



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

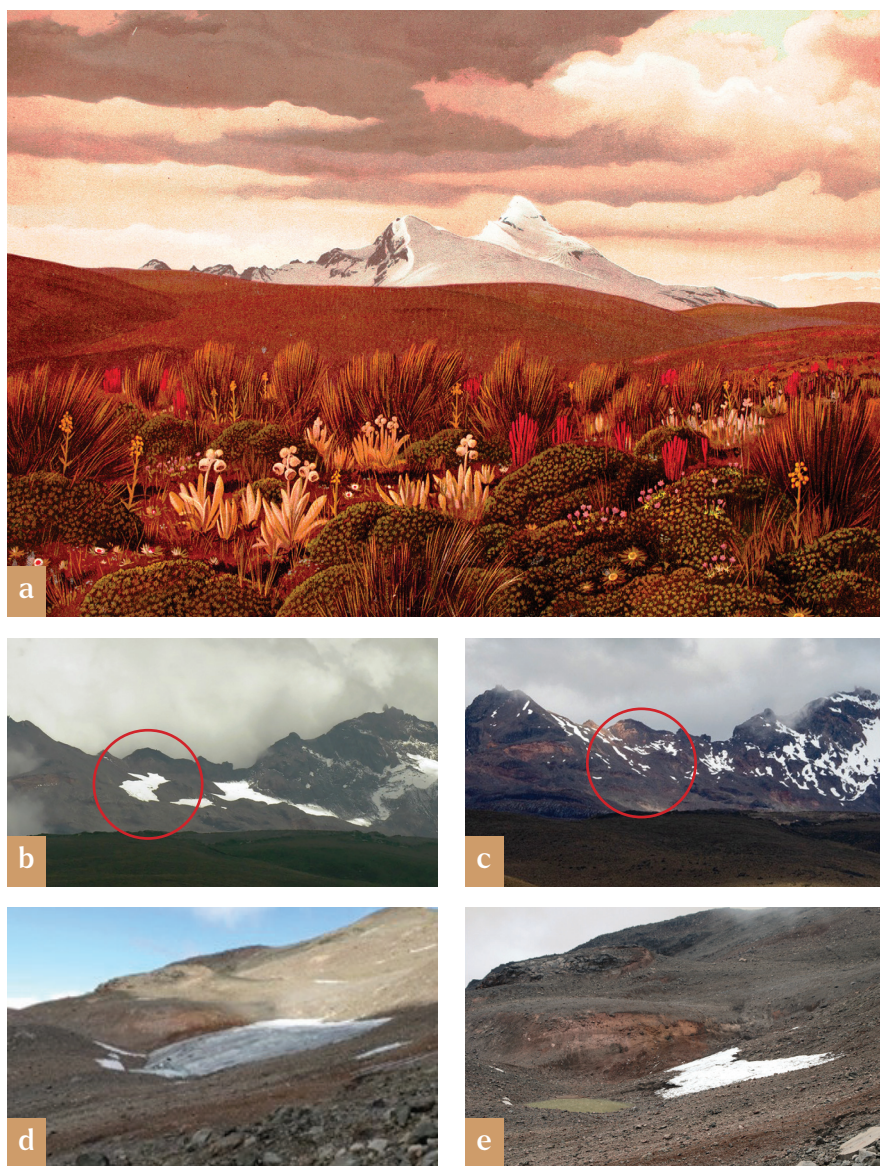


Figura 12.1 Evidencias de la desaparición del último glaciar en el Carihuairazo. a) Tempera de Rudolf Reschreiter (1906) c) Vista frontal del volcán en 2008, con el glaciar (círculo rojo) incluyendo su zona de acumulación. c) La misma vista en 2021, donde ya no se puede ver el glaciar (la nieve es acumulación 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 CO_2 , 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 quemas 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.).