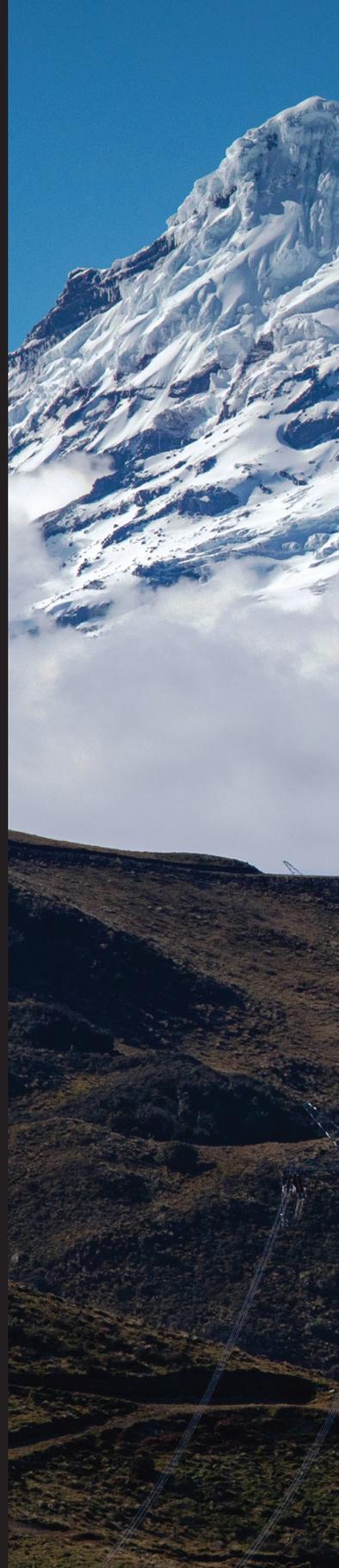


CAPÍTULO 11

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 hydroelectricity, 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 Ozogoche 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 acuacultura para la cría comercial de truchas en la vía Pifo-Papallacta. Fotografía: Patricio Mena-Vásquez

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.