisation and the Production of Decline. Ph. D. Thesis, Wageningen University. Shine R. 2005. Life-history evolution in reptiles. Annual Review of *Ecology and Evolution* 36(1): 23-46.
- Sherwood, S., Arce, A., Berti, P. et al. (2013). Tackling the new materialities: Modern food and counter-movements in Ecuador. *Food Policy*, 41, 1-10.
- Sherwood, S., Caulfield, M., Paredes, M. et al. (2023). Response-ability: Establishing Regenerative Soil Management in the Northern Andes. In Uphoff, N. y Thies, J. (Eds.), *Biological Approaches to Regenerative and Resilient Soil Systems*. CRC Press.
- Sherwood, S., Paredes, M., Gross, J. y Hammer, M. (2015). The Future of Sustainability as a Product of the Present: Lessons from Modern Food in Ecuador. *Rivista de Studi sulla Sostenibilita*, 21, 83-103.
- Shoji, S., Dahlgren, R. y Nanzyo, M. (1993a). Genesis of volcanic ash soils. In S. Shoji, R. Dahlgren y M. Nanzyo (Eds.), *Volcanic Ash Soils: Genesis, Properties and Utilization* (pp. 1-17). Elsevier.
- Shoji, S., Hakamada, T. y Tomioka, E. (1990). Properties and classification of selected volcanic ash soils from Abashiri, northern Japan-transition of Andisols to Mollisols. *Soil Science and Plant Nutrition*, 36(3), 409-423.
- Shoji, S., Nanzyo, M., Dahlgren, R. A. y Quantin, P. (1996). Evaluation and proposed revisions of criteria for Andosols in the World Reference Base for Soil Resources. *Soil Science*, 161(9), 604-615.
- Shoji, S., Nanzyo, M., Dahlgren, R. A. y Quantin, P. (1996). Evaluation and proposed revisions of criteria for Andosols in the World Reference Base for Soil Resources. *Soil Science*, 161(9), 604-615.

- Shoji, S. y Takahashi, T. (2002). Environmental and agricultural significance of volcanic ash soils. *Global Journal of Environmental Research*, 6, 113-135.
- Sierra, R. (Ed.). (1999). *Propuesta preliminar de un sistema de clasificación de vegetación para el Ecuador continental*. Proyecto INEFAN/GEF-BIRF y EcoCiencia.
- Sierra, R., Campos, F. y Chamberlin, J. (1999). *Áreas Prioritarias para la Conservación de la Biodiversidad en el Ecuador continental: un estudio basado en la diversidad de ecosistemas y su ornitofauna*. Ministerio del Ambiente, Proyecto INEFAN/GEF-BIRF y EcoCiencia.
- SIGTIERRAS. (2017). *Memoria explicativa del Mapa de Órdenes de Suelos del Ecuador*. Recuperado de http://metadatos.sigtierras.gob.ec/pdf/MEMORIA_MAPA_DE_ORDENES_DE_SUELOS_MAG_SIGTIERRAS.pdf
- Sih, A., Jonsson, B. G. y Luikart, G. (2000). Habitat loss: ecological, evolutionary and genetic consequences. *Trends in Ecology and Evolution*, 15(4), 132-134.
- Sinchihuano, C. (2017). *Turismo comunitario agroecológico, eje de Desarrollo Sostenible en el territorio rural indígena Kayambi: estudios de caso Paquiestancia y La Esperanza, localizados en los cantones Cayambe y Pedro Moncayo*. Tesis de MSc. Quito: FLACSO.
- Singleton, P. L., McLeod, M. y Percival, H. J. (1989). Allophane and halloysite content and soil solution silicon in soils from rhyolitic volcanic material, New Zealand. *Australian Journal of Soil Research*, 27(1), 67-77.
- Skansi, M., Brunet, M., Sigró, J. et al. (2013). Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global and Planetary Change*, 100, 295-307.
- Skarbø, K. y van der Molen, K. (2016). Maize migration: key crop expands to higher altitudes under climate change in the Andes. *Climate and Development*, 8(3), 245-255.
- Sklenář, P. (2000). *Vegetation ecology and phytogeography of Ecuadorian superpáramos* (Doctoral dissertation). Charles University.
- Sklenář, P. (2006). Searching for altitudinal zonation: species distribution and vegetation composition in the superpáramo of Volcán Iliniza, Ecuador. *Plant Ecology*, 184(2), 337-350.
- Sklenář, P., Jørgensen, P. M. (1999). Distribution patterns of páramo plants in Ecuador. *Journal of Biogeography*, 26(4), 681-691.
- Sklenář, P., Kovár, P., Palice, Z. et al. (2010). Primary succession of high-altitude Andean vegetation on lahars of Volcán Cotopaxi, Ecuador. *Phytocoenologia*, 40(1), 15.
- Sklenář, P., Kučerová, A., Macková, J. y Macek, P. (2015). Temporal variation of climate in the high-elevation páramo of Antisana, Ecuador. *Geografía Física e Dinámica Cuaternaria*, 38, 67-78.
- Sklenář, P., Luteyn, J. L., Ulloa Ulloa, C. et al. (2005). Flora genérica de los páramos-Guía ilustrada de las Plantas Vasculares. *Memoirs of The New York Botanical Garden*, 92.
- Sklenář, P., Romoleroux, K., Muriel, P. et al. (2021). Distribution changes in páramo plants from the equatorial high Andes in response to increasing temperature and humidity variation since 1880. *Alpine Botany*, 131(2), 201-212.
- Sklenář, P. y Balslev, H. (2005). Superpáramo plant species diversity and phytogeography in Ecuador. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 200(5), 416-433.
- Sklenář, P. y Balslev, H. (2007). Geographic flora elements in the Ecuadorian superpáramo. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 202(1), 50-61.
- Sklenář, P. y Laegaard, S. (2003). Rain-Shadow in the High Andes of Ecuador Evidenced by Páramo Vegetation. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 35, 8-17.

- Sklenář, P. y Ramsay, P. (2001). Diversity of zonal páramo plant communities in Ecuador. *Diversity and Distributions*, 7(3), 113-124.
- Sklenář, P. y Robinson, H. (2000). Two new species in Oritrophium and Floscaldasia Asteraceae: Astereae from the high Andes of Ecuador. *Novon*, 10(2), 144-148.
- Sklenář, P. y Romoleroux, K. (2021). *Werneria spathulata*, nuevo registro para la flora del Ecuador, y redescubrimiento de *Xenophyllum acerorum*. *Caldasia*, 43(1), 214-217.
- Smith, J. M. B. y Cleef, A. M. (1988). Composition and origins of the world's tropical alpine floras. *Journal of Biogeography*, 15, 631-645.
- Smith, P., Fang, C., Dawson, J. J. C. y Moncrieff, J. B. (2008). Impact of Global Warming on Soil Organic Carbon. *Advances in Agronomy*, 97, 1-43.
- Soil Survey Staff. (2014). Keys to soil taxonomy. *Soil Conservation Service*, 12, 410.
- Solis Carrión, H. (2020). *Análisis y propuesta para la Ley Orgánica Reformatoria a la Ley Orgánica de los Recursos Hídricos. Usos y Aprovechamiento del Agua*. Quito: CAMAREN.
- Sømme, L. (1989). Adaptations of terrestrial arthropods to the alpine environment. *Biological Reviews*, 64(4), 367-407.
- Sømme, L., Davidson, R. L. y Onore, G. (1996). Adaptations of insects at high altitudes of Chimborazo, Ecuador. *European Journal of Entomology*, 93(3), 313-318.
- Sømme, L. y Block, W. (1991). Adaptations to alpine and polar environments in insects and other terrestrial arthropods. In Lee, R. E. y Denlinger, D. L. (Eds.), *Insects at Low Temperatures* (pp. 318-359). Chapman and Hall.
- Spikings, R., Reitsma, M. J., Boekhout, F. et al. (2016). Characterisation of Triassic rifting in Peru and implications for the early disassembly of western Pangaea. *Gondwana Research*, 35, 124-143.
- Stadel, C. H. (2008). Vulnerability, resilience and adaptation: Rural development in the Tropical Andes. *Pirineos*, 163, 15-36.
- Stanley, E. H. y del Giorgio, P.A. (2018). Toward an integrative, whole network approach to C cycling of inland waters. *Limnology and Oceanography Letters*, 3(3), 39-40.
- Stattersfield, A. J., Crosby, M. J., Long, A. J. et al. (1998). *Endemic Bird Areas of the World: priorities for biodiversity conservation*. BirdLife International.
- Stearns, S. C. (1992). *The Evolution of Life Histories*. Oxford University Press.
- Steinbauer, M. J., Field, R., Grytnes, J. A. et al. (2016). Topography-driven isolation, speciation and a global increase of endemism with elevation. *Global Ecology and Biogeography*, 25(9), 1097-1107.
- Steinmann, M., Hungerbühler, D., Seward, D. y Winkler, W. (1999). Neogene tectonic evolution and exhumation of the southern Ecuadorian Andes: a combined stratigraphy and fission-track approach. *Tectonophysics*, 307(3-4), 255-276.
- Sternberg, D. y Kennard, M. J. (2013). Environmental, spatial and phylogenetic determinants of fish life-history traits and functional composition of Australian rivers. *Freshwater Biology*, 58(9), 1767-1778.
- Storz, J. F., Scott, G. R. y Cheviron, Z. A. (2010). Phenotypic plasticity and genetic adaptation to high-altitude hypoxia in vertebrates. *Journal of Experimental Biology*, 213(24), 4125-4136.
- Stotz, D. F., Fitzpatrick, J. W., Parker III, T. A. y Moskovits, D. K. (1996). *Neotropical Birds: ecology and conservation*. University of Chicago Press.
- Suárez, E., Arcos, E., Moreno, C. et al. (2013). Influence of vegetation types and ground cover on soil water infiltration capacity in a high-altitude páramo ecosystem. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 5(1), B14-B21.

- Suárez, E., Chimbolema, S. y Jaramillo, R. (2022a). Challenges and opportunities for restoration of high-elevation Andean peatlands in Ecuador. *Mitigation and Adaptation Strategies Global Change*, 27(30).
- Suárez, E., Chimbolema, S. y Jaramillo, R. (2022b). *Turberas de páramo en el Ecuador: notas sobre ecología, conservación, y restauración de un ecosistema estratégico*. USFQ.
- Suárez, E., Orndahl, K. y Goodwin, K. (2015). Lava flows and moraines as corridors for early plant colonization of glacier forefronts on tropical volcanoes. *Biotropica*, 47, 645-649.
- Suárez, E., Encalada, A. C., Chimbolema, S. et al. (2023). On the Use of “Alpine” for High-Elevation Tropical Environments. *Mountain Research and Development*, 43(1): V1-V4.
- Suárez, E. y Medina, G. (2001). Vegetation Structure and Soil Properties in Ecuadorian Páramo Grasslands with Different Histories of Burning and Grazing. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 33, 158-164.
- Sucozhañay, A. y Céleri, R. (2018). Impact of Rain Gauges Distribution on the Runoff Simulation of a Small Mountain Catchment in Southern Ecuador. *Water*, 10, 1169.
- Szakács, A. (2010). From a definition of “volcano” to conceptual volcanology. In Cañón-Tapia, E. y Szakács, A. (Eds.), *What is a Volcano? GSA Special papers 470* (pp. 67-76).
- Székely, P., Eguiguren, J. S., Ordóñez-Delgado, L. et al. (2020). Fifty years after: A taxonomic revision of the amphibian species from the Ecuadorian biodiversity hotspot Abra de Zamora, with the description of two new *Pristimantis* species. *PLoS ONE*, 15(9), e0238306.
- Székely, P., Eguiguren, J. S., Székely, D. et al. (2018). A new minute *Pristimantis* (Amphibia: Anura: Strabomantidae) from the Andes of southern Ecuador. *PLoS ONE*, 13(8), e0202332.
- Takahashi, T., Yamada, K., Kanno, H. y Nanzyo, M. (2010). Organic Carbon Accumulation in Andosols: (2) Contribution of Aluminum-humus Complexes to Carbon Accumulation in Non-allophanic Andosols. *Journal of Integrated Field Science*, 7, 69-72.
- Takahashi, T. y Dahlgren, R. A. (2016). Nature, properties and function of aluminum-humus complexes in volcanic soils. *Geoderma*, 263, 110-121.
- Testolin, R., Attorre, F., Borchardt, P. et al. (2021). Global patterns and drivers of alpine plant species richness. *Global Ecology and Biogeography*, 30(6), 1218-1231.
- Theng, B. K. G. y Yuan, G. (2008). Nanoparticles in the soil environment. *Elements*, 4(6), 395-399.
- Thompson, J. B., Zurita-Arthos, L., Müller, F., Chimbolema, S. y Suárez, E. (2021). Land use change in the Ecuadorian páramo: The impact of expanding agriculture on soil carbon storage. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 53(1), 48-59.
- Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E., Davis, M. E. y Brecher, H. H. (2011). Tropical glaciers, recorders and indicators of climate change, are disappearing globally. *Annals of Glaciology*, 52, 23-34.
- Tinoco, B. A., Astudillo, P. X., Latta, S. C., Strubbe, D. y Graham, C. H. (2013). Influence of patch factors and connectivity on the avifauna of fragmented *Polylepis* forest in the Ecuadorian Andes. *Biotropica*, 45(5), 602-611.
- Tirira, D. G., Brito, J., Burneo, S. F. et al. (2022). *Mamíferos del Ecuador: lista oficial actualizada de especies*, Versión 2022.1. Asociación Ecuatoriana de Mastozoología.
- Toasa, A. (2011). *Manejo de páramos y uso vertical de pisos ecológicos: estudio comparativo entre comuneros indígenas del Parque Nacional Cayambe Coca y hacendados del Parque Nacional Cotopaxi*. (Tesis de maestría). FLACSO.
- Tognelli, M. F., Lasso, C. A., Bota-Sierra, C. A. et al. (2016). *Estado de Conservación y Distribución de la Biodiversidad de Agua Dulce en los Andes Tropicales*. UICN.

- Tonneijck, F. H. (2009). *Volcanic ash soils in Andean ecosystems: unravelling organic matter distribution and stabilisation*. (Tesis de Ph. D.). University of Amsterdam.
- Tonneijck, F. H., Jansen, B., Nierop, K. G. J. et al. (2010). Towards understanding of carbon stocks and stabilization in volcanic ash soils in natural Andean ecosystems of northern Ecuador. *European Journal of Soil Sciences*, 61(3), 392-405.
- Torres-Carvajal, O., Pazmiño-Otamendi, G., Ayala-Varela, F. y Salazar-Valenzuela, D. (2022). *Reptiles del Ecuador*, Versión 2022.1. Museo de Zoología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Recuperado de <https://bioweb.bio/faunaweb/reptiliaweb>, consultado el 20 de septiembre de 2022.
- Torres-Díaz, C., Cavieres, L. A., Muñoz-Ramírez, C. y Arroyo, M. T. K. (2007). Consecuencias de las variaciones microclimáticas sobre la visita de insectos polinizadores en dos especies de *Chaetanthera* (Asteraceae) en los Andes de Chile central. *Revista Chilena de Historia Natural*, 80(4), 455-468.
- Torres, S. F. y Proaño, C. O. (2018). Componentes del balance hídrico en los páramos de Jatunsacha, Ecuador. *La Granja*, 28, 52-66.
- Tovar, C., Arnillas, C. A., Cuesta, F. y Buytaert, W. (2013). Diverging responses of tropical Andean biomes under future climate conditions. *PLoS ONE*, 8, e63634.
- Tropicos.org. (2022). Missouri Botanical Garden. Recuperado de <https://www.tropicos.org>. Consultado el 18 de diciembre de 2022.
- Ugolini, F. C. y Dahlgren, R. A. (2002). Soil development in volcanic ash. *Global Environmental Research* 6: 69-81.
- Ulloa A. y Juan J. (1748). *Relación Histórica del Viaje a la América Meridional, hecho de Orden de Su Majestad Católica para medir algunos Grados de Meridiano Terrestre, y venir por ellos en conocimiento de la verdadera Figura y Magnitud de la Tierra, con otras varias Observaciones Astronómicas y Físicas*. Primera Parte/Tomo I. Madrid: Antonio Marín.
- Ulloa Ulloa, C., Acevedo-Rodríguez, P., Beck, S. et al. (2017). An integrated assessment of the vascular plant species of the Americas. *Science*, 358(6370), 1614-1617.
- Ulloa Ulloa, C. y Fernández, D. (Eds.). (2015). *Flora de los páramos del Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador*. Serie de Publicaciones Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales del Instituto Nacional de Biodiversidad. Publicación Patrimonio Natural del Ecuador N. 2.
- Ulloa Ulloa, C. y Jørgensen, P. M. (1993). Árboles y arbustos de los Andes del Ecuador. *AAU Reports*, 30, 1-264.
- Uribe Botero, E. (2015). *El Cambio Climático y sus Efectos en la Biodiversidad en América Latina*. CEPAL, Naciones Unidas.
- Valdiviezo-Rivera, J., Terneus, E., Vera, D. y Urbina, A. (2016). Análisis de producción gonadal del pez *Grundulus quitoensis* (Characiformes: Characidae) en la laguna altoandina "El Voladero", provincia El Carchi, Ecuador. *Biota Colombiana*, 17(2), 89-97.
- Vallejo-Rojas, V., Ravera, F. y Rivera-Ferre, M. G. (2016). Developing an integrated framework to assess agri-food systems and its application in the Ecuadorian Andes. *Regional Environmental Change*, 16(8), 2171-2185.
- Vallejo, C., Almagor, S., Romero, C. et al. (2020). Sedimentology, provenance and radiometric dating of the Silante Formation: Implications for the Cenozoic evolution of the Western Andes of Ecuador. *Minerals*, 10(10), 929.
- Vallejo, C., Spikings, R. A., Horton, B. K. et al. (2019). Late Cretaceous to Miocene stratigraphy and provenance of the coastal forearc and Western Cordillera of Ecuador: Evidence for accretion of a single oceanic plateau fragment. In Horton, B. y Folguera, A. (Eds.), *Andean tectonics* (pp. 209-236). Elsevier.

- Vallejo, C., Winkler, W., Spikings, R. y Luzieux, L. (2009). Evolución geodinámica de la cordillera Occidental (cretácico tardío-paleógeno). *Revista Politécnica*, 30(1), 112-130.
- Valverde, F., Córdoba, J. y Parra, R. (2001). *Erosión de suelo causada por labranza con maquinaria agrícola (arado y rastra) en Carchi, Ecuador*. INIAP.
- Van de Walle, E. (2020). *Caractérisations physico-chimiques de sols du páramo mis en culture: Étude de cas dans le bassin versant de Soroche, Équateur, Andes méridionales*. UCLouvain.
- Van der Hammen, T. (1974). The Pleistocene changes of vegetation and climate in tropical South America. *Journal of Biogeography*, 1, 3-26.
- Van der Hammen, T. y Cleef, A. (1986). Development of the high Andean páramo flora and vegetation. In Vuilleumier, F. y Monasterio, M. (Eds.), *High altitude tropical biogeography* (pp. 153-201). Oxford University Press.
- Van Landuyt, W., Hoste, I., Vanhecke, L. et al. (2006). Atlas van de flora van Vlaanderen en het Brussels Gewest. Bruselas: Flo Wer/Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek/Nationale Plantentuin van België.
- Van Ypersele, R. (2019). *Impact du pâturage sur le carbone organique dans les sols du páramo andin Étude de cas à l'Antisana, en Équateur*. Tesis. Université Catholique de Louvain.
- Vannote, R. L., Minshall, G.W., Cummins, K.W. et al. (1980), The river continuum concept, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37(1), 130-137.
- Vargas, H., Neill, D., Asanza, M. et al. (2000). *Vegetación y flora del Parque Nacional Llanganates. Biodiversidad en el Parque Nacional Llanganates: un reporte de las evaluaciones ecológicas y socioeconómicas rápidas*. EcoCiencia, Herbario Nacional del Ecuador, Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales e Instituto Internacional de Reconstrucción Rural.
- Vásconez, F. J. (2019). *Exposure-based risk analysis in case of a Plinian eruption (VEI 4) of Pululahua Volcanic Complex, Ecuador*. Université de Genève.
- Vásconez, F. J., Hidalgo, S., Battaglia, J. et al. (2022). Linking ground-based data and satellite monitoring to understand the last two decades of eruptive activity at Sangay volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, 84(5), 49.
- Vásconez, F. J., Samaniego, P., Phillips, J. et al. (2022). Evidence of destructive debris flows at (pre-) Hispanic Cayambe settlements, Ecuador. *Quaternary International*, 634, 65-80.
- Vásquez, D. L. A., Balslev, H. y Sklenář, P. (2015). Human impact on tropical-alpine plant diversity in the northern Andes. *Biodiversity and Conservation*, 24, 2673-2683.
- Vasquez Espinoza, C. B. (2019). Diversidad de recursos florales como predictores de la diversidad de insectos polinizadores de un ecosistema altoandino en el sur del Ecuador. Tesis. Cuenca: Universidad del Azuay.
- Velasco-Linares P y Vargas O. 2008. Problemática de los Bosques Altoandinos. in Vargas O (Ed.). *Estrategias para la restauración ecológica del bosque altoandino* (El caso de la Reserva Forestal Municipal de Cagua, Cundinamarca). Universidad Nacional de Colombia. P. 41-56
- Vélez-Espino, L. A. (2003a). Conservation aquaculture of the Andean catfish *Astroblepus ubidiai*: effect of light intensity on growth rate and number of reproductive allocations. *Journal of the World Aquaculture Society*, 18(4), 337-352.

- Vélez-Espino, L. A. (2003b). Taxonomic revision, ecology and endangerment categorization of the Andean catfish *Astroblepus ubidiai* (Teleostei: Astroblepidae). *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 13(4), 367-378.
- Vélez-Espino, L. A. y Fox, M. G. (2005). Demographic and environmental influences on life-history traits of isolated populations of the Andean catfish *Astroblepus ubidiai*. *Environmental Biology of Fishes*, 72(2), 189-204.
- Verweij, P. (1995). *Spatial and temporal modelling of vegetation patterns. Burning and grazing in the páramo of Los Nevados National Park, Colombia*. (Ph. D. Thesis). University of Amsterdam.
- Vigneri, R., Malandrino, P., Giani, F. et al. (2017). Heavy metals in the volcanic environment and thyroid cancer. *Molecular and Cellular Endocrinology*, 457, 73-80.
- Villacís, M. (2008). *Ressources en eau glaciale dans les Andes d'Equateur en relation avec les variations du climat: Le cas du volcan Antisana*. (Ph. D. Thesis). Université Montpellier.
- Villacís, M. y Cachipundo, C. (2021). La declaratoria del Área de Protección Hídrica en el territorio del pueblo Kayambi. In Cachipundo, C. (Coord.), *Agua para la gente* (pp. 43-82). Editorial Universitaria Abya Yala.
- Villamarín, C., Rieradevall, M. y Prat, N. (2020). Macroinvertebrate diversity patterns in tropical highland Andean rivers. *Limnetica*, 39(2), 677-691.
- Vimos, D. J., Encalada, A. C., Ríos-Touma, B. et al. (2015). Effects of exotic trout on benthic communities in high-Andean tropical streams. *Freshwater Science*, 34, 770-783.
- Vos, J., van Ommen, P. y Mena-Vásquez, P. (2019). To certify or not to certify: flower production practices in Ecuador. In Vogt, M. (Ed.), *Sustainability certification schemes in the agricultural and natural resource sectors: Outcomes for society and the environment*. Routledge.
- Voss, R. S. (2003). *A new species of Thomasomys (Rodentia: Muridae) from eastern Ecuador, with remarks on mammalian diversity and biogeography in the Cordillera Oriental*. American Museum Novitates, 3421, 1-47.
- Vuille, M., Bradley, R. S., Werner, M. y Keimig, F. (2003). 20th century climate change in the tropical Andes: observations and model results. *Climate Change*, 59, 75-99.
- Vuille, M., Bradley, R. S. y Keimig, F. (2000). Climate variability in the Andes of Ecuador and its relation to Tropical Pacific and Atlantic sea surface temperature anomalies. *Journal of Climate*, 13(14), 2520-2535.
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C. et al. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes—impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*, 176, 195-213.
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P. et al. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89, 79-96.
- Vuille, M., Franquist, E., Garreaud, R. et al. (2015). Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. *Journal Geophysical Research-Atmospheres*, 120, 3745-3757.
- Vuilleumier, F. y Simberloff, D. (1980). Ecology versus history as determinants of patchy and insular distributions in high Andean birds. *Evolutionary Biology*, 12, 235-379.
- Wagner, E. (1979). Arqueología de los Andes Venezolanos. In Salgado-Labouriau, M. L. (Ed.), *El Medio Ambiente Páramo* (pp. 207-218). Centro de Estudios Avanzados.
- Weber, R. E., Ostojic, H., Fago, A. et al. (2002). Novel mechanism for high-altitude adaptation in hemoglobin of the Andean frog *Telmatobius peruvianus*. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 283(5), R1052-R1060.

- Weng, C., Bush, M. B., Curtis, J. H., Kolata, A. L., Dillehay, T. D. y Binford, M. W. (2006). Deglaciation and Holocene climate change in the western Peruvian Andes. *Quaternary Research*, 66, 87-96.
- Werner, R., Hoernle, K., Barckhausen, U. y Hauff, F. (2003). Geodynamic evolution of the Galápagos hot spot system (Central East Pacific) over the past 20 my: Constraints from morphology, geochemistry, and magnetic anomalies. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(12), 1-28.
- White, S. (2013). Grass páramo as hunter-gatherer landscape. *The Holocene*, 23(6), 898-915.
- Whitmore, K.M., Stewart, N., Encalada et al. (2021) Spatiotemporal Variability in the Gas Transfer Velocity of CO₂ in a Tropical Mountainous Stream Using Two Independent Methods, *Ecosphere* 12 (7) Article e03647.
- WHO. (2017). Guidelines for drinking-water quality [Chapter 12] *Trihalomethanes*. In *Guidelines for drinking-water quality* (pp. 427-429). Ginebra.
- Wieder, R. K., Vitt, D.H. y Benscoter, B.W. (2006), Peatlands and the boreal forest, in *Boreal peatland ecosystems* (pp. 1-8). Springer.
- Wiegant, D., Bakx, J., Flohr, N. et al. (2022). Ecuadorian water funds' use of scale-sensitive strategies to stay on course in forest and landscape restoration governance. *Journal of Environmental Management*, 311, 114850.
- Wille, M., Hooghiemstra, H., Hofstede, R. et al. (2002). Upper forest line reconstruction in a deforested area in northern Ecuador based on pollen and vegetation analysis. *Journal of Tropical Ecology*, 18(3), 409-440.
- Williams, M. W., Hood, E. W., Ostberg, G. et al. (2001). Synoptic survey of surface water isotopes and nutrient concentrations, páramo high-elevation region, Antisana Ecological Reserve, Ecuador. *Artic, Antarctic and Alpine Research*, 33, 397-403.
- Winckell, A., Zebrowski, C. y Sourdat, M. (1997). Las regiones y paisajes del Ecuador. In Winckell, A. (Coord.), *Geografía básica del Ecuador: Geografía física* (pp. 417 p.). SEDIG.
- Winkler, W., Villagómez, D., Spikings, R. et al. (2005). The Chota basin and its significance for the inception and tectonic setting of the inter-Andean depression in Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*, 19(1), 5-19.
- Wolf, B. O., McKechnie, A. E., Schmitt, C. J. et al. (2020). Extreme and variable torpor among high-elevation Andean hummingbird species. *Biological Letters*, 16(9), 20200428.
- WRB - World Reference Base for soil resources. (2015). *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No. 106. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Yáñez-Muñoz, M. H., Altamirano, M. A., Cisneros-Heredia, D. F. y Gluesenkamp, A. (2010). Nueva especie de sapo andino *Osornophryne* (Amphibia: Bufonidae) del norte del Ecuador, con notas sobre la diversidad del género en Colombia. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 2(3), B46-B53.
- Yanggen, D., Cole, D. C., Crissman, C. y Sherwood, S. (2004). Pesticide Use in Commercial Potato Production: Reflections on Research and Intervention Efforts towards Greater Ecosystems Health in Northern Ecuador. *EcoHealth*, 1, SU72-SU83.
- Yepes, H., Audin, L., Alvarado, A., et al. (2016). A new view for the geodynamics of Ecuador: Implication in seismogenic source definition and seismic hazard assessment: Ecuador Geodynamics and PSHA. *Tectonics*, 35(5), 1249-1279.

- Young, B. E., Lips, K. R., Reaser, J. K., et al. (2001). Population declines and priorities for amphibian conservation in Latin America. *Conservation Biology*, 15(5), 1213-1223. <http://www.jstor.org/stable/3061476>
- Young, B. E., Young, K. R. y Josse, C. (2011). Vulnerability of Tropical Andean Ecosystems to Climate Change. In Herzog, S. K., Martinez, R., Joergensen, P. M. y Tiessen, H. (Eds.), *Climate change and biodiversity in the Tropical Andes* (pp. 170-181). IAI/SCOPE, Sao José dos Campos.
- Young, K. R., León, B., Jørgensen, P. M. y Ulloa Ulloa, C. (2007). Tropical and subtropical landscapes of the Andes Mountains. In Veblen, T. T., Young, K. R., & Orme, A. R. (Eds.), *The Physical Geography of South America* (pp. 200-216). Oxford University Press.
- Zaher, H., Arredondo, J. C., Valencia, J. H., Arbeláez, E., Rodrigues, M. T. y Altamirano-Benavides, M. A. (2014). A new Andean species of *Philodryas* (Dipsadidae, Xenodontinae) from Ecuador. *Zootaxa*, 3785(3), 469-480.
- Zapata Ríos, G. y Branch, L. C. (2016). Altered activity patterns and reduced abundance of native mammals in sites with feral dogs in the high Andes. *Biological Conservation*, 193(1), 9-16.
- Zapata Ríos, G. y Branch, L. C. (2018). Mammalian carnivore occupancy is inversely related to presence of domestic dogs in the high Andes of Ecuador. *PLoS ONE*, 13(2), e0192346.
- Zapata Ríos, G., Suárez, E., Utreras, V. y Cueva, R. (2011). Uso y conservación de fauna silvestre en el Ecuador. In Krainer, A. y Mora, M. F. (Eds.), *Retos y Amenazas en Yasuni* (pp. 97-116). FLACSO.
- Zapatta, A. y Mena-Vásquez, P. (2013). Acumulación de agua y floricultura en un mosaico de territorios de riego: el caso Pisque, Ecuador. In Arroyo, A. y Boelens, R. (Eds.), *Aguas Robadas: despojo hídrico y movilización social* (pp. 167-184). Justicia Hídrica-PARAGUAS, Ediciones Abya-Yala, Instituto de Estudios Peruanos (IEP).
- Zebrowski, C. y Sourdat, M. (1997). Los factores de la pedogénesis y los suelos en Ecuador, Quito, Ecuador. In Winckell, A., Marocco, R., Winter, T., Huttel, C., Pourrut, P., Zebrowski, C., & Sourdat, M. (Eds.), *Los Paisajes Naturales del Ecuador: Las Condiciones Generales del Medio Natural* (pp. 97-128). Centro Ecuatoriano de Investigación Geográfica (CEDIG).
- Zehetner, F., Miller, W. P. y West, L. T. (2003). Pedogenesis of Volcanic Ash Soils in Andean Ecuador. *Soil Science Society of America Journal*, 67(6), 1797-1809.
- Zehetner, F. (2010). Does organic carbon sequestration in volcanic soils offset volcanic CO₂ emissions? *Quaternary Science Reviews*, 29(11-12), 1313-1316.
- Zhiña, D. X., Mosquera, G. M., Esquivel-Hernández, G., et al. (2022). Hydrometeorological Factors Controlling the Stable Isotopic Composition of Precipitation in the Highlands of South Ecuador. *Journal of Hydrometeorology*, 23, 1059-1074.
- Zyla, C. (2018). *Water Funds Field Guide*. The Nature Conservancy.

Este libro es publicado en el Día Nacional de los Páramos que se conmemora el 23 de junio. La obra reconoce la importancia ecológica, histórica y cultural de estos ecosistemas de altura. La tipografía utilizada se llama Larken y combina sus entradas de capítulo con fotografías de Jorge J. Anhalzer, Gustavo Morejón, Esteban Suárez Robalino, Robert Hofstede, Pablo Corral Vega, Patricio Mena-Vásquez, Galo Zapata Ríos, entre otras destacadas personas que han provisto con sus magníficas imágenes.

Páramo es un concepto complejo: un ecosistema, un bioma, un paisaje, un área geográfica, una zona de vida, un espacio de producción e inclusive un estado del clima. También es un territorio en disputa y un elemento fundamental de la cultura y la historia. Los páramos ecuatorianos han experimentado un constante cambio durante las últimas décadas. Su paisaje, su extensión, su vegetación, su fauna y su población se han visto alterados y con ellos la percepción que se tiene de los páramos.

Este libro es una exploración para entender cómo y por qué el páramo ha cambiado, y cuáles son las consecuencias de este cambio. Creemos que parte de la riqueza del libro está precisamente en presentar no solo conocimientos, sino posiciones, todo lo cual enriquece las discusiones y las perspectivas.

“La obra representa un excelente tratado actualizado acerca de uno de los ecosistemas más importantes para la sostenibilidad del Ecuador y los países vecinos, y provee lineamientos tanto académicos como políticos para definir acciones concretas de manejo del territorio”.

Brigitte Baptiste
Rectora de la Universidad EAN, Colombia



Con el apoyo de



@usfqpress