

# EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO DE LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN EL PÁRAMO ANDINO

Editores:  
Mauricio Aguilar-Garavito y  
Wilson Ramírez Hernández





# EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO DE LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN EL PÁRAMO ANDINO

---

**Editores:**

Mauricio Aguilar-Garavito y  
Wilson Ramírez Hernández



# EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO DE LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN EL PÁRAMO ANDINO

---

## INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS BIOLÓGICOS ALEXANDER VON HUMBOLDT

Proyecto Páramos Biodiversidad y Recursos Hídricos en los Andes del Norte - Unión Europea

## DELEGACIÓN DE LA UNIÓN EUROPEA EN COLOMBIA

### Embajador de la Unión Europea

Giller Bertrand

### Jefe de Cooperación Adjunta

Sonia Tato Serrano

### Agregado de Clima, Ambiente y Empleo

Tobias Biermann

### Oficial de Cooperación - Desarrollo Rural y Medio Ambiente

Jhony Ariza Milanés

## INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS BIOLÓGICOS ALEXANDER VON HUMBOLDT

### Director General

Hernando García Martínez

### Subdirector de Investigaciones

Óscar Gualdrón González

### Coordinador Programa Ciencias Básicas de la Biodiversidad

Felipe García Cardona

### Coordinadora Proyecto Páramos: Biodiversidad y Recursos Hídricos en los Andes del Norte

Marcela Galvis Hernández

### Editores

Mauricio Aguilar-Garavito

Wilson Ramírez Hernández

### Coordinación editorial

Mauricio Aguilar-Garavito

Laura Giraldo Martínez

### Revisión de textos y corrección de estilo

Laura Giraldo Martínez

### Diseño y diagramación

Julián Güiza Cubides

## Fotografías

Mauricio Aguilar-Garavito

Laura Giraldo M.

César Marín

Orlando Vargas Ríos

Banco de Imágenes Ambientales Instituto Humboldt

## Pares evaluadores

Francisco Cortés-Pérez, Ph. D. Biólogo. Profesor e investigador, Escuela de Biología, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, Colombia.

Nikolay Aguirre, Ph. D. Ingeniero Forestal. Rector, Universidad Nacional de Loja. Loja, Ecuador.

ISBN obra digital: 978-958-5183-34-6

ISBN obra impresa: 978-958-5183-33-9

Esta publicación se elaboró en el marco del Contrato de subvención acciones exteriores de la Unión Europea DCI-ENV/2014/346-637 suscrito entre la Unión Europea, representada por la Comisión Europea, y el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, en calidad de coordinador.

Documento preparado por la Editorial Instituto Alexander von Humboldt Bogotá, D. C., 2021

Citación sugerida: Aguilar-Garavito M. y Ramírez W. (Eds.) (2021). Evaluación y seguimiento de la restauración ecológica en el páramo andino. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.



Atribución-No comercial-Sin derivar



Unión Europea

## AUTORES

### Mauricio Aguilar-Garavito

Ecólogo de la restauración M. Sc. Investigador, Instituto Humboldt.  
[maguilar@humboldt.org.co](mailto:maguilar@humboldt.org.co)

### Carolina Avella Rodríguez.

Administradora Ambiental con magister en Desarrollo Rural.  
[avellacarolina@gmail.com](mailto:avellacarolina@gmail.com)

### Marian Cabrera

Bióloga PhD. Ecología Funcional Vegetal. Universidad de Ámsterdam.  
[mariancp@gmail.com](mailto:mariancp@gmail.com)

### Verónica De Lima Niebles

Ingeniera Ambiental. Restauración de Ecosistemas Msc. Universidad de Alcalá.  
[verodeniebles@yahoo.com](mailto:verodeniebles@yahoo.com)

### María Alejandra Franco Morales

Abogada, Máster en Derecho Ambiental y de la Sostenibilidad. Universidad de Alicante.  
[alejandrafranco22spdd@gmail.com](mailto:alejandrafranco22spdd@gmail.com)

### Angélica María Hernández Palma

Bióloga, Ph. D. Recursos Naturales Renovables. Investigadora, Instituto Humboldt.  
[anhernandez@humboldt.org.co](mailto:anhernandez@humboldt.org.co)

### Yenifer Herrera Varón

Bióloga. Investigadora, Instituto Humboldt.  
[yherrera@humboldt.org.co](mailto:yherrera@humboldt.org.co)

### Olga Adriana León

Ecóloga M. Sc. Gestión Ambiental. Consultora, Bosques y Semillas SAS.  
[olgaaleon@gmail.com](mailto:olgaaleon@gmail.com)

### María Cecilia Londoño

Bióloga PhD. Ciencias Biológicas. Investigadora, Instituto Humboldt.  
[mlondono@humboldt.org.co](mailto:mlondono@humboldt.org.co)

### Marjorie Pinzón Arias

Licenciada en Biología. Investigadora, Instituto Humboldt.  
[mpinzona@unal.edu.co](mailto:mpinzona@unal.edu.co)

### Wilson Ariel Ramírez Hernández

Biólogo Ph. D. Investigador, Instituto Humboldt.  
[wramirez@humboldt.org.co](mailto:wramirez@humboldt.org.co)

### Lina María Sánchez-Clavijo

Ecóloga Ph. D. Biología de la Conservación. Investigadora, Instituto Humboldt.  
[lsanchez@humboldt.org.co](mailto:lsanchez@humboldt.org.co)

### Sandra Liliana Rojas

Bióloga. Profesora. Departamento de Ecología y Gestión de Ecosistemas. Universidad Técnica de Múnich.  
[Rojasb.sl@gmail.com](mailto:Rojasb.sl@gmail.com)

### Orlando Vargas Ríos

Biólogo M. Sc. Profesor e investigador, Departamento de Biología Universidad Nacional de Colombia.  
[jovargasr@unal.edu.co](mailto:jovargasr@unal.edu.co)

Evaluación y seguimiento de la restauración ecológica en el páramo andino / Mauricio Aguilar Garavito y Wilson Ariel Ramírez Hernández (Editores); 1 edición. Bogotá, D.C. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Unión Europea, 2021.

200 p.: il., col.; 22 cm X 29.7 cm

Incluye referencias bibliográficas, figuras, tablas, mapas y anexos.

ISBN obra digital: 978-958-5183-34-6

ISBN obra impresa: 978-958-5183-33-9

1. Restauración en páramos 2. Alta montaña – Conservación 3. Metrología - Evaluación comparativa 4. Monitoreo participativo. 4. Análisis de datos 5. Andes del Norte - Colombia I. Aguilar Garavito, Mauricio II. Aguilar Garavito, Mauricio (ed) III. Ramírez Hernández, Wilson Ariel (ed) IV. Giraldo Martínez, Laura (ed) V. Aguilar Garavito, Mauricio (fot) VI. Cabrera, Marian (fot) VII. Vargas Ríos, Orlando (fot) VIII. Banco de imágenes Instituto Humboldt IX. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt X. Unión Europea.

CDD: 577.538 Ed. 23

Número de contribución: 612

Registro en el catálogo Humboldt: 15050

CEP – Biblioteca Francisco Javier Matis, Instituto Alexander von Humboldt



Páramo de Bijagual, Boyacá. Fotografía: Felipe Villegas.



## AGRADECIMIENTOS

Los autores y editores de este libro queremos expresar nuestro agradecimiento por su apoyo y valiosos aportes a Luis Daniel Llambí, Francisco Cortés, Nikolay Aguirre, Laura Giraldo, Ana María Rueda, Camilo Andrés Angulo, Paola Isaacs y Nini Cárdenas.

Agradecemos a la Delegación de la Unión Europea en Colombia que, a través del Proyecto Páramos: Biodiversidad y Recursos Hídricos en los Andes del Norte, permitió el desarrollo de procesos de restauración en los páramos, así como la construcción de herramientas como las presentadas en esta publicación.

# PRESENTACIÓN

Cada día la restauración ecológica se convierte en una de las maneras más importantes para gestionar biodiversidad a nivel mundial. La Asamblea de las Naciones Unidas declaró el período 2021-2030 como la Década para la Restauración de los Ecosistemas. Esta declaración pretende incrementar los esfuerzos de restauración, considerando que estos aportan a la lucha contra el cambio climático y la conservación de los beneficios que nos ofrecen los ecosistemas (UNEP, 2019).

En Colombia la restauración ecológica ha sido priorizada en el Plan Nacional de Restauración Ecológica (MinAmbiente, 2013), el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022, entre otras herramientas públicas para gestionar el territorio. En el caso de los páramos, el ecosistema protagonista de este libro, la Ley 1930 de 2018 regula su gestión integral y considera que la restauración ecológica es fundamental para llevarla a cabo. En el Artículo 2 de dicha ley se considera el diseño e implementación de programas de restauración ecológica y en el Artículo 29, el diseño e implementación de sistemas de monitoreo para realizar el seguimiento a la gestión realizada y a las metas alcanzadas.

Teniendo en cuenta lo anterior, el Instituto Humboldt, en el marco del Proyecto Páramos: Biodiversidad y Recursos Hídricos en los Andes del Norte, financiado por la Unión Europea y ejecutado con Autoridades Ambientales y Organizaciones No Gubernamentales en Colombia, Ecuador y Perú, acompañó el desarrollo de procesos de restauración en cinco complejos de páramos en Colombia: Santurbán-Berlín, Rabanal Río Bogotá, Los Nevados, Las Hermosas y Chiles-Cumbal.

Como punto de partida se construyó un documento de línea base sobre los procesos de restauración en páramos, en el cual se evidenció que si bien se han desarrollado proyectos de restauración ecológica, era un común denominador la ausencia de monitoreo a largo plazo. Adicionalmente, los informes de implementación de acciones de restauración carecían de datos georreferenciados, bases de datos sólidas, reportes claros de las acciones de restauración y el seguimiento del nivel de éxito alcanzado. También se identificaron

cuatro posibles aspectos que incidían en la situación antes descrita: 1) las áreas en restauración presentan dificultad de acceso, generando condiciones logísticas particulares y complejas; 2) se requiere de largos periodos de seguimiento para obtener resultados suficientes para los análisis, esto debido a las condiciones biofísicas del páramo que inciden el desarrollo de la vegetación crecimiento y de los procesos ecológicos; 3) existe poca claridad técnica y logística para establecer un programa de monitoreo sencillo que permita medir el éxito de las acciones de restauración implementadas en el páramo, y 4) en el páramo andino convergen una serie de procesos biofísicos y sociales –actualmente cabe destacar los legales y políticos– particulares que hacen que el abordaje de la restauración ecológica requiera de ciertas consideraciones específicas distintas a las de otros ecosistemas.

Es así como se detectó la necesidad de generar un documento con lineamientos específicos de monitoreo para la restauración ecológica en páramo, donde se tengan en cuenta la diversidad de actores que están involucrados en estos proyectos. Esta publicación busca apoyar a los restauradores, tomadores de decisión, inversionistas y a la sociedad en general en la construcción de un programa de evaluación y seguimiento a la restauración ecológica del páramo, acompañándolos en la búsqueda de respuestas como: ¿cuál ha sido el costo y cuál ha sido la efectividad del proceso de restauración?, ¿cómo establecer un programa de monitoreo y cómo establecer plataformas que permitan obtener información relevante sobre el éxito o fracaso del proceso de restauración?, ¿cómo involucrar a la comunidad en un proceso de monitoreo a la restauración? y ¿cómo reportar datos de evaluación y seguimiento para demostrar los beneficios de la restauración a tomadores de decisión, entes de control y al público en general?

**Hernando García Martínez**

**Director General**

**Instituto de Investigación de Recursos Biológicos  
Alexander von Humboldt**





Laguna de alta montaña en Tota, Boyacá. Fotografía: Felipe Villegas.

# PRÓLOGO

Los páramos andinos enfrentan una creciente amenaza como resultado de la compleja interacción del cambio climático y del uso de la tierra. Estos son ecosistemas únicos a nivel mundial con una diversidad de especies y niveles de endemismo récord en la alta montaña, que ofrecen servicios ecosistémicos fundamentales. A su vez, ocupan una superficie relativamente modesta si se los compara con otros biomas tropicales más extensos; por esto, con cada kilómetro cuadrado perdido o degradado se pierde un patrimonio excepcional. En este contexto, el diseño e implementación de estrategias efectivas de restauración ecológica cobran una importancia determinante.

Como el lector podrá apreciar en este libro, el caso de los páramos de Colombia es particularmente fascinante por muchas razones. Colombia, junto con Ecuador, tiene la mayor superficie de ecosistemas alpinos tropicales en el mundo, aunque se estima que más de 13 % de los páramos colombianos han sido transformados directamente por actividades agropecuarias. Sin embargo, a lo largo de los Andes colombianos se vienen desarrollando procesos únicos en términos de la consolidación de legislación para la protección y gestión sostenible de los páramos, la promoción de procesos de monitoreo integral de la alta montaña y la consolidación de enfoques innovadores para la restauración ecológica, basados en un conocimiento detallado de la ecología y dinámica socioambiental de los páramos. De hecho, se puede hablar sin ningún temor a equivocarnos, de la actual existencia de una escuela líder en el continente de ecología de la restauración en Colombia, cuyo impulso durante las últimas dos décadas ha provenido en buena medida del trabajo en los páramos de los autores e investigadores que participan en esta publicación.

En esta ocasión, este conjunto excepcional de investigadores abordan un tema esencial: la necesidad urgente de generar procesos de monitoreo más efec-

tivos de los proyectos y programas de restauración ecológica en la región. Como diagnostican claramente los autores, muchos de estos proyectos y programas carecen de una estrategia explícita de monitoreo y, cuando cuentan con ella, el seguimiento tiende a restringirse a documentar las actividades y medidas implementadas –p. ej. número de plantas sembradas, superficie intervenida–, pero no sus impactos o efectividad en la recuperación o rehabilitación de la estructura, diversidad y servicios ecosistémicos de las áreas restauradas; o en términos de su influencia sobre el bienestar de las poblaciones involucradas, cuya participación en estos procesos –tanto en la restauración en sí, como en su evaluación y seguimiento–, tiende a ser poco orgánica o integral.

Esta es una limitación importante ya que cada proyecto de restauración en que no se monitorean impactos se convierte, ni más ni menos, en una oportunidad desperdiciada para aprender, mejorar, comparar, replicar y escalar experiencias, metodologías y enfoques, sin mencionar el imperativo en la lógica de cualquier proyecto de analizar si los recursos humanos y financieros invertidos están alcanzando las metas propuestas al inicio. En este sentido, los proyectos de restauración ecológica deberían ser entendidos como experimentos y laboratorios de aprendizaje al aire libre y como espacios privilegiados para el diálogo de saberes sobre la resiliencia y manejo sostenible de los socioecosistemas. Lo que este libro nos ofrece es una hoja de ruta conceptual y metodológica detallada para recorrer este camino –lleno de vueltas y revueltas, desafíos y recompensas, como todo buen sendero en nuestras montañas andinas–.

Los primeros dos capítulos plantean un recorrido por la ecología, diversidad e importancia de los páramos en Colombia y las presiones que enfrentan producto del uso de la tierra y el cambio climático. A su vez, nos ofrecen una mirada del desarrollo, prácticas

comúnmente utilizadas, alcances y necesidades de investigación de la restauración ecológica en el país, haciendo un llamado a la implementación de programas de monitoreo de largo plazo y una mayor participación de las comunidades locales.

Los siguientes cinco capítulos analizan: el porqué, para qué y cómo del monitoreo de la restauración ecológica, entendida como un componente integral de un enfoque de manejo adaptativo; los criterios para la selección de metas, objetivos e indicadores de seguimiento, incluyendo el uso de ejemplos en el contexto de los páramos; el uso de estrategias participativas y el diálogo de saberes en todas las etapas del ciclo de monitoreo, enfatizando la importancia de incorporar las motivaciones, visiones y conocimiento del territorio y su historia de las poblaciones locales; los lineamientos metodológicos detallados para el diseño de protocolos de monitoreo, incluyendo aspectos relacionados con las variables, indicadores, métodos de muestreo y análisis de datos de vegetación, suelos, fauna, agua, y algunos procesos claves como las interacciones entre especies y sus relaciones tróficas; y los lineamientos para el uso del enfoque de rasgos funcionales en los procesos de restauración, incluyendo las bases conceptuales, criterios para la selección de los rasgos, las estrategias para el diseño de muestreo y las estrategias de análisis de la información.

Finalmente, los últimos capítulos abordan los enfoques para el monitoreo de los procesos de reconversión productiva, el monitoreo de proyectos de restauración en zonas afectadas por minería superficial y subterránea, y las herramientas para la digitalización, sistematización, manejo y análisis de datos de procesos de monitoreo, incluyendo sugerencias sobre herramientas estadísticas para el análisis (usando el lenguaje R). En el Capítulo 11 se presenta una interesante revisión histórica de la normativa vigente en relación con la gestión, conservación y restauración de los páramos,

incluyendo hitos fundamentales como el Plan Nacional de Restauración y el proceso de reconocimiento legal y delimitación de los páramos, la regulación de las actividades mineras y la necesidad de monitoreo socioecológico en el marco de la formulación de los Planes de Manejo Ambiental (PMA). Se propone la necesidad de una mayor integración entre los ámbitos científicos, técnicos, sociales y normativos y se explicita que el hacer monitoreo de los procesos de restauración en los páramos no es solo una necesidad, sino una obligación legal.

Resulta particularmente interesante el reconocimiento que hacen los autores de este libro de las oportunidades inéditas y retos generados por el marco jurídico y político vigente, así como el estado actual del conocimiento, para entender el monitoreo ecológico desde una mirada más integral. Un marco que implica el seguimiento del estado y tendencias de los paisajes de la alta montaña no solo desde los ecosistemas en buen estado de conservación, sino también (y muy especialmente), desde las áreas transformadas, restauradas y manejadas, incluyendo la gran diversidad de agroecosistemas y sistemas productivos que hacen parte de la compleja realidad socioecológica de los páramos de Colombia. De este modo, los autores colocan el monitoreo de los procesos de restauración ecológica y de reconversión productiva en el centro de los esfuerzos para el logro de una gestión más sostenible de la alta montaña tropical, un lugar que tenía que haber ocupado hacía ya mucho tiempo.

**Luis Daniel Llambí C.**  
Mérida, 2021.



# CONTENIDO

---

CAPÍTULO

01

El páramo bajo influencia humana: disturbios y escenarios para la restauración ecológica

Orlando Vargas Ríos y Olga Adriana León

*Página 14*

CAPÍTULO

02

La restauración ecológica en los páramos

Orlando Vargas Ríos y Olga Adriana León

*Página 30*

CAPÍTULO

03

El monitoreo en la restauración ecológica: ¿por qué, para qué y cómo?

Olga Adriana León y Orlando Vargas Ríos

*Página 42*

CAPÍTULO

04

Lineamientos para la selección de objetivos, metas e indicadores para el monitoreo en procesos de restauración del páramo andino.

María Cecilia Londoño y Lina María Sánchez-Clavijo

*Página 55*

CAPÍTULO

05

Generalidades del monitoreo participativo y su aplicación en la restauración ecológica

Yenifer Herrera Varón y Marjorie Pinzón Arias

*Página 64*

CAPÍTULO

06

Protocolo para el monitoreo de la restauración ecológica en los páramos

Orlando Vargas, Olga Adriana León y Sandra Liliana Rojas

*Página 74*



CAPÍTULO  
**07**

Lineamientos para el monitoreo de rasgos funcionales de la vegetación de páramo

Marian Cabrera

*Página 96*

CAPÍTULO  
**08**

Lineamientos para el monitoreo de procesos de reconversión productiva en páramos, en el marco de la restauración ecológica

Carolina Avella Rodríguez

*Página 110*

CAPÍTULO  
**09**

Plataformas e indicadores de monitoreo en proyectos de restauración ecológica de áreas afectadas por minería y actividades extractivas

Verónica De Lima Niebles

*Página 126*

CAPÍTULO  
**10**

Manejo y procesamiento de datos de monitoreo a la restauración ecológica en páramos

Angélica María Hernández Palma

*Página 145*

CAPÍTULO  
**11**

Normativa de la restauración ecológica y del monitoreo a la restauración del páramo colombiano

María Alejandra Franco Morales

*Página 154*

---

CONCLUSIONES

*Página 160*

REFERENCIAS CITADAS

*Página 162*

GLOSARIO

*Página 180*

ANEXOS

*Página 183*

# INTRODUCCIÓN

La restauración ecológica busca restablecer la biodiversidad de acuerdo con las posibilidades biofísicas y las necesidades socioecológicas, pero ¿cómo saber si un proyecto de restauración está siendo exitoso o no?, ¿es suficiente solo con saber el número de hectáreas intervenidas y el número de individuos plantados o su supervivencia? O, en caso de que estemos preparando una propuesta de restauración, ¿cómo planear e implementar un proceso de restauración ecológica en una porción amplia del territorio y que tenga una relación beneficiosa en términos de costo y efectividad? Incluso, si quisiéramos ir más allá ¿cómo valorar, costear y evaluar un proyecto de restauración? y ¿cómo se puede informar de mejor manera a los tomadores de decisión, inversionistas, a los entes de control y al público en general que los beneficios bióticos y sociales de la restauración

ecológica van más allá que la aplicación simple de una reforestación, de la reconversión productiva o de obras para la conservación de suelos.

La respuesta a todos estos interrogantes las da un programa de monitoreo, el cual es un paso básico dentro de un proceso de restauración. El monitoreo<sup>1</sup> en la restauración permite evaluar y seguir con claridad los cambios o tendencias desde la condición inicial, hasta el progreso hacia los objetivos y metas de restauración. En ese sentido, este libro busca ser una guía para aquellos que están diseñando, implementando y evaluando proyectos de restauración ecológica en el páramo, incluyendo el monitoreo a diversos componentes del área a restaurar –p. ej., flora, fauna, suelos, usos–. Por esto, en sus once capítulos el libro abarca aspectos teóricos, conceptuales, metodológicos y de análisis del monitoreo en restauración, considerando los aspectos biofísicos y socioeconómicos del páramo colombiano, aportando situaciones particulares de monitoreo –como el monitoreo participativo, la reconversión o sustitución productiva, los usos agropecuarios o extractivos–, así como el contexto normativo del monitoreo y de la restauración ecológica en Colombia.

Esperamos que este libro complemente la publicación *Monitoreo a procesos de restauración ecológica*

---

1. La Real Academia de la Lengua Española en la actualización del 2020 incluyó la palabra monitoreo y monitorear para definir la acción de: 1) “Observar mediante aparatos especiales el curso de uno o varios parámetros fisiológicos o de otra naturaleza para detectar posibles anomalías” y 2) “Supervisar o controlar algo o a alguien”.

*aplicado a ecosistemas terrestres* (Aguilar-Garavito y Ramírez, 2015), para permitir articular otras publicaciones, guías técnicas o protocolos de monitoreo a la restauración más específicos; ya sea enfocadas en el tipo de bioma, en las acciones de restauración, en la escala o de acuerdo al tipo de disturbio. De esta forma, el libro se puede convertir en una herramienta de referencia para la comunidad técnico-científica, autoridades ambientales o de control y, sobre todo, para los practicantes de la restauración ecológica del páramo andino, no solo en Colombia sino en los otros países con páramo.

En la estructura del libro el lector encontrará primero una síntesis de los aspectos biofísicos más relevantes del páramo (Capítulo 1), así como los aspectos fundamentales para desarrollar procesos de restauración ecológica en los páramos (Capítulo 2). Luego, se presenta el contexto del monitoreo en la restauración ecológica (Capítulo 3) y los aspectos básicos para su implementación, donde se identifican lineamientos para definir y seleccionar las metas, objetivos e indicadores para el monitoreo (Capítulo 4). También se explica cómo aproximarse al monitoreo participativo (Capítulo 5). Esta primera parte del libro cuenta con un protocolo de monitoreo (Capítulo

6), el cual organiza y vincula todos los aspectos del monitoreo planteados en los otros capítulos del libro. Posterior a esto, se presentan tres secciones con plataformas y lineamientos básicos para monitorear algunos aspectos de la restauración que no han sido incluidos en otras publicaciones o que son particulares del páramo; como es el caso de los rasgos funcionales de la vegetación (Capítulo 7), la reconversión productiva (Capítulo 8) y el monitoreo a la restauración en áreas de industria extractiva (Capítulo 9). Finalmente, el libro cierra con dos capítulos que le dan valor diferencial a esta publicación, uno de ellos con una propuesta para el manejo y análisis de datos (Capítulo 10), aportando como ejemplo una base de datos hipotética que sirve para entender la estructura de los datos y el código de análisis en el software R, el cual permite analizar estadísticamente los datos, generar gráficas y otros tipos de representación de datos para los resultados del monitoreo. El capítulo final (Capítulo 11) brinda el soporte jurídico para justificar, exigir o ejecutar procesos de restauración ecológica que incluyan el monitoreo. Los autores y editores del libro tenemos la expectativa que esta obra contribuya a desarrollar mejores procesos de restauración ecológica en el páramo andino.

# CAPÍTULO 01

---

- + ¿Qué sabemos de los páramos en Colombia?
- + Principales características de los páramos
- + Síntesis conceptual
- + Disturbios y escenarios de restauración
- + Escenarios de restauración ecológica en los páramos

# El páramo bajo influencia humana: disturbios y escenarios para la restauración ecológica





**E**n este capítulo introductorio se sistematizan las principales características biofísicas de los páramos, haciendo énfasis en su estado actual bajo influencia humana –régimen antrópico de disturbios– y en los escenarios para la restauración ecológica. Se presenta un esquema conceptual que relaciona la geomorfología, el clima y el modelado glaciar sobre la relación agua-suelo-biodiversidad en el funcionamiento del ecosistema y sus servicios ecosistémicos. Se analiza cómo el régimen de disturbios afecta todos los gradientes –altitudinales, topográficos, hídricos y de nutrientes– en el páramo y sus consecuencias en escenarios de cambio climático. Finalmente, se discuten los principales disturbios naturales y antrópicos, sus interrelaciones y los escenarios que se generan para la restauración ecológica.

### ¿Qué sabemos de los páramos en Colombia?

Los páramos se reconocen como ecosistemas estratégicos por su alta biodiversidad y por los beneficios que prestan a la humanidad, siendo los servicios ecosistémicos más reconocidos la regulación climática, el almacenamiento de carbono y la provisión hídrica (Hofstede, 2014). Para los visitantes, su paisaje representa gran belleza y para las comunidades locales, campesinas o indígenas, significa un escenario de gran valor espiritual y es fuente de su sustento alimenticio.

Los páramos en Colombia ocupan 2 906 137 hectáreas (Sarmiento et al. 2013), distribuidas en 36 complejos. Del total de área de páramo, el 50,46 % aproximadamente se encuentra bajo alguna figura de conservación. Dentro de esta proporción, el 33,25 % son áreas protegidas por Parques Nacionales Naturales de Colombia; el 13,46 % son áreas de conservación estricta a nivel regional y el 3,75 % son áreas de conservación y uso sostenible (Galvis, 2021). En busca de la protección de este ecosistema, la Ley 1930 de 2018 prohíbe en todas las áreas paramunas del país las actividades de exploración y explotación minera o de hidrocarburos, así como la expansión urbana o suburbana. Con respecto a las actividades agropecuarias, prohíbe el uso de maquinaria pesada así como de agroquímicos.

A pesar de lo anterior, los páramos han sido y siguen siendo transformados. Las actividades agropecuarias son

las principales generadoras de estos cambios. Sarmiento et al. (2013) reportan que entre 1985 y 2005 se presentó una disminución al 7 % en las coberturas de páramo, y que entre el periodo comprendido entre el 2000 y 2005 fueron transformadas cerca de 24 000 hectáreas de páramo cada año. Entre los complejos paramunos más transformados se encuentran: 1) los páramos del altiplano Cundiboyacense (70 %); 2) los páramos de Guerrero (50 %); 3) los páramos de Tota (35 %); 4) los páramos Iguaque-Merchán (30 %), y 5) los páramos del Parque Nacional Natural Los Nevados (25 %).

Además, desde hace varias décadas los páramos han sido objeto de estudio, especialmente respecto a su vegetación (Monasterio, 1980; Cleef, 1981; Luteyn, 1999; Rangel-CH, 2000; Vargas y Pedraza, 2003; Llambí et al., 2014), fauna (Muñoz et al., 2000, Acosta-Galvis, 2000, Franco y Bravo, 2005, Medina-Rangel y López-Perilla, 2014), suelos (Malagón y Pulido, 2000), hidrología (Buytaert et al., 2006; Harden, 2006), impacto humano (Hofstede, 1995; Vargas et al., 2002; Vargas, 2013) y cambio climático (Anderson et al., 2011; Báez et al., 2011).

Entre los años 2003 y 2012 el Instituto Humboldt participó en el Proyecto Páramo Andino (PPA), una iniciativa regional para la conservación y el uso sostenible de los páramos de Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela (Crespo, 2012). Del PPA se publicaron cuatro libros divulgativos que cubren aspectos sobre: restauración ecológica (Vargas y Velasco-Linares, 2011), manejo de páramos (Tapia et al., 2011), ecología, hidrología y suelos (Llambí et al., 2012), investigación y acción participativa (Sirvent y Rigal, 2012). Posteriormente, el Proyecto Páramos y Sistemas de Vida, iniciativa desarrollada entre 2011 y 2013 financiada por la Unión Europea, buscó ampliar el conocimiento sobre la relación entre los sistemas de vida de la gente y el páramo, analizar los impactos sobre este ecosistema, y dar recomendaciones de manejo y buen uso de los recursos del páramo (Rojas et al., 2015).

En el año 2013 y hasta el 2016 el Instituto Humboldt elaboró los “Insumos para la delimitación de 21 complejos de páramos” con recursos del Fondo de Adaptación y con la participación de universidades y grupos de investigación en todo el país. En este proceso se generó información primaria y se recopiló información secundaria para brindar elementos sociales,

económicos y biofísicos que permitieran la toma de decisión para delimitar los páramos con fines legales (Sarmiento, 2016). Cabrera y Ramírez (2014) elaboraron la publicación *Restauración ecológica de los páramos de Colombia. Transformación y herramientas para su conservación* y Aguilar-Garavito y Ramírez (Eds.) (2015) publicaron el libro *Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres*, estos dos libros son un aporte conceptual a la restauración ecológica y su monitoreo en los páramos.

Actualmente, se encuentra en ejecución el proyecto Páramos: Biodiversidad y Recursos Hídricos en los Andes del Norte, iniciativa regional financiada por la Unión Europea y una red de organizaciones de Colombia (Instituto Alexander von Humboldt), Ecuador (UICN/Ecopar) y Perú (Instituto de Montaña), cuyo objetivo principal es “Fortalecer la capacidad de gestión articulada de las comunidades e instituciones involucradas en el manejo de los páramos para conservar la biodiversidad y la regulación de los recursos hídricos”, mediante el desarrollo de acciones en estrategias de conservación, restauración, reconversión productiva e incentivos a la conservación.

### Principales características de los páramos

El concepto páramo tiene múltiples interpretaciones al concebirse como un bioma, una región climática, una eco-región, una zona de vida, un ecosistema, un paisaje, un área geográfica, un territorio y hasta un sistema de producción (Sturm y Rangel, 1985; Hofstede, 2003; Hofstede et al., 2014). Todos estos términos reflejan cuatro problemas centrales: la definición, la delimitación, la transformación y los usos históricos. Los páramos han sido transformados en socioecosistemas, primero, por los pueblos indígenas que fueron desplazados a las altas montañas y, posteriormente, por una colonización más reciente dedicada a la ganadería extensiva y al cultivo intensivo de la papa.

Varios autores están de acuerdo en definir de una forma sencilla que el páramo es un ecosistema natural entre el límite superior del bosque y la nieve perpetua en los trópicos húmedos (Castaño, 2002; Hofstede, 2003; Cleef, 2013).

Los páramos se encuentran en la zona tropical ecuatorial húmeda de Perú, Ecuador, Colombia, Vene-

zuela y en las montañas entre Panamá y Costa Rica. El concepto páramo se ha extendido a las montañas de África y Nueva Guinea. En Colombia, los páramos se distribuyen en las tres cordilleras que se extienden de sur a norte y en la Sierra Nevada de Santa Marta. Estas variaciones latitudinales, la fuerte influencia de la Zona de Convergencia Intertropical y su ubicación altitudinal generan condiciones biofísicas particulares y diferencias en cada una de las vertientes de las montañas donde se ubica (León et al., 2015).

La heterogeneidad ambiental del páramo permite la presencia de una alta diversidad de especies, que según el Catálogo de Plantas de Colombia (Bernal et al., 2019) pueden superar las 4000 especies –por encima de los 3000 m– y una gran cantidad de endemismos (según van der Hammen y Cleef, 1986, aproximadamente el 10 % de los endemismos de Colombia). Hofstede et al. (2014) describen que, con base en la composición de géneros y especies de flora, Jorge Hernández-Camacho elaboró la clasificación biogeográfica de los páramos (Distritos y provincias), y posteriormente Thomas van Der Hammen incluyó criterios como presencia de especies endémicas, coincidencia de los límites de las distribuciones de varias especies y relaciones de cambios históricos para su clasificación en complejos de páramos. Actualmente se reconocen 36 complejos de páramos en Colombia (Sarmiento et al., 2013).

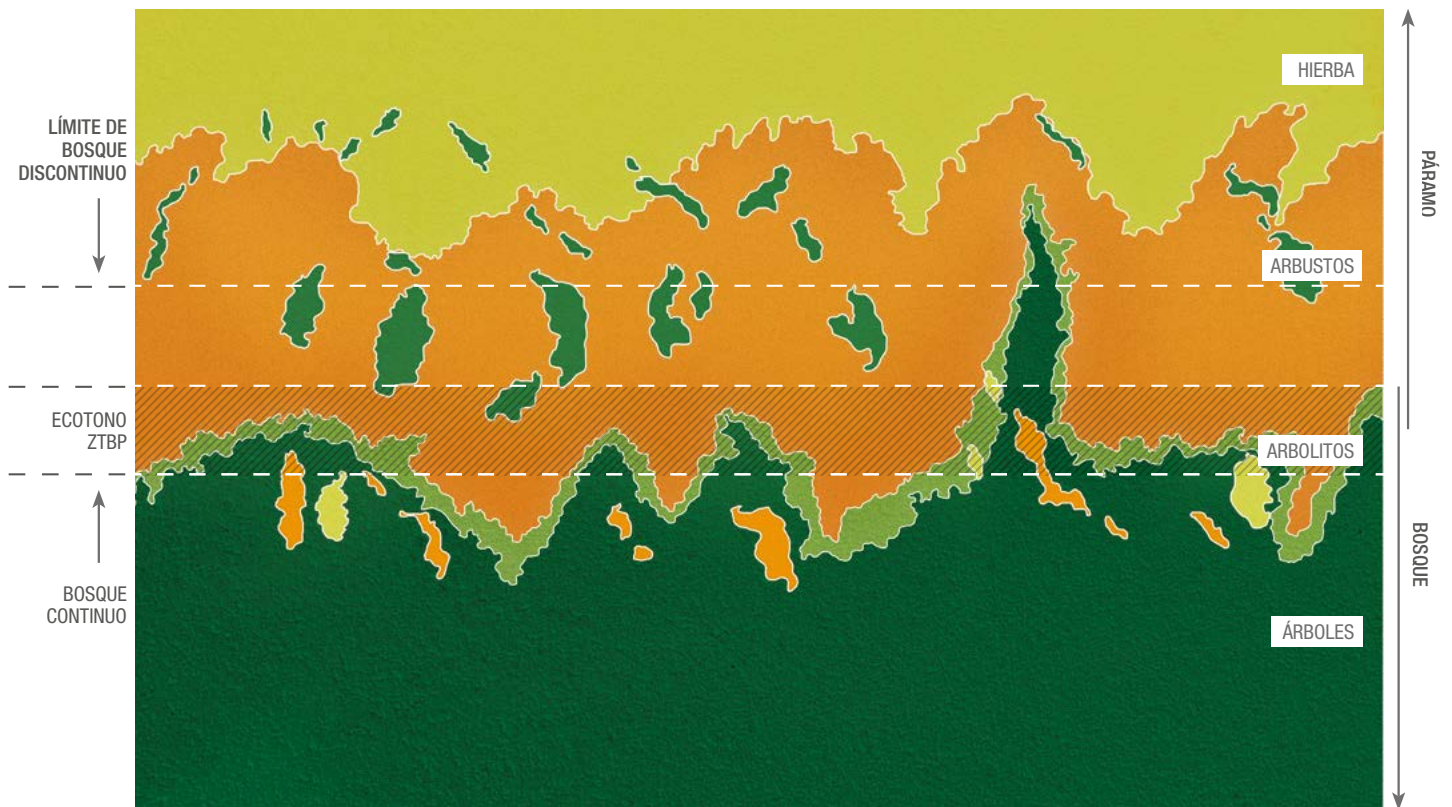
Los páramos no son continuos, son islas biogeográficas (Figura 1), las cuales, durante las glaciaciones, se unían y separaban permitiendo cierto intercambio directo de especies con otras islas, así resultaron diferentes grados de aislamiento de las áreas de páramo (van Der Hammen, 1992; Hofstede et al., 2014). Su evolución en condición de isla hace que presenten: primero, muchos endemismos de plantas y animales (van Der Hammen y Cleef, 1986; Rangel-Ch, 2000; Hofstede et al., 2003) y segundo, una alta fragilidad, ya que no evolucionaron bajo un régimen de disturbios naturales por fuego y pastoreo.

Los páramos se distribuyen en gradientes altitudinales que varían localmente de acuerdo con las condiciones climáticas y topográficas. Como consecuencia de lo anterior, ocurren cambios importantes en la estructura y composición de la vegetación (León et al., 2015).

El bosque se distribuye en la parte inferior de manera irregular alcanzando mayores elevaciones solo en algunas zonas, gracias a condiciones topográficas.



**Figura 1.** Distribución de los páramos y su carácter insular. El páramo no tiene continuidad, son “islas” continentales. Fuente: Elaboración propia basada en Hofstede (2014).



**Figura 2.** Ejemplo de la distribución de las coberturas vegetales en un gradiente altitudinal. Verde oscuro: bosques; verde claro: zona de transición bosque-páramo (ZTBP); naranja: arbustales; crema: pajonal-frailejonal. Fuente: León et al. (2015).

Posteriormente, se observa una zona de transición entre la vegetación arbórea del bosque y la vegetación herbácea del páramo, conformada principalmente por arbolitos de menor porte, entremezclados con arbustos y matorrales, denominado páramo bajo o subpáramo. Finalmente, en la parte superior se establecen especies herbáceas, pajonales y frailejonales, que en algunos casos pueden limitar con la zona nival (Figura 2).

Existen muchos fenómenos tanto naturales como antrópicos que pueden influir en la interfase bosque-páramo; por ejemplo, se encuentran áreas con uso agropecuario actuales con manejo de fuego y pastoreo de ganado, áreas abandonadas por agricultura, sustratos rocosos, deslizamientos, entre otros. En general, las interfaces actualmente son mosaicos de parches producto de disturbios naturales o antrópicos.

También existen páramos azonales, los cuales se ubican en altitudes más bajas a las frecuentemente registradas. Un ejemplo es el páramo azonal de La

Cocha, departamento de Nariño, ubicado a 2700 m (Instituto Humboldt, 2017). En este caso es importante conocer muy bien la región, definir el límite del bosque original y entender las condiciones para la presencia de páramos azonales.

Una de las características principales de los páramos es la variedad de comunidades vegetales (Figura 3) dominadas por diferentes formas de vida o biotipos, como rosetas caulescentes y acaulescentes, bambusoides y macollas, cojines y arbustos (Hedberg, 1964, Hedberg y Hedberg, 1979, Ramsay y Oxley, 1997, Vargas y Pedraza, 2003). Entre las más importantes están:

- + Vegetación boscosa (bosques enanos de *Polylepis* spp. y *Escallonia* spp., entre otros)

**Figura 3.** Principales tipos de vegetación de los páramos. **a.** Bosques enanos de *Polylepis* (PNN Sumapaz); **b.** frailejonal-pajonal (PNN Nevados); **c.** turberas de cojines (PNN Nevados); **d.** frailejonal-chuscal (PNN Chingaza); **e.** turberas de musgos (PNN Sumapaz); **f.** rosetales de *Puya* (Humedal Monquetiva); **g.** chuscales (PNN Chingaza); **h.** humedales (PNN Sumapaz). Fotografías: Orlando Vargas Ríos.





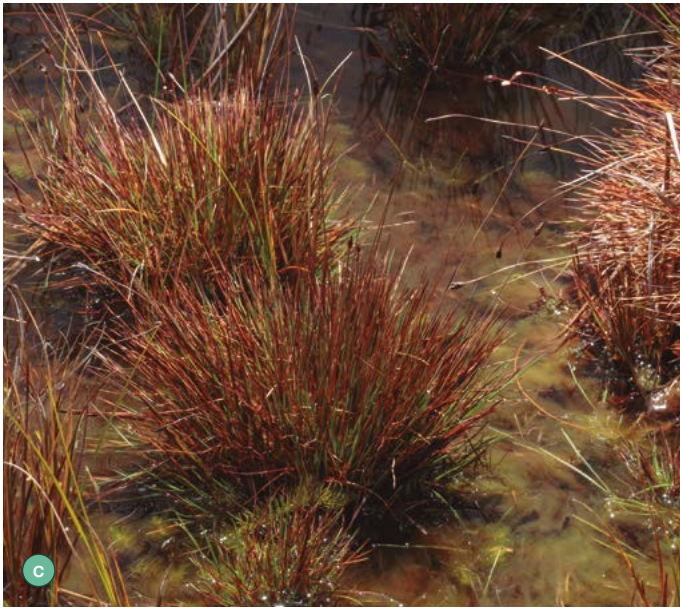
**Figura 4.** Principales formas de crecimiento de las plantas de los páramos. **a.** rosetas caulescentes; **b.** rosetas acaulescentes; **c.** macollas; **d.** bambusoides; **e.** cojines; **f.** radicantes o estoloníferas; **g.** trepadoras; **h.** arbustos. Fotografías: John Bernal y César Marín.

- + Arbustales o matorrales
- + Frailejonal-pajonal
- + Pajonal
- + Pajonal-arbustal
- + Chuscales
- + Chuscal-frailejonal
- + Rosetales (principalmente de *Puya* spp.)
- + Vegetación de turberas y humedales

Las formas de vida o biotipos de las plantas son el resultado de la adaptación evolutiva a las condiciones ambientales extremas de la alta montaña, relacionadas principalmente con la disminución de la temperatura con

la altitud y la alta radiación. La ocurrencia de estas condiciones climáticas, sumado a sus características edáficas propias, hace que el páramo sea uno de los ecosistemas más ricos en formas de vida, de las cuales las más importantes son: rosetas caulescentes, rosetas acaulescentes, macollas, bambusoides, cojines, radicantes o estoloníferas, trepadoras, arbustos y arbolitos (Figura 4).

El modelado glaciar heredado es la causa de la alta heterogeneidad topográfica. Desde el Plioceno tardío han ocurrido más de cuarenta épocas glaciales, debido a las cuales los páramos han descendido incluso hasta los 2000 m, y durante las interglaciaciones han ascendido por encima de los 3000 m (van der Hammen, 1992; van der Hammen y Cleef, 1986). Durante los descensos los páramos se conectaron y durante los ascensos se aislaron en las cumbres. Estos movimientos además de ser cruciales en procesos de diversificación de la flora también generaron el relieve que hoy se observa dominado por cubetas de socavamiento, valles y circos glaciares, y morrenas (Flórez, 2003). La influencia de las





glaciaciones sobre la geomorfología incluye valles amplios en donde se han formado lagunas y reservorios de agua que le brindan la importancia hídrica que caracteriza al ecosistema (Buytaert et al., 2006) (Figura 5).

Los páramos se caracterizan por tener alta radiación solar en presencia de una baja energía térmica. Esta circunstancia hace que las plantas tengan una estrategia fisiológica especial para mantener la regulación térmica en las hojas (Meinzer et al., 1994). Un ejemplo muy estudiado son los rasgos y adaptaciones que presentan las plantas arrosetadas –p. ej. *Espeletia* spp., *Puya* spp., *Paepalanthus* spp.– para mejorar el balance térmico en sus hojas (Monasterio y Sarmiento, 1991). Al aumentar la altura disminuyen la temperatura, la presión atmosférica, la densidad del aire y, por consiguiente, hay menores presiones parciales de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  y menor presión de vapor de agua; en consecuencia, disminuye drásticamente la capacidad del aire para mantener la humedad (Azócar y Rada, 2006). Las bajas temperaturas del suelo, la ocurrencia de vientos fuertes con un efecto desecante en la vegetación, una baja presión at-

mosférica y, en resultado, alta radiación ultravioleta, así como bajas concentraciones de oxígeno y  $\text{CO}_2$  constituyen limitantes ecológicas para las plantas y animales.

### Síntesis conceptual

Existen características de los páramos que son relevantes durante un proceso de restauración ecológica; en la Figura 6 se presenta un esquema con la síntesis conceptual de los componentes, funciones y servicios ecosistémicos y disturbios en el páramo. Lo primero es su historia geológica con los eventos más importantes: el levantamiento de las cordilleras, el modelado glaciar heredado y el vulcanismo. Estos tres eventos conformaron el relieve y son la base de la conformación topográfica y microtopográfica. Estas condiciones influyen sobre el suelo, agua, biota y sus interacciones, lo que genera la base del funcionamiento del páramo.

La interacción entre la flora, fauna, agua y suelo promueve el ciclado y almacenamiento de nutrientes, la regulación hídrica, la producción primaria y secun-





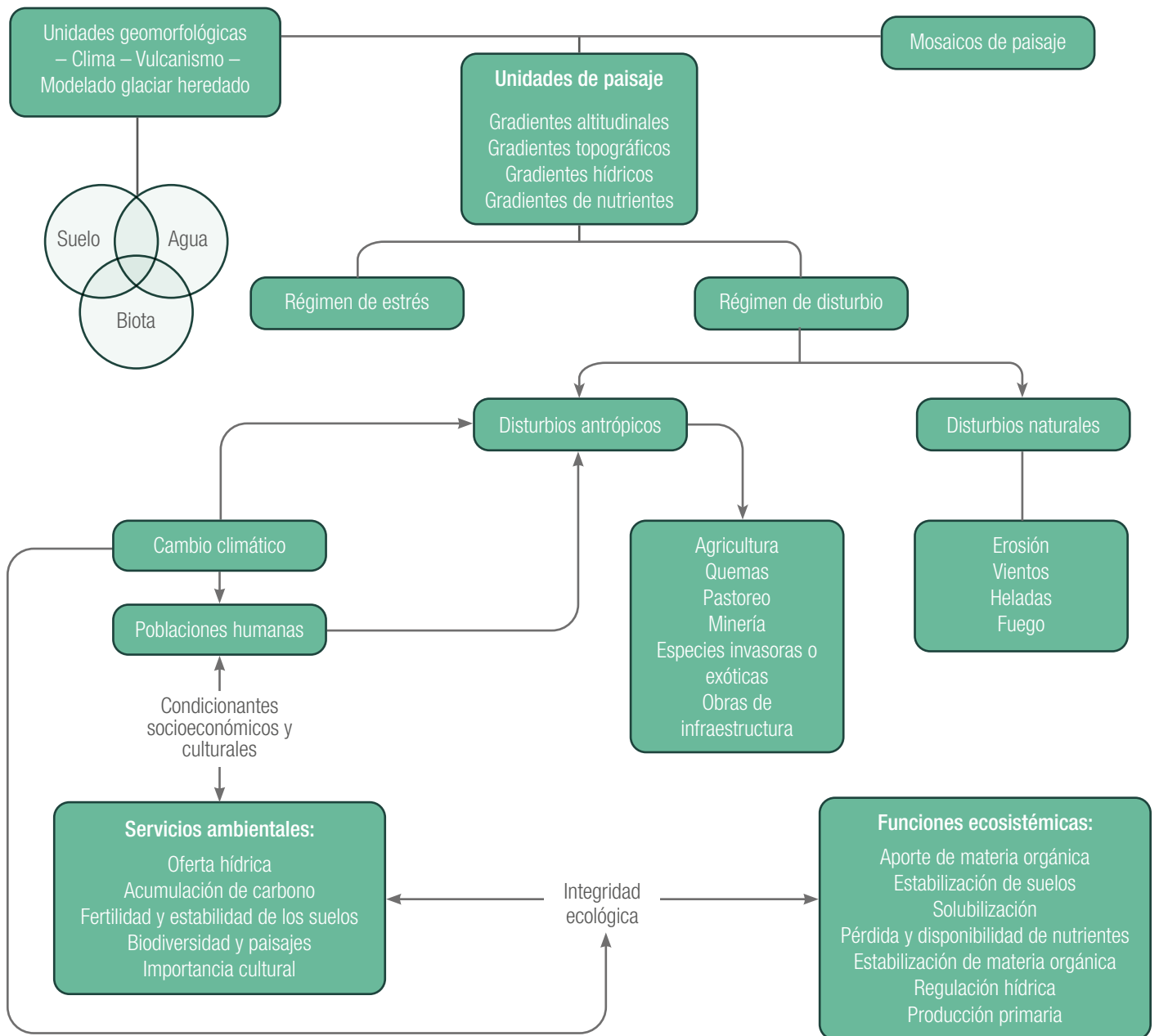
daria, entre muchas otras. Estas funciones generan los principales beneficios ecosistémicos del páramo para el hombre: oferta hídrica, acumulación de carbono, fertilidad y estabilidad del suelo, biodiversidad, belleza escénica, usos espirituales, culturales, entre otros. Si el páramo conserva su biodiversidad mantiene una composición, estructura y función adecuada, esto se suele llamar *integralidad ecológica*. Las acciones humanas afectan la integralidad ecológica y la resiliencia del páramo, es decir, alteran la salud ecológica y la capacidad de recuperarse por sí solo.

Adicionalmente, el cambio climático implica un aumento en la temperatura y la alteración en el patrón de las precipitaciones que, para los ecosistemas andinos de alta montaña, se ha estimado en un incremento en la temperatura ambiente y el número de días, entre +0.4 y +0.9 °C por década, con temperaturas iguales o menores al punto de congelación (Pabón-Caicedo, 2012). Esto causa alteraciones importantes en la distribución de las especies, la composición y funcionamiento de los ecosistemas andinos (Cuesta et al., 2012).

**Figura 5.** Lagunas de origen glaciar. **a.** Laguna de Siscunsí (Páramo de Siscunsí, Boyacá). **b.** Lagunas de Siecha (PNN Chingaza). Fotografías: Felipe Villegas y John Bernal.

El cambio climático es considerado como un disturbio antrópico, el cual incide directamente en el incremento de la magnitud e intensidad de otros disturbios –naturales y antrópicos–, y genera la aparición de nuevos disturbios que antes no se conocían en un ecosistema –p. ej., la llegada de especies invasoras, incendios e inundaciones–. Recientemente, se ha reportado la mortalidad masiva de frailejones por predación del punto vegetativo por la larva de la polilla *Pterophoridae Oidaematophorus espeletiae* y una interacción compleja entre insectos y hongos (Varela, 2014; Varela et al., 2017).

Actualmente, hay una interrelación entre el régimen de estrés, el régimen natural o antrópico de disturbios y el cambio climático. El cambio climático se puede considerar como un disturbio de amplia escala que se interrelaciona con otros disturbios y cambia el régimen



**Figura 6.** Esquema conceptual de componentes, funciones y servicios ecosistémicos y disturbios en el páramo. Adaptado de Vargas et al. (2004).

de estrés. Los disturbios por fuego están aumentando en los páramos y, como fuego y pastoreo de ganado están relacionados, las áreas transformadas son cada vez más grandes. Los regímenes de estrés están variando porque las estaciones secas o lluviosas aumentan y se alargan, generando incendios recurrentes o inundaciones que permanecen más tiempo.

Como el páramo es una gran región con diferentes gradientes –altitudinales, topográficos, hídricos y de nutrientes–, estos son afectados por los disturbios

cambiando los mosaicos de paisaje de tal forma que lo que se encuentra actualmente son parches con diferentes tipos de vegetación. Por ejemplo, la transición bosque-páramo ha cambiado hacia una dinámica en parches en distinto estado sucesional mezclados con matorrales de subpáramo, algunos tipos de comunidades de páramo y relictos de bosques en distinto estado de conservación. En los páramos de pajonal y frailejón-pajonal se encuentran actualmente parches en diferentes estados de regeneración: parches quemados, quemados y pastoreados, parches producto de agricultura itinerante, parches con especies invasoras –de arbustos invasores como el



retamo espinoso– y gramíneas introducidas, parches producto de minería y erosión.

### Disturbios y escenarios de restauración

Aunque las actividades humanas han alterado la dinámica natural en gran parte de las áreas de páramo andino, es importante aclarar que esta zona de vida tiene dinámicas propias que obedecen a una historia natural de más de dos millones de años (van der Hammen y Cleef, 1986).

En una megascale, dentro de los disturbios naturales se han presentado eventos catastróficos que alteran el sustrato y trastornan los mecanismos de persistencia

**Figura 7.** Principales disturbios antrópicos presentes en páramo (categorías internas) y sus impactos más importantes (textos externos). Fuente: Elaboración propia.

y recuperación de la biota. Entre estos se encuentran grandes fenómenos geológicos de deriva continental, tectónica de placas –levantamiento de las cordilleras, conexión con el Istmo de Panamá y actividad volcánica–, así como los ciclos glaciales e interglaciares y el consecuente aislamiento de los páramos en islas biogeográficas (van der Hammen, 1988; van der Hammen y Cleef, 1986; van der Hammen, 1992). Otros disturbios naturales presentes en los páramos en escalas más locales son: erosión, lluvias y vientos, heladas y



disturbios producidos por animales y fuegos naturales (Vargas, 2013). Los ecosistemas terrestres y acuáticos que se encuentran en el páramo han evolucionado bajo este régimen de disturbios naturales y por ende los organismos que los habitan han desarrollado estrategias adaptativas que les han permitido su permanencia.

Los páramos tuvieron poco uso por los pobladores de la época prehispánica, pues los consideraban lugares sagrados (Morales et al., 2007). La transformación antropogénica importante comenzó después de la llegada de los conquistadores europeos en el siglo XVIII, en el periodo conocido como la Colonia (Sarmiento y Llambí, 2011; Luteyn, 1999).

Por tanto, el régimen de disturbios antrópicos es más reciente y presenta intensidad, magnitud, duración y frecuencia diferentes a las de los disturbios naturales. Este actúa en escalas espacio-temporales distintas y produce respuestas disímiles, originando una serie de escenarios para la gestión territorial de la biodiversidad a través de

la restauración ecológica. Según el estado en que se encuentre, sea un páramo conservado o un páramo alterado o degradado, es necesario mantener esfuerzos de diagnóstico, evaluación y seguimiento. En este libro se hace énfasis especial en los dos últimos temas.

Los principales disturbios antrópicos que se presentan en los páramos de Colombia son: incendios de la cobertura vegetal, ganadería, agricultura –principalmente papa y cebolla–, minería a cielo abierto y de socavón –calizas, carbón, oro, arenas–, plantaciones de especies forestales exóticas –pinos, eucaliptos, acacias–, obras civiles –infraestructura vial, hidrocarburos, hidroeléctricas, embalses, líneas de transmisión eléctrica y gasoductos–, corte de matorrales para la obtención de leña, colonización de plantas invasoras –retamo espinoso, pasto kikuyo, falsa poa, entre otros– y defaunación por cacería (Vargas, 2013). Cada uno de estos genera impactos que afectan la capacidad de recuperación y la resiliencia del ecosistema (Figuras 7 y 8).



Los escenarios más extensos y urgentes tienen que ver con la conversión del páramo en pasturas para ganadería extensiva, los incendios recurrentes, la pérdida de los bosques de ribera, la minería y la transformación de cuerpos de agua. Todos los escenarios tienen como denominador común la alteración del régimen hidrológico y, en consecuencia, la pérdida del principal beneficio ecosistémico del páramo hacia el hombre: el agua.

Existe una compleja red de relaciones entre los principales disturbios antrópicos que se presentan en los páramos (Figura 9), cuyas interacciones generan fuertes impactos acumulativos o desencadenan nuevas alteraciones. El entendimiento de esta relación es muy importante para el manejo, pues los escenarios de restauración tienen que ver con la relación entre disturbios naturales y antrópicos y el sinergismo que existe entre ellos.

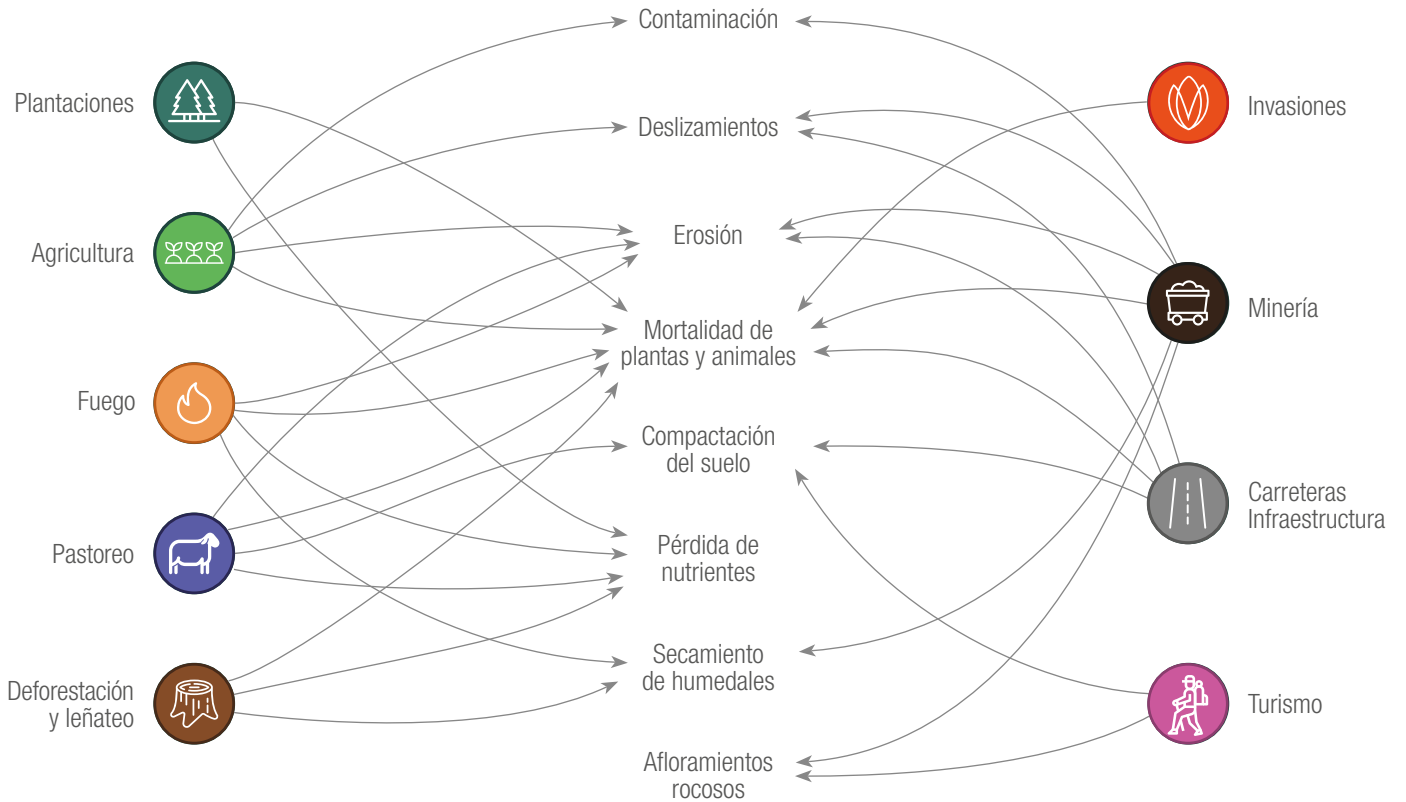
Un disturbio puede tener múltiples efectos sobre el ecosistema (Figura 10), tales como: contaminación,

**Figura 8.** Principales disturbios en el páramo. **a.** Quemas (PNN Chingaza); **b.** pastoreo de ganado ovino (PNN Sumapaz); **c.** pastoreo de ganado bovino (PNN Nevados); **d.** actividades agrícolas (PNN Sumapaz); **e.** plantaciones exóticas (páramo del Ángel, Ecuador); **f.** minería (páramo Ecuador); **g.** invasión de retamo espinoso (Usme, Cundinamarca); **h.** mortalidad masiva de frailejones (páramo PNN Chingaza). Fotografías: Orlando Vargas Ríos, Laura Giraldo y John Bernal.

deslizamientos, erosión, mortalidad de plantas y animales, compactación del suelo, pérdida de nutrientes, secamiento de humedales, afloramientos rocosos. Es decir, sobre una misma área se pueden presentar varios de estos efectos; por ejemplo, el pastoreo de ganado puede producir erosión, mortalidad de plantas, compactación del suelo, pérdida de nutrientes, secamiento de humedales y otros efectos colaterales, como aumento de la escorrentía superficial, invasiones de plantas y alteración de las redes tróficas.



**Figura 9.** Interacción entre disturbios antrópicos en los páramos andinos, el grueso de la flecha indica un mayor efecto. Fuente: Vargas et al. 2021 (en prensa).




**Figura 10.** Efectos de los disturbios antrópicos en los páramos andinos. Un solo disturbio puede tener muchos efectos sobre el ecosistema. Fuente: Vargas et al. 2021 (en prensa).

## Escenarios de restauración ecológica en los páramos

Los efectos del régimen de disturbios naturales y antrópicos generan variados escenarios de restauración ecológica en el páramo (Vargas, 2013) bajo diferentes dinámicas. En la Tabla 1 se presentan los principales disturbios antrópicos y los escenarios físicos que se generan para la restauración.

Debido a la intensidad y las distintas escalas en las que actúan los procesos de cambio global, la restauración ecológica es una herramienta que permite mitigar efectos del cambio climático y propiciar la expansión e interconexión de parches remanentes de páramo y bosque. En este sentido, se deben plantear acciones

 **Tabla 1.** Principales disturbios antrópicos y sus escenarios en los páramos andinos. Fuente: Elaboración propia.

a escala de paisaje que permitan hacer un manejo adecuado del páramo: conectando los diferentes tipos de vegetación y el uso sostenible, integrando y visibilizando a los habitantes del páramo, y recalcando la importancia de la restauración ecológica para el mantenimiento de los beneficios que el páramo brinda a la humanidad.

Es importante recordar que de acuerdo con el régimen de uso y la historia de disturbios, que se proponen durante el diagnóstico de restauración, se establecen los objetivos de un proceso de restauración ecológica. De esta manera, al considerar la condición actual del sitio a intervenir, se pueden definir con mayor facilidad las técnicas y estrategias de restauración más apropiadas a implementar para alcanzar los objetivos de restauración. En el capítulo siguiente se profundiza en aspectos relacionados con la restauración de los páramos.

Principales disturbios antrópicos	Tipos	Principales escenarios
Fuego	Fuegos de superficie	Laderas degradadas
Pastoreo	Vacas, caballos, ovejas, cabras	Prados
Agricultura	Papa principalmente	Erosión y áreas en sucesión
Minería	Oro, calizas, carbón, areniscas	Erosión, afloramientos de roca
Plantaciones	Pinos, cipreses, eucaliptos	Plantaciones
Invasiones	Retamo espinoso, pastos	Parches
Deforestación (bosques de páramos)	Bosques de colorado ( <i>Polylepis</i> ), Tibar ( <i>Escallonia</i> ) y otros	Áreas riparias
Infraestructura	Carreteras, embalses	Erosión, afloramientos de roca
Turismo	Senderismo	Erosión, afloramientos de roca

# CAPÍTULO 02

---

# La restauración ecológica en los páramos

- ⊕ Páramos: ecosistemas en transformación
- ⊕ Los beneficios del páramo para las personas
- ⊕ ¿Qué es la restauración ecológica?
- ⊕ La restauración ecológica en los páramos
- ⊕ Experiencias de restauración ecológica en los páramos andinos
- ⊕ Necesidades de investigación en restauración de páramos







**E**n este capítulo se presenta una síntesis de experiencias de restauración ecológica en los páramos, su importancia y la estrecha relación con el bienestar de las comunidades. Se identifican algunas de las técnicas comúnmente usadas, como la restauración pasiva –regeneración natural prescrita– y la restauración activa –regeneración natural asistida–, en áreas afectadas por incendios, uso agropecuario y minero donde se presentan procesos de sucesión primaria y secundaria. Finalmente, se señalan líneas de investigación que han surgido sobre este tema y algunos vacíos que existen actualmente, para poder restaurar exitosamente el páramo.

### **Páramos: ecosistemas en transformación**

Los páramos actualmente, estén o no en áreas de conservación, son mosaicos de parches de vegetación en matrices de pasturas y cultivos, de tal forma que los paisajes cambian sus gradientes; por ejemplo, el pastoreo la desecación de humedales cambia los gradientes hídricos, o el fuego y el pastoreo generan pérdida de nutrientes, alterando los gradientes de nutrientes (Figura 11). Las áreas para la restauración



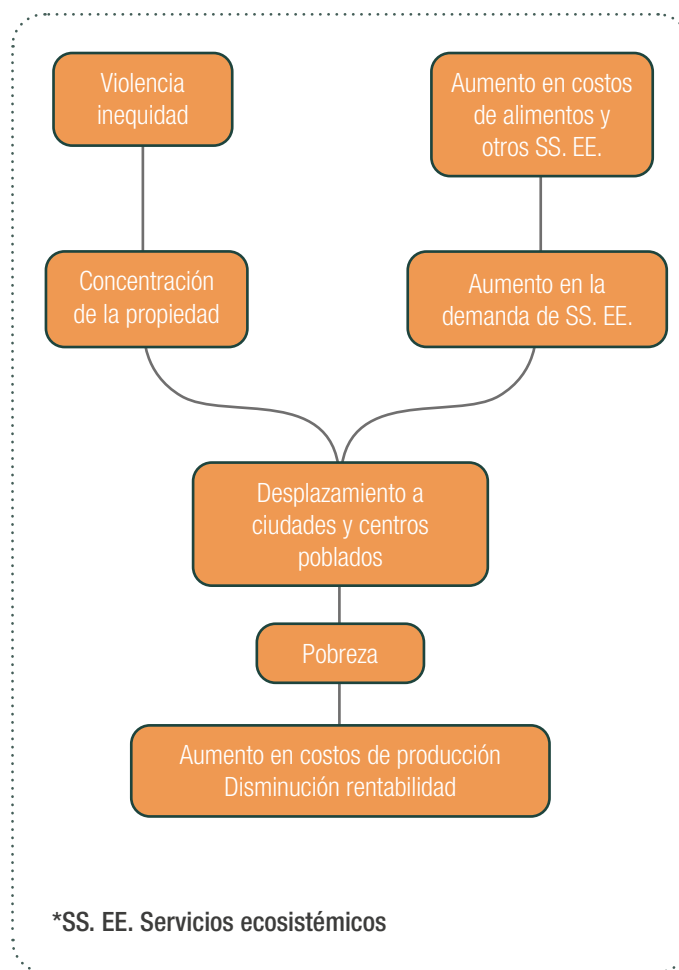
**Figura 11.** Mosaico de vegetación en el páramo de Guerrero, Cundinamarca. Fotografía: Banco de Imágenes Ambientales del Instituto Humboldt.

ecológica presentan un complejo régimen de disturbios naturales y antrópicos.

El deterioro de los ecosistemas está relacionado directamente con el bienestar humano, a medida que el ecosistema se degrada y pierde sus atributos –composición, estructura y función–, las repercusiones sobre la sociedad se evidencian en la insatisfacción de las necesidades básicas y supone graves obstáculos para la erradicación de la pobreza, el hambre y a la reversión del fenómeno de pérdida de biodiversidad en muchas partes del mundo (Sabogal et al., 2015). Así mismo, el incremento de la población humana lleva a una mayor presión sobre los recursos y se generan conflictos socioambientales (Figura 12).

### **Los beneficios del páramo para las personas**

El principal beneficio es la provisión de agua potable de muy alta calidad y cantidad, de la cual dependen muchos centros poblados andinos, incluidas las grandes

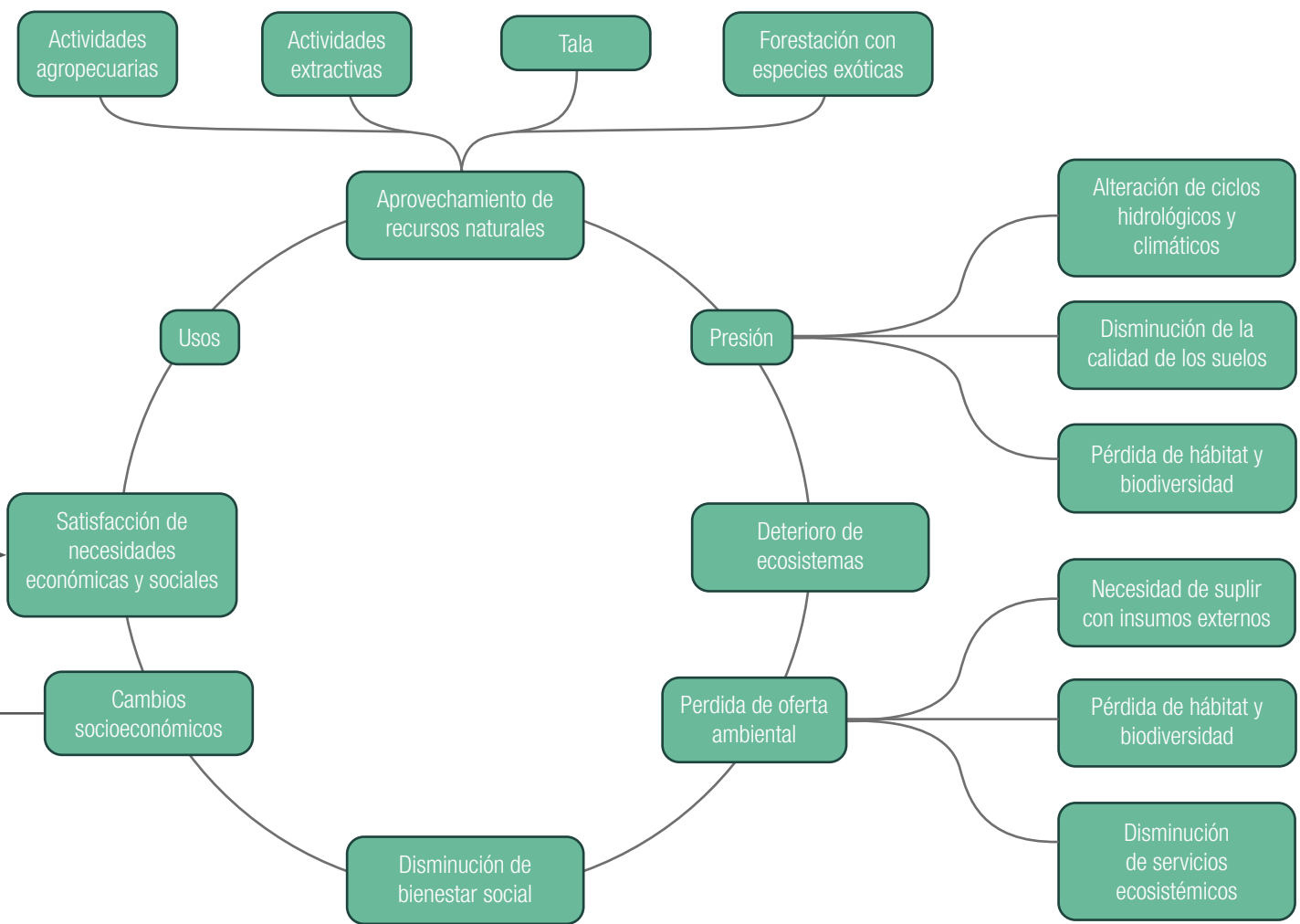


ciudades colombianas. La transformación del páramo en pasturas para ganadería hace que se esté perdiendo este beneficio debido a la transformación del suelo y la vegetación. El páramo es ante todo un ecosistema que regula la hidrología y logra la producción de agua de altísima calidad que, en muchos casos, no necesita ser tratada y, en otros, los costos de tratamiento son muy bajos. Las coberturas vegetales en pendiente controlan la erosión y en general el clima y la producción de carbono. Otros beneficios relevantes son la polinización y el control de plagas que se presta desde las áreas en mejor estado de conservación hacia los agroecosistemas. Dentro de los beneficios culturales se encuentra el turismo, el cual puede tener una gran importancia económica debido al gran interés de muchas personas de visitar este ecosistema, especialmente por su belleza escénica (Figura 13).

### ¿Qué es la restauración ecológica?

Ante las tasas de transformación y pérdida de beneficios para las personas, en Colombia –donde cerca del 40 % del territorio continental del país presenta algún estado de daño, degradación o destrucción (Etter et al., 2008)– la restauración ecológica es, más que una necesidad, una obligación del Estado y debe apuntar entre otros aspectos al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible adoptados por la Naciones Unidas. Cuatro de estos objetivos tienen que ver con la sostenibilidad de la biosfera y tres directamente con los páramos: 1) agua limpia y saneamiento, 2) acción por el clima, y 3) vida de ecosistemas terrestres. La restauración ecológica es una aliada fundamental para alcanzar dichos objetivos.

En Colombia la necesidad de mitigar, reparar y compensar los daños causados en los ecosistemas



no es nueva, desde hace varias décadas se han incluido en planes, programas, proyectos y normas conceptos como repoblamiento, reforestación, recuperación natural, recuperación para la preservación, sustitución ambiental, rehabilitación de coberturas, entre otros. Recientemente el concepto de restauración se usa en diferentes ámbitos como el académico, político, económico, de gestión y en los instrumentos de ordenamiento.

Desde el punto de vista académico este concepto empieza a forjarse en las universidades con el desarrollo de la *ecología de la restauración*, entendida como la ciencia que estudia los ecosistemas degradados y su proceso de restablecimiento, utilizando conceptos, teorías, métodos y herramientas de la ecología básica como los estudios de sucesión natural, los cuales son la base de la restauración ecológica (Aguilar-Garavito y Ramírez, 2016).

**Figura 12.** Esquema causal de relaciones de múltiples presiones naturales y sociales sobre los ecosistemas. Fuente: Elaboración propia.

La definición de restauración ecológica ha atravesado por un proceso de síntesis y aclaración de términos. Hace unos 30 años, aproximadamente, se refería a recrear los ecosistemas, posteriormente aludía al retorno o regreso a una condición previa. Dado que estos tres conceptos implican volver el ecosistema a su estado original, se introdujo el término *ecosistema pre-disturbio* o *ecosistema de referencia*, como un modelo de la restauración. Las definiciones posteriores introducen conceptos como reparar, recuperar y rehabilitar, hasta llegar a la definición de la Sociedad Internacional para la Restauración ecológica (SER, 2004): “el proceso de ayudar al restablecimiento de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido”.



**Figura 13.** Belleza paisajística como beneficio cultural. Páramo de Laguna Verde, Nariño. Fotografía: Banco de imágenes Instituto Humboldt

En la actualidad, la restauración ecológica representa una herramienta para la gestión territorial de la biodiversidad, al tiempo que se constituye en un aliada para el desarrollo sostenible, donde se maximizan los beneficios ecológicos y sociales mediante la recuperación y mantenimiento de la capacidad de los ecosistemas de generar flujos continuos de beneficios y aportar a la resolución de conflictos del uso de la tierra (Meli et al., 2017). La restauración ecológica busca recuperar un ambiente degradado e intenta identificar estrategias que combinen intereses de producción y conservación, también puede suplir ciertas necesidades de producción de las comunidades que están afectando el sistema natural y, por ende, puede generar un cambio de actitud en relación con el uso de la biodiversidad (Duarte et al., 2017).

La capacidad de restaurar un ecosistema depende de la profundidad del entendimiento que se tenga en ecología y otros campos del conocimiento (Vargas-Ríos, 2011), como por ejemplo: estado del ecosistema antes y después del disturbio, grado de alteración de la hidrología, geomorfología y suelos, causas por las cuales se generó el daño, estructura,

composición y funcionamiento del ecosistema preexistente, información acerca de condiciones ambientales regionales, interrelación de factores de carácter ecológico, cultural e histórico –es decir, la relación histórica y actual entre el sistema natural y el sistema socioeconómico–, disponibilidad de la biota nativa necesaria para la restauración, los patrones de regeneración o estados sucesionales de las especies –p. ej. estrategias reproductivas, mecanismos de dispersión, tasas de crecimiento y otros rasgos de historia de vida o atributos vitales de las especies–, tensionantes y limitantes que detienen la sucesión y el papel de la fauna en los procesos de regeneración.

Cabe resaltar que en los múltiples escenarios de restauración que se presentan en países con alta diversidad natural y social aparecen problemas relacionados con los conflictos de tenencia y uso de la tierra. Varios investigadores de América Latina han señalado que algunos de los lineamientos propuestos por la SER para la restauración ecológica son de difícil aplicación o no interpretan complejas realidades sociales y naturales (Zuleta et al., 2015).

Actualmente, hay un consenso de cómo desarrollar diferentes tipos de restauración teniendo en cuenta la relación entre problemas sociales y restauración ecológica y se ha propuesto un marco conceptual sobre los socioecosistemas como unidad de gestión, que

contribuye a la gobernanza del paisaje, la restauración ecológica y la gobernanza del agua como herramientas indispensables para el manejo de paisajes.

Cabe resaltar que “las particulares condiciones de los países de América Latina favorecen el desarrollo de una restauración ecológica, que proteja la biodiversidad y garantice la provisión de servicios ecosistémicos, contribuyendo al bienestar de nuestras sociedades, especialmente de sus sectores menos favorecidos” (Barrera-Cataño et al., 2015; Zuleta et al., 2015). En este sentido, la restauración ecológica es exitosa si es capaz de recuperar el mayor número de beneficios que contribuyan al mejoramiento de la calidad de vida de la sociedades urbanas y rurales.

Una definición de restauración ecológica más apropiada para nuestra realidad natural y social y en general para América Latina es: “La restauración ecológica es el proceso social de recuperar la biodiversidad y sus beneficios sociales, teniendo en cuenta las diferencias biofísicas, culturales, socioeconómicas y de usos ancestrales del territorio” (Zuleta et al., 2015). En este libro se propone una definición que integre los socioecosistemas y la restauración ecológica, a saber: la restauración ecológica es el proceso de integración social y natural en los socioecosistemas para la recuperación de los beneficios sociales.

Los objetivos generales de la restauración ecológica considerados por el Ministerio de Ambiente (2015) son fundamentales para emprender un proyecto de restauración, ya que para determinar el objetivo a alcanzar es indispensable identificar el enfoque más adecuado a implementar de acuerdo con las características del área; esto, como se abordará más adelante, está relacionado directamente con el monitoreo al proceso de restauración.

De manera general, contemplar el grado de perturbación del área –relacionado con el tipo, frecuencia y magnitud del disturbio– y el nivel de resiliencia del ecosistema, así como su potencial de regeneración –disponibilidad de propágulos, las características socioeconómicas de la zona, entre otros– permitirá definir la aproximación más adecuada para alcanzar el objetivo. Al respecto es importante dar claridad sobre algunas definiciones que deben tenerse en cuenta para determinar los objetivos y aproximaciones de un proceso de restauración ecológica (Cuadro 1).



**Cuadro 1.** Aproximaciones básicas de un proceso de restauración ecológica de acuerdo con el nivel de intervención que requiere el ecosistema.

- *Restauración activa (regeneración natural asistida):* asistencia al restablecimiento de un área disturbada en la cual se amerita realizar una intervención sobre los componentes. También se denomina *reconstrucción* dado que la biota apropiada para el área debe ser reintroducida por completo o casi por completo, debido a que no puede regenerarse o recolonizar dentro de plazos razonables o disponibles, aun después de intervenciones profesionales de regeneración asistida (SER, 2016).
- *Restauración pasiva (regeneración natural prescrita):* asistencia al restablecimiento de un área disturbada por medio de la neutralización de los factores limitantes y tensionantes. También se conoce como *restauración espontánea* pues se enfoca en ayudar activamente cualquier capacidad natural de regeneración de la biota remanente en el sitio o cercana a éste, en vez de reintroducir la biota al sitio o dejar que éste se regenere naturalmente (SER, 2016).
- *Reconstrucción parcial:* estado en el cual todos o parte de los atributos del ecosistema han mostrado algún grado de recuperación, pero aún no se asemejan lo suficiente al ecosistema de referencia (SER, 2016).
- *Reconstrucción completa:* estado en el que todos los atributos del ecosistema son muy similares a los del ecosistema (o modelo) de referencia. Antes de que esta ocurra, el ecosistema demuestra tener la capacidad de autoorganizarse, lo cual conduce a la resolución y madurez completa de sus atributos. En el punto de autoorganización, la fase de restauración podría considerarse completa y el sitio pasaría a una etapa de mantenimiento (SER, 2016).

## La restauración ecológica en los páramos

Aunque no existe un censo completo de los páramos del país, Sarmiento et al. (2013) estimaron que 400 municipios (36 %) tienen áreas de páramo en sus jurisdicciones y cerca de 184 000 personas viven en las zonas rurales de estos municipios, lo cual permite una aproximación a la población actual en los páramos. Por otra parte, en el Censo Nacional Agropecuario del 2014 se identificaron al menos 69 000 personas que habitan en Unidades Productivas Agropecuarias (UPA) en áreas de páramo (DANE, 2014).

En cuanto a la evaluación de las coberturas vegetales que han sido transformadas para actividades agropecuarias, estas ocupan 13 % del área total de páramo en el país (Sarmiento et al., 2013), y sobresalen complejos de páramo altamente transformados como el Altiplano Cundiboyacense con 73 % de coberturas transformadas, Guerrero con 49 %, Tota con 31 %, Iguaque con 27 % y alrededor del 20 % de transformación en complejos como Los Nevados, Almorzadero, Pisba, Santurbán y Guantiva-La Rusia (Rivera y Pinilla, 2015). Entre los cultivos más comunes de alta montaña se encuentra la cebolla y la papa, los cuales cubren cada vez más área, principalmente en los páramos secos. Las prácticas pecuarias también aportan a las transformaciones del ecosistema, pues utilizan constantemente el fuego para estimular los rebrotes que consume el ganado (Vargas Ríos, 2000). Hofstede (2001, 2002) asegura que el mayor impacto sobre todos los páramos es, sin lugar a duda, la agricultura, seguido de la ganadería –bovina y ovina– y las quemadas asociadas.

En relación con la minería, el principal interés es la explotación de carbón y oro, el primero se produce en páramos de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Norte de Santander, mientras que la producción de oro se focaliza en departamentos como Santander, Tolima, Nariño y Cauca (Sarmiento et al., 2013). Los impactos de la minería se relacionan con disminución de caudales, contaminación del recurso hídrico y el suelo, la pérdida total de coberturas vegetales y la alteración del paisaje (Velasco-Linares, 2014).

Actividades como las plantaciones forestales en páramos, promovidas desde la década de los setenta por actores públicos y privados como alternativa económica y energética para campesinos locales, no se ha

cuantificado a pesar de conocer los efectos negativos que estas causan sobre el ecosistema (Velasco-Linares, 2014; Basto et al., 2018). Esta práctica continúa vigente en la actualidad como una estrategia de secuestro de carbono y como Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) (Peralvo y Cuesta, 2014), adicionalmente, existen plantaciones establecidas que han empezado a expandirse de manera natural generando desplazamiento de especies nativas.

La heterogeneidad biofísica de las formaciones montañosas tiene características particulares en los diferentes complejos de páramos que inciden en el desarrollo de las actividades humanas; por ejemplo, los páramos secos especialmente de la cordillera Oriental son los de mayor transformación debido al cultivo intensivo de la papa, y los páramos húmedos son utilizados principalmente para la ganadería extensiva.

## Experiencias de restauración ecológica en los páramos andinos

En el Anexo 1 se presenta una lista de proyectos que se han realizado en los páramos. En general, son proyectos de corto plazo a escalas de parcela, los cuales son de gran importancia para proyectarlos a escalas mayores. La mayor parte de estas experiencias, o al menos su documentación, se limita a la implementación de técnicas y estrategias, pero no dan cuenta del monitoreo en plazos más largos.

A pesar de la importancia del monitoreo para la toma de las decisiones pertinentes y para ajustar las estrategias o las técnicas de restauración y así incrementar sus posibilidades de éxito, en el país se ha identificado una gran debilidad al respecto. Murcia y Guariguata (2014) enuncian que en los proyectos de restauración en los que se reporta el monitoreo, no se evalúa si realmente se cumplieron las metas planteadas, y raramente incluyen una cuantificación de cambios en estructura y función del ecosistema o de aspectos sociales. De tal forma que la evaluación es ineficiente y no necesariamente genera información conducente a la reflexión o a realizar los ajustes tal como se esperaría en la gestión adaptable.

Entre las pocas experiencias en los páramos que presentan implementación en períodos de tiempo más largos se encuentra el Proceso de Restauración Ecológica en Áreas Afectadas por Incendios en el Complejo

de Humedales del Otún, Parque Nacional Natural Los Nevados, que ha tenido dos fases en 2007-2009 y 2011-2013. Al respecto, Sesquillé Escobar (2017) realizó un monitoreo de la vegetación de las acciones de restauración ecológica de cada fase, acá encontró que la mayoría de las estrategias no estaban marcadas, y en los pocos sitios donde se encontraron las estacas el porcentaje de mortalidad de individuos fue del 83 %. Los sitios en restauración son áreas dominadas por paja o pastos limpios, en estos se evidenció la presencia de ganado en los sitios de implementación. Esto implica que, pese a que este es un proceso que ha tenido continuidad en inversión y en implementación de acciones de restauración por parte del PNN, no ha tenido el éxito deseado.

Uno de los problemas centrales es el monitoreo de la restauración de los páramos y la financiación para proyectar la restauración a una escala espacial de cuencas o microcuencas, y a una escala temporal de al menos diez años. A su vez, es clave que incluya desde el principio la formulación de un plan de monitoreo, se proponga lograr la activa y permanente participación comunitaria en los procesos, así como la apropiación de los proyectos de restauración, y la designación de actores encar-

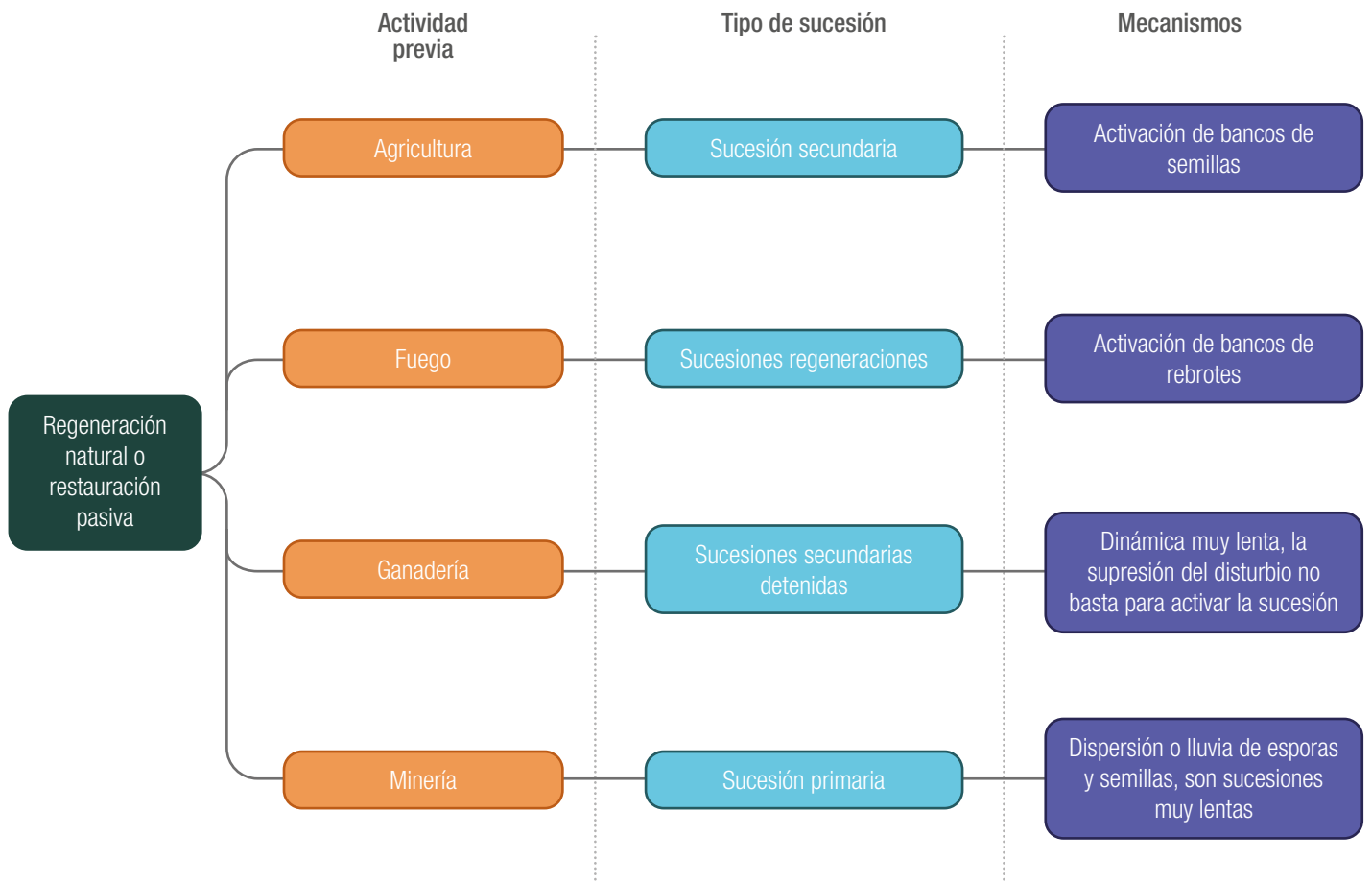
gados de este aspecto en el largo o mediano plazo. Se espera, precisamente, que esta publicación contribuya en la profundización sobre el monitoreo a la restauración en el páramo. Con este propósito, a continuación, se abordan algunas de las técnicas más comunes usadas en los proyectos de restauración:

#### ***Restauración pasiva (regeneración natural prescrita)***

La restauración pasiva, también conocida como restauración espontánea, es el proceso de recuperación que ocurre sin intervención activa humana. Esta es la estrategia más sencilla para adelantar los procesos de restauración, se basa principalmente en la resiliencia del ecosistema o la capacidad para recuperarse mediante los procesos de sucesión-regeneración. La única acción humana es la neutralización de los factores limitantes y tensionantes, que se llevan a cabo comúnmente mediante el aislamiento físico del área a restaurar evitando cualquier perturbación antrópica, por lo general mediante el cercado del área (Figura 14).

**Figura 14.** Ejemplo de cercado en el páramo para favorecer la restauración pasiva. Predio privado en el páramo de Chingaza. Fotografía: Orlando Vargas.





**Figura 15.** Tipos de dinámicas sucesionales en el páramo que pueden presentar algún tipo de restauración pasiva. Fuente: Elaboración propia.

Para la implementación y el monitoreo de esta estrategia es importante considerar las principales dinámicas o tipos de sucesión que se generan después de disturbios por fuego, agricultura, ganadería y minería; para cada una de estas corresponde un tipo de sucesión que se desarrolla a través de restauración pasiva en diferentes escalas de tiempo (Figura 15).

El monitoreo de la restauración pasiva depende del impacto del disturbio que originó la dinámica. Después de fuegos las variables de monitoreo principales son la recuperación de la cobertura vegetal. Después de agricultura el monitoreo se basa en la colonización de las especies típicas de páramo y en la aparición de especies introducidas, invasoras de sistemas agrícolas. Después de ganadería lo más importante de monitorear es la recuperación del suelo posterior a su descompactación y la reintroducción de especies. Después de minería el monitoreo es conjunto de la

recuperación del suelo y la colonización de las especies (Figura 16).

Un tipo de sucesión secundaria que se presenta actualmente es la *paramización* (Figura 17), fenómeno que se presenta cuando las plantas de páramo, que son altamente competitivas y que están restringidas a elevaciones mayores, ocupan niveles altitudinales inferiores a los que corresponden (Valencia, 2015; Valencia et al., 2012; Vargas Ríos, 2011). Se presenta cuando el proceso de deforestación va acompañado por quemadas repetidas, cultivos y potrerización. Este fenómeno determina la aparición de enclaves o sectores situados dentro del cinturón de los bosques andinos y altoandinos, donde la cobertura boscosa original es sustituida por trayectorias sucesionales, cuya composición florística y fisionomía se asemejan a las que caracterizan páramo y subpáramo (Hernández-C, 1997; León, 2003). La paramización forma diferentes tipos de comunidades de páramo al variar el contenido de agua en el suelo y la pendiente formando mosaicos de parches (Valencia, 2015). Los niveles actuales de paramización impiden precisar los límites de los páramos antrópicos (Hernández-C, 1997).





### Restauración activa (regeneración natural asistida)

Contempla acciones directas sobre las áreas a restaurar, algunas de las técnicas que se han implementado se resumen en la Tabla 2, que se encuentra en la siguiente página.

### Necesidades de investigación en restauración de páramos

Existen aún muchos vacíos en cuanto a la comprensión del funcionamiento del páramo como ecosistema. En este contexto, para que la restauración ecológica sea exitosa se deben tener como base conceptos y teorías básicas de ecología así como su interacción con las comunidades, que permitan asistir los procesos ecológicos que han sido alterados. Algunos temas de interés para continuar con la investigación sobre el tema son:

- ⊕ Evaluar los bancos de semillas tanto de la vegetación zonal como azonal para estudiar su poten-



**Figura 16.** a. Sucesiones secundarias después de agricultura, el color rojo es la planta introducida *Rumex acetocella* L. la cual se expresa después de la cosecha de papa; b. después de incendios se activan primero los bancos de rebotes; c. el ganado transforma todo el ecosistema y lo convierte en una pastura; d. sucesiones primarias después de minería en páramo, inicia sobre el sustrato rocoso. Orlando Vargas y Banco de Imágenes Ambientales.

cial de regeneración y utilizarlo como fuente de propágulos.

- ⊕ Evaluar los estados de micorrización de las plantas.
- ⊕ Estudiar el régimen hidrológico de las turberas y los efectos de la entrada de sustancias contaminantes.
- ⊕ En el caso particular de los subpáramos cuyos niveles altitudinales se han perdido por efecto de la deforestación del bosque altoandino, es necesario estudiar y comparar regiones parecidas y reintroducir las especies perdidas.
- ⊕ En las áreas de páramo que han sido sembradas con pinos es necesario aprender a rehabilitar los


**Tabla 2.** Técnicas de restauración activa usadas en los páramos

Técnica	Método	Objetivo
Descompactación del suelo	La compactación del suelo se puede superar con acciones físicas y con el uso de herramientas agrícolas que ocasionen bajo impacto sobre el banco de semillas en el suelo –como puede ser el azadón–, previa eliminación de la vegetación, que generalmente son pastos introducidos.	Expresión del banco de semillas.
Siembra directa	La siembra directa de semillas consiste en la introducción de semillas directamente en el área a restaurar, es una estrategia relativamente sencilla que no requiere de gran cantidad de mano de obra y, por ende, es relativamente económica (Wallin et al., 2009). Variaciones de la estrategia como la hidrosiembra pueden ser utilizadas en taludes desprovistos de suelo a causa de la minería a cielo abierto.	A pesar de los resultados negativos presentados en las experiencias documentadas, es importante continuar la investigación alrededor de esta estrategia, enfocando los esfuerzos en factores como la preparación del suelo y la generación de micrositios adecuados para la germinación, tratamientos pre germinativos, y el uso de técnicas de peletización o recubrimientos de la semilla.
Nucleación	De acuerdo con Reis et al. (2010), la nucleación es una técnica que utiliza pequeños núcleos de vegetación dentro de áreas degradadas como base o punto de partida para la regeneración de la vegetación.	Facilitar los procesos de sucesión natural, dado que involucra los tres subsistemas básicos de un ecosistema como son: productores, consumidores y descomponedores (Reis et al., 2007). Los núcleos de vegetación tienen la función de atraer animales y plantas, permitiendo otras especies para colonizar el área (Yarranton y Morrison, 1974). A partir de plantas, núcleos o islas de vegetación, las plantas pioneras se expanden y se acelera el proceso de sucesión natural en áreas degradadas.
Formación de doseles y coberturas vivas	La formación de doseles y coberturas vivas consiste en utilizar inicialmente plantas de rápido crecimiento (herbáceas o arbustivas) y de ciclo corto (generalmente leguminosas).	Formar un microclima y mejorar las condiciones del suelo (Bechara et al., 2007). Estas plantas florecen y fructifican en pocos meses, atrayendo una serie de animales polinizadores, dispersores de semillas y consumidores. Como son plantas de ciclo corto entran pronto al ciclo de los descomponedores, reciclando la materia orgánica en el suelo.
Trasplante o transposición de suelo	El trasplante de suelo consiste en la retirada de la capa superficial del horizonte orgánico del suelo (biomasa más los primeros cinco centímetros de suelo) de un área con sucesión más avanzada (Reis et al., 2003). El trasplante de pequeñas porciones (núcleos) de suelo no degradado representa grandes probabilidades de recolonización del área, con microorganismos, semillas y plantas de especies vegetales pioneras.	Esta técnica tiene dos objetivos, el primero es la rehabilitación del suelo y, el segundo, el trasplante de bancos de semillas. Con el trasplante de suelo, se reintroducen poblaciones de diversas especies de la micro, meso y macrofauna / flora del suelo, importantes en el ciclo de nutrientes, reestructuración y fertilización del suelo (Reis et al. 2003).
Residuos de material vegetal	En los páramos se presentan residuos de tallos de frailejones producto de la mortalidad por incendios, predación de la médula y el punto vegetativo que se pueden utilizar como micrositios de establecimiento para iniciar núcleos, además de ser refugio para pequeños animales.	Aunque los procesos en el páramo son lentos esta técnica a gran escala contribuye a tener mayor heterogeneidad espacial y a aumentar la oferta de micrositios, con el tiempo se forman núcleos que contribuyen a la supervivencia de las especies de plantas y animales.
Reubicación o trasplante de individuos	La reubicación o trasplante de individuos es una estrategia utilizada en diversos ecosistemas y ambientes desde hace varias décadas, sin embargo, es reciente en ecosistemas de páramo. Se considera una estrategia eficaz bajo condiciones extremas, como las del páramo, con procesos de regeneración lentos debido a la baja productividad primaria neta, bajas temperaturas, altas variaciones de temperatura entre el día y la noche y suelos ácidos (Rojas-Zamora et al., 2013).	Enriquecimiento de áreas degradadas.
Acolchado o sombreado artificial	Otra estrategia para el control de plantas exóticas en los procesos de restauración es el uso de sombreado artificial mediante acolchados o <i>mulching</i> . Esta es común en prácticas agrícolas para limitar el crecimiento de arvenses por reducción de la luz como recurso, disminuir la competencia vegetativa en la zona radicular y aumentar la temperatura del suelo (Ricotta y Masiunas, 1991; Lament, 1993).	En los páramos andinos se ha usado el acolchado plástico para limitar la regeneración de pastos exóticos luego de la eliminación de la biomasa epigea y parte de la hipogea (Castiblanco, 2012).



**Figura 17.** Área paramizada en donde existió el bosque altoandino, páramo de Sumapaz. Fotografías: Orlando Vargas.

suelos para iniciar un proceso sucesional que restablezca la vegetación de páramo.

- + Recuperación de los suelos de páramo.
- + Recuperación de los bosques enanos de páramo (*Polylepis*, *Escallonia*). Estos bosques conformaban los bosques de ribera de gran importancia para la protección de microcuencas.
- + Restauración de páramos bajo invasiones de *Ulex europaeus* L. y otras especies invasoras como gramíneas.
- + Impulsar la investigación de la ecología de semillas y su germinación en condiciones de invernadero.
- + Establecer viveros permanentes de plantas de páramos para suministro de especies a largo plazo.
- + Desarrollar técnicas de rehabilitación que permitan la producción de bajo impacto y la recuperación de servicios ecosistémicos.
- + Generar mecanismos de participación de las comunidades y de apropiación social del conocimiento sobre los procesos de restauración ecológica.

- + Apoyar la organización esquemas de pago por servicios ambientales para las comunidades locales que desarrollan acciones de conservación y restauración de los páramos.

Si bien los páramos son una prioridad para la conservación en Colombia, la investigación para su restauración y la sostenibilidad de sus servicios ecosistémicos es escasa. Es necesario que el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y el Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación junto con el Sistema Nacional de Educación mantengan programas permanentes de investigación y capacitación a las comunidades en áreas piloto para impulsar la restauración ecológica de los páramos.

De igual forma contemplar incentivos para la restauración puede permitir la participación de las comunidades, la recuperación de servicios ecosistémicos y la contribución al bienestar de la población paramuna.

# CAPÍTULO 03

---

## El monitoreo en la restauración ecológica: ¿por qué, para qué y cómo?

- ⊕ El monitoreo en ecología
- ⊕ El monitoreo en la restauración ecológica
- ⊕ Escalas y fases
- ⊕ Bases para el diseño del monitoreo en restauración ecológica
- ⊕ Principios para el monitoreo de restauración en el páramo
- ⊕ Manejo adaptativo en la restauración de páramos
- ⊕ Instrumentos para presentación de resultados
- ⊕ Conclusiones



En el presente capítulo se resalta la importancia del monitoreo desde los puntos de vista: ecológico, social y de gestión. También se presentan las bases conceptuales y los aspectos a tener en cuenta para la elaboración de un plan de monitoreo en un proceso de restauración ecológica, considerando las etapas de diagnóstico, diseño, implementación, evaluación, seguimiento y su proyección al manejo adaptativo. Este proceso se enmarca en estándares internacionales de principios, criterios e indicadores. Primero, se presenta el contexto del monitoreo a nivel general y en la restauración ecológica, donde además se hace una reflexión sobre el estado del monitoreo en Colombia. Luego, se explica cómo emprender un proceso de monitoreo en la restauración y cuáles son sus bases. Finalmente, se aborda el manejo adaptativo y algunos instrumentos visuales para la presentación general de resultados.

## El monitoreo en ecología

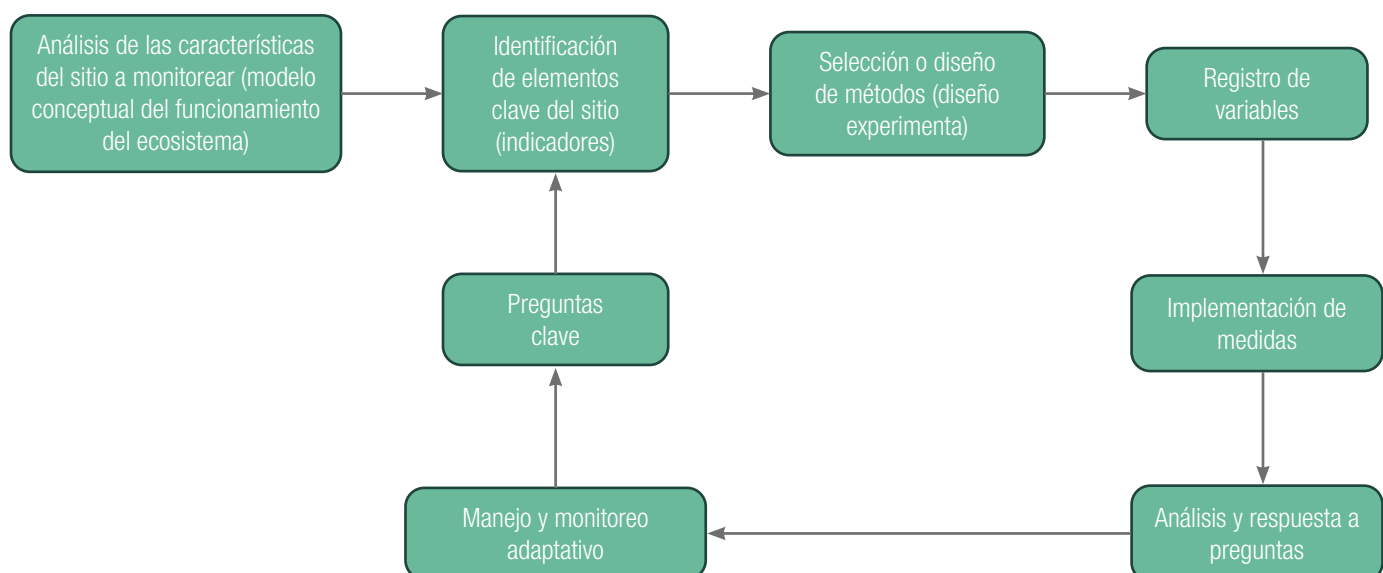
El monitoreo se refiere a la colección sistemática, continua y repetida de datos, observaciones, estudios, muestreos, cartografía, entre otros, en diferentes sitios y momentos que permite evaluar el estado del sistema y los cambios o tendencias que este experimenta (Vallejo y Gómez, 2017), se define como un proceso orientado a un propósito particular –objetivos previamente definidos–, que se relaciona con la demostración de uno o varios cambios en el tiempo (Hellawell, 1991). Actualmente todos los ecosistemas

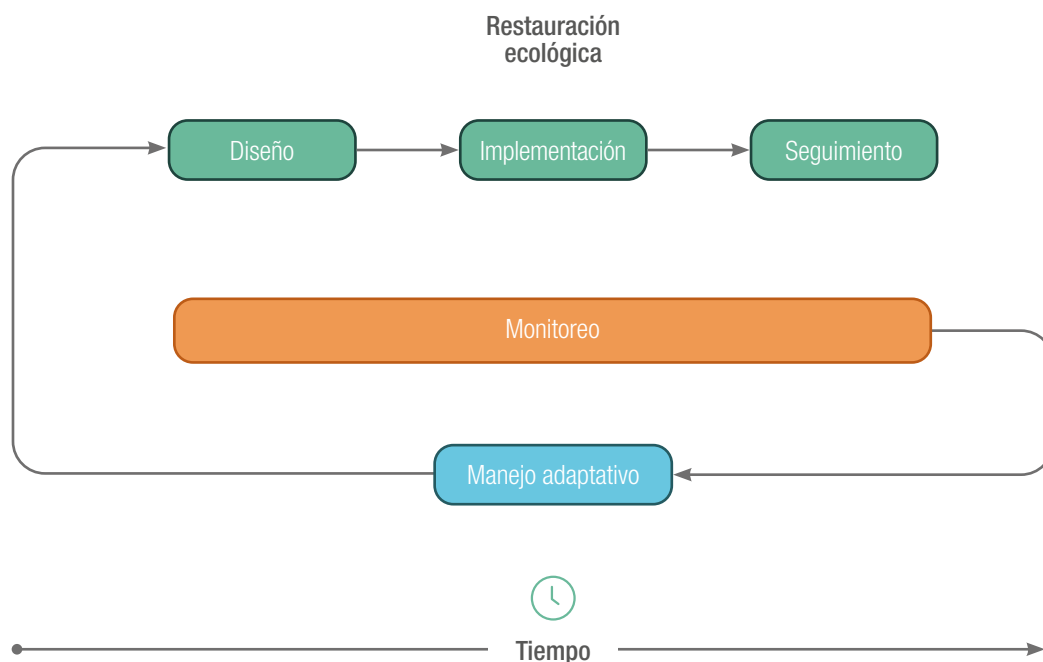
de la biosfera están sujetos a muchos factores de cambio a diferentes escalas espaciales y temporales por lo que es necesario un monitoreo de largo plazo, Lindenmayer y Likens (2010) lo definen como: “mediciones empíricas repetidas tomadas continuamente y analizadas durante al menos 10 años”.

El objetivo de los programas de monitoreo en ecología es detectar cambios en los procesos y funciones de los ecosistemas. Particularmente, la información de coberturas y composición en la vegetación resultan ser indicadores importantes, mas no únicos, en ecosistemas terrestres. Estos indicadores se relacionan con un número importante de servicios ecosistémicos que incluyen: biodiversidad, conservación de suelos y fuentes de agua, hábitats para la vida silvestre y fuentes de recursos alimenticios (Godínez-Álvarez et al., 2009).

El monitoreo puede tener diferentes enfoques – ambiental, ecológico, social y biológico– y propósitos –inventarios, estado y tendencias, vigilancia, manejo, investigación–, en cualquiera caso, el diseño del muestreo y un análisis riguroso son centrales; donde se incluyan alcances, objetivos, metodologías, recursos, tipos de análisis y divulgación de los resultados establecidos. Con estos elementos el monitoreo será realmente una herramienta para la toma de decisiones informadas y no un gasto innecesario o fuga de recursos financieros.

**Figura 18.** Estrategia para el diseño de un programa de monitoreo en ecología. Tomado y modificado de Hellawell (1991) y Vallejo y Gómez (2017).





**Figura 19.** Fases de un proyecto de restauración ecológica.  
Fuente: Elaboración propia.

El monitoreo es una herramienta que permite evaluar, además del estado de la biodiversidad y sus servicios, tendencias de los aspectos clave de la biodiversidad, alertas tempranas de amenazas, evidencia de éxito o fracaso de las intervenciones, eficacia de las inversiones, en suma, con esta información es posible un manejo más eficiente (Vallejo y Gómez, 2017).

En la actualidad existe poca claridad sobre los alcances y las estrategias financieras que garanticen la continuidad del monitoreo y que promuevan el intercambio de datos y el análisis de la información a escalas regionales o nacionales. Frecuentemente es confundido con otras actividades como “censos” o “inventarios” de biodiversidad que no permiten medir los cambios en un sistema o no siempre responden a las necesidades de los financiadores o administradores de recursos naturales, lo cual genera falsas expectativas y cuestionamientos acerca del carácter científico, su utilidad y costos (Vallejo y Gómez, 2017).

De manera general, en ecología, el diseño de un programa de monitoreo comprende los siguientes pasos: 1) análisis de las características biofísicas y socioeconómicas del lugar a monitorear; 2) identificación y selección de indicadores; 3) selección o diseño de métodos, 4) registro de variables; 5) implementación

de medidas, y 6) análisis y formulación de nuevas preguntas (Figura 18).

Para empezar a diseñar o implementar la fase de monitoreo, se deben responder las siguientes preguntas (Usher, 1991):

- + **¿Cuál es el propósito del monitoreo?** (definir las necesidades y, consecuentemente, la frecuencia e intensidad del monitoreo)
- + **¿Qué métodos utilizar?** (medir el avance hacia los objetivos)
- + **¿Qué análisis realizar con la información que se obtiene?** (definir qué características tendrán los datos y cómo se deben manejar)
- + **¿Cómo interpretar los datos?** (conocer el significado que tendrá la información obtenida)
- + **¿Cuándo se han cumplido los objetivos del monitoreo?** (determinar cuándo se debe detener el monitoreo)

Los requisitos para un programa de monitoreo exitoso se resumen en: 1) formulación de preguntas de investigación relevantes previo al inicio del programa de monitoreo; 2) diseño experimental estadísticamente válido; 3) desarrollo detallado de protocolos metodológicos que permiten una buena calidad de recolección de datos en campo y su posterior manejo y almacenamiento de datos; 4) fomentar una buena red colaborativa de investigadores, manejadores y tomadores de

decisión; 5) garantizar el acceso a fuentes confiables de financiamiento, y 6) lograr una buena coordinación y liderazgo (Cuesta y Becerra, 2012). En el Capítulo 5, Generalidades del monitoreo participativo y su aplicación en la restauración ecológica, se amplía la explicación de las características del monitoreo.

El monitoreo o evaluación y seguimiento se aplica en varias actividades del manejo, conservación y restauración de ecosistemas tanto en el aspecto natural como social. El monitoreo de ecosistemas en diferentes escenarios sentó las bases para el monitoreo de la restauración ecológica, pues el conocimiento de la estructura y función de un ecosistema es la base para el manejo y la práctica de la restauración ecológica.

### El monitoreo en la restauración ecológica

El monitoreo es quizá una de las fases más importantes en los proyectos de restauración (Figura 19), ya que busca recopilar información necesaria para evaluar el desempeño de las acciones implementadas respecto al

alcance de las metas y objetivos inicialmente planteados y, de esta manera, tomar decisiones pertinentes para ajustar la estrategia de restauración y así incrementar las posibilidades de éxito (SER, 2004). Estos ajustes realizados a partir de la información recopilada en el monitoreo se denominan *manejo adaptativo* y permiten la corrección de las acciones de restauración para encaminarse al cumplimiento de las metas y objetivos.

Un monitoreo efectivo se entiende como un proceso que acompaña a la restauración ecológica desde el diagnóstico, continúa durante la implementación de las acciones de restauración y finaliza solo hasta que sean alcanzadas todas las metas y el objetivo de restauración, los cuales deben aproximarse a una trayectoria donde el ecosistema haya recuperado su integridad socioecológica (Holl y Cairns, 2002). La importancia del monitoreo en la restauración ecológica se resume en la Tabla 3.



**Tabla 3.** Importancia del monitoreo en los procesos de restauración ecológica.

Ecológica	Socioeconómica	Gestión
Valida técnicas o estrategias de restauración, retroalimentando la construcción de conocimiento técnico y práctico sobre restauración ecológica en diferentes tipos de ecosistemas (Duarte et al., 2017).	Permite optimizar los recursos mediante un manejo adaptativo para el cumplimiento de los objetivos.	Contribuye con la planificación y el planteamiento de metas futuras.
Determina si se va en la trayectoria deseada o si se requiere tomar medidas para mejorar su efectividad (Aguilar-Garavito et al., 2017).	Evaluar los resultados faculta un cambio de actitud en relación al uso y gestión sostenible de los recursos naturales (Duarte et al., 2017).	Brinda transparencia y claridad en la rendición de cuentas, generando confianza entre los actores (Aguilar Garavito et al., 2017).
Permite evaluar: cuánto ha cambiado el sistema con respecto a su condición inicial y si ha cambiado en la dirección esperada hacia unas metas y objetivos propuestos (Ferraro y Pattanayak, 2006 en Murcia et al., 2015).	Permite reconocer el mejoramiento de los servicios ecosistémicos como beneficio colectivo.	Es una forma de asegurar apoyo y financiación, ya que demuestra la eficiencia, efectividad e impacto de los proyectos.
	Cuando se hace de manera participativa, genera sentido de apropiación e ingresos dentro de las comunidades. Esto garantiza la continuidad del proceso.	Permite controlar, durante la implementación del proyecto, que la inversión se haya hecho de la forma planificada en monto y tiempo (Murcia et al., 2015).
		Provee información sobre el costo-beneficio de la implementación de los proyectos de restauración y estima la eficiencia de la inversión; esto es clave para la toma de decisiones (Ramírez et al., 2015).



**Cuadro 2.** Incluir el monitoreo en los procesos de restauración ecológica y destinar los recursos suficientes para su desarrollo dará mayor validez a dicho proceso. El monitoreo evalúa y hace seguimiento a todo el proceso de restauración ecológica y también pretende que dicho proceso esté en una mejora continua mediante el manejo adaptativo, hasta que se alcancen las metas y objetivos de restauración.

Elaborar y desarrollar el monitoreo para corroborar el cumplimiento de las metas de restauración es una manera de optimizar los recursos al reducir los costos de oportunidad o al brindar información oportuna para realizar el manejo adaptativo necesario, a su vez contribuye con una mejor planificación de futuros proyectos de restauración (Pacto, 2013). Además, el monitoreo aporta una gran cantidad de información práctica al documentar la experiencia de restauración en el tiempo –generación de conocimiento– y contribuye con la verificación del al-

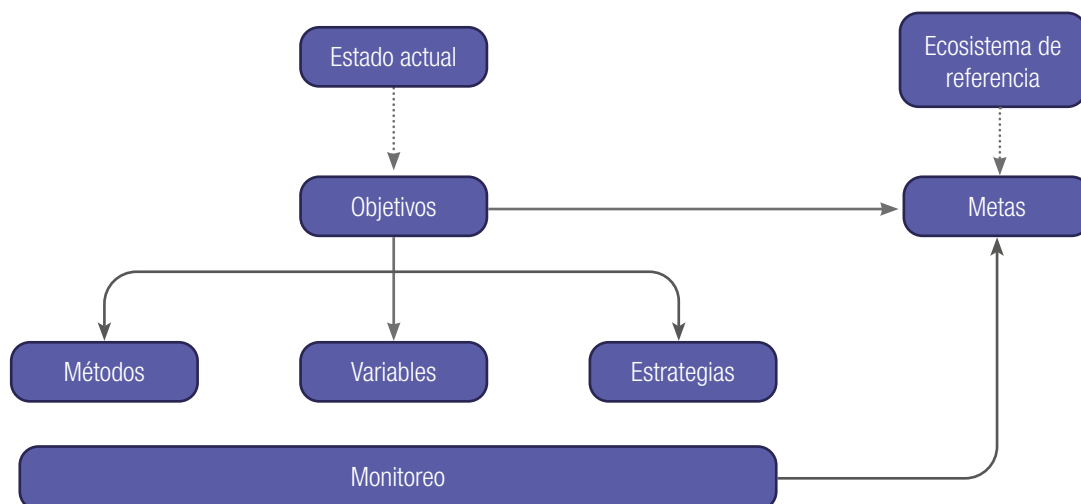
cance de las metas –de corto, mediano y largo plazo– y objetivos de restauración.

A pesar de la importancia que representa esta herramienta, se ha identificado como una de las debilidades más grandes que tienen los proyectos de restauración desarrollados en Colombia (Murcia y Guariguata, 2014), ya que es una fase poco incluida durante la ejecución de los proyectos de restauración; incluso, en los casos donde se realiza, este no evalúa realmente si se cumplieron las metas planteadas o raramente incluye una cuantificación de cambios en estructura y función del ecosistema. En muchos procesos de restauración el monitoreo solo se menciona como un requisito a cumplir dentro del mismo, y no como un procedimiento de retroalimentación y ajuste (Cuadro 2). En esos casos la evaluación es ineficiente y no necesariamente genera información conducente al establecimiento del éxito del proyecto, a la reflexión, o a ajustes de manejo adaptativo (Vargas y Velasco, 2011), tal como se esperaría de un proceso de restauración ecológica.

Emprender un proceso de restauración ecológica requiere considerar elementos básicos y específicos de cada sitio a restaurar. Vargas (2011) propone 13 pasos fundamentales, los primeros siete aluden a la definición del ecosistema de referencia y la evaluación de la zona a restaurar que incluye: determinar el potencial de regeneración y de la participación comunitaria; identificar los tensionantes, limitantes o barreras a la restauración;



**Figura 20.** La formulación de objetivos para el cumplimiento de las metas. Fuente: Elaboración propia.





y definir las escalas y niveles de organización a abordar, estos aspectos son determinantes para establecer los objetivos y metas del proyecto.

En los procesos de restauración ecológica se pretende alcanzar un objetivo de restauración a través del cumplimiento de unas metas con variables y medidas puntuales; estas metas reflejan los atributos encontrados en el ecosistema de referencia y constituyen un estado ideal, que probablemente se alcance si se cumplen los objetivos propuestos (SER, 2004). En consecuencia, las metas y los objetivos deben estar claramente planteados antes de diseñar e implementar las estrategias o acciones de restauración (Figura 20).

Para plantear los objetivos y metas en un proyecto de restauración es necesario considerar el grado de resiliencia y transformación del espacio a restaurar –relacionado con el tipo, frecuencia y magnitud del disturbio–, por esto, en el diagnóstico de restauración se evalúa la regeneración natural, la historia de uso y transformación del ecosistema, así como el contexto biofísico y socioeconómico actual del paisaje, lo que conduce a conocer el potencial de regeneración (Holl y Aide, 2010; Vargas, 2011).

Esta información, junto con el objetivo de restauración, permite definir las acciones de restauración más adecuadas al contexto socioambiental y a los recursos disponibles. De igual forma, contribuye a la definición de las metas de restauración y de los métodos e indicadores utilizados en el programa de monitoreo (Cuadro 3). Es en este punto es donde se debe asegurar que haya concordancia entre los objetivos del proyecto de restauración y el diseño del monitoreo (Korb et al., 2003). Para ejecutar el monitoreo en un proceso de restauración ecológica, además de los objetivos y metas es indispensable elegir variables indicadoras. En el Capítulo 4, se explica cómo diseñar y seleccionar objetivos, metas e indicadores para el desarrollo del monitoreo en un proceso de restauración, y en el Capítulo 5 se presenta una guía para implementar el monitoreo a la restauración de manera participativa.

## Escalas y fases

Es importante tener en cuenta que los resultados de un proceso de restauración ecológica se dan en una escala espaciotemporal amplia, que incluso puede



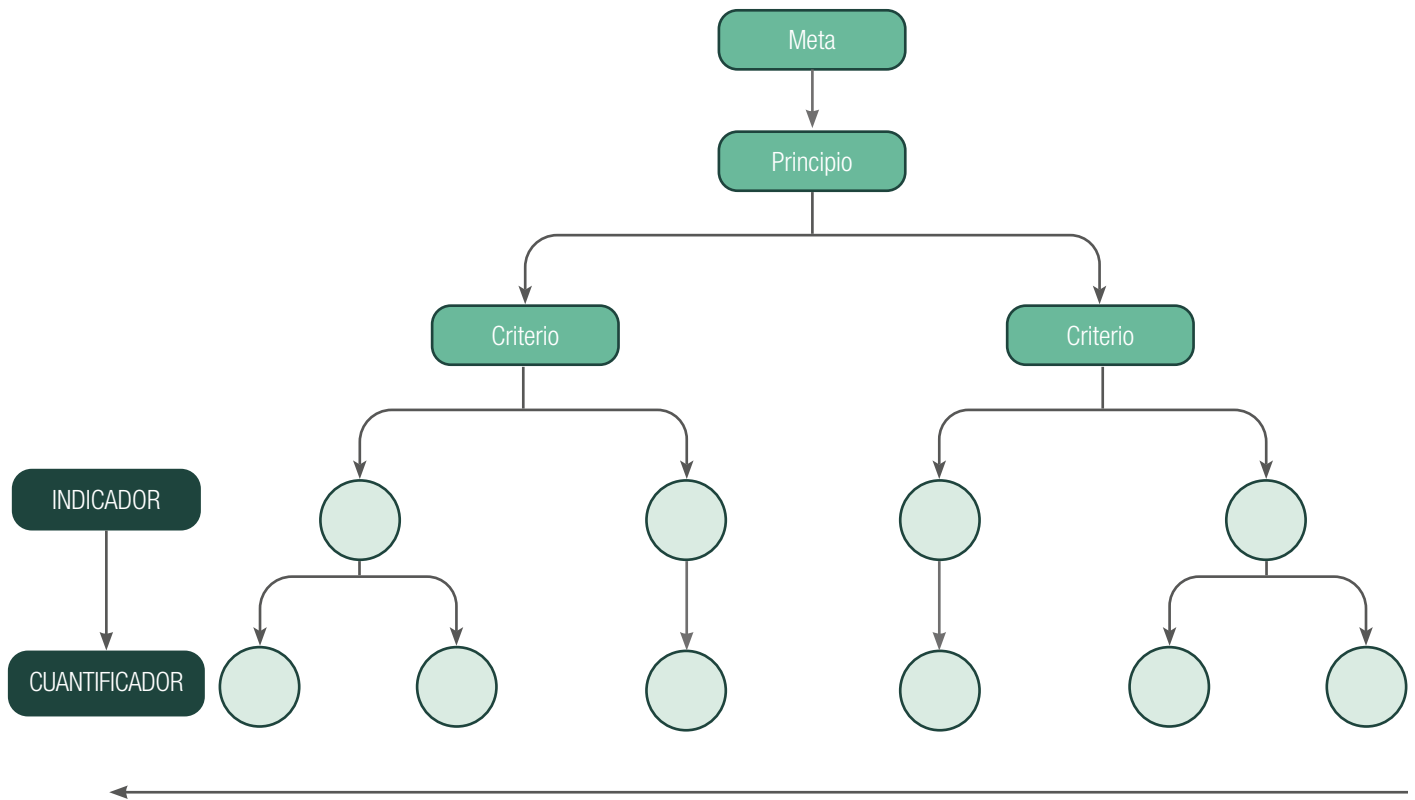
**Cuadro 3.** Recomendaciones para fortalecer los procesos de restauración desde el monitoreo de acuerdo con Ramírez et al. (2015):

1. Incluir el monitoreo desde el inicio del proceso de restauración
2. Formular objetivos que correspondan con los indicadores planteados
3. Formular metas claras y cuantificables
4. Establecer las condiciones iniciales y de control del área a restaurar
5. Seleccionar una amplia batería de indicadores que incluyan aspectos biofísicos, socioeconómicos y de gestión, y que además sean coherentes con los objetivos y metas previamente planteadas
6. Integrar a la comunidad en el monitoreo (monitoreo participativo)
7. Realizar el monitoreo de implementación y efectividad.

superar la duración contractual de un proyecto puntual, y que se expresan en distintas escalas espaciales –desde parcelas hasta paisajes–. Por tanto, dichas escalas deben determinarse para guiar la selección de las metas e indicadores que permitan evaluar adecuadamente los resultados en dichas dimensiones espaciotemporales.

En cuanto a las escalas temporales existen dos momentos relevantes del monitoreo en restauración ecológica: 1) **monitoreo de implementación** (gestión), y 2) **monitoreo de efectividad** o de impacto (ecológico) (Block et al., 2001).

El **monitoreo de implementación** busca evaluar si los tratamientos de restauración se llevaron a cabo tal como fueron diseñados, teniendo en cuenta las especificaciones del diseño y cuantificando los cambios iniciales que ocurren inmediatamente después de la implementación. Esta evaluación a la gestión y de los primeros cambios en el ecosistema objeto de restauración permite determinar tres aspectos: a) comprobar



**Figura 21.** Orden jerarquizado para el planteamiento de las metas, principios y criterios en un proceso de monitoreo. Modificado de Lammerts y Blom (1997).

que todas las acciones de restauración se establecieron tal como fueron diseñadas; b) verificar la estructura y composición que se obtuvo luego de la implementación, y c) identificar lugares donde se deban ajustar inmediatamente las acciones de restauración, por ejemplo, cambio de especies vegetales seleccionadas, hacer replantes, cerramientos, enmiendas, riego, control de especies invasoras, entre otras.

Con el **monitoreo de efectividad** se determina el nivel de alcance de metas y el cumplimiento del objetivo último de la restauración, evaluando y siguiendo en el tiempo los cambios en los indicadores socioeconómicos como ecosistémicos –estructura, composición y función–. Este monitoreo involucra escalas espacio-temporales superiores al de implementación y permite definir el manejo adaptativo (Vargas et al., 2012). A partir del Capítulo 6, se presentan algunas plataformas e indicadores que se recomienda usar para el monitoreo a la restauración del páramo involucrando aspectos biofísicos y socioeconómicos.

### Bases para el diseño del monitoreo en restauración ecológica

El monitoreo se basa en el estándar internacional de monitoreo de la biodiversidad y de gestión territorial: principios, criterios e indicadores (Lammerts et al., 1997; Godoy, 2017) que para el caso de la restauración se articulan además con las metas y objetivos de restauración. Dicho estándar consiste en una estructura de pensamiento jerarquizada que permite acceder de manera ordenada y lógica a un sistema complejo, disgregarlo y analizarlo mediante relaciones causales (Lammerts y Bloom, 1997; Moran et al., 2006).

Los elementos jerárquicos presentan diferentes niveles: objetivos, metas, principios, criterios, indicadores y cuantificadores o métricas (Lammerts y Blom, 1997, Aguilar-Garavito y Ramírez, 2015) (Figura 21), los cuales deben ser coherentes entre los diferentes niveles y al interior de cada uno de ellos; para lograr dicha coherencia es necesario que se cumplan con los atributos descritos en el Cuadro 4 para los indicadores y métricas, así como las consideraciones expuestas en el Capítulo 4, donde se definen y explica cómo seleccionar los objetivos y metas de restauración, en

el Cuadro 5 de la siguiente página se presentan las características básicas de un proceso de monitoreo eficiente. A continuación, se definen los elementos jerárquicos del monitoreo en restauración ecológica:

- + **Principios:** dentro del contexto de la restauración ecológica, los principios proporcionan la estructura conceptual primaria para el monitoreo. En restauración ecológica se reconocen los siguientes: biofísico, social y gestión.
- + **Criterios:** proporcionan significado y funcionalidad a los principios sin ser una medida de rendimiento directa, ya que representan aspectos generales del ecosistema; por ejemplo, la estructura, la composición, los factores de degradación, las interacciones entre organismos.
- + **Indicadores:** son variables que se utilizan para evaluar la condición de un criterio específico. Los indicadores deben transmitir información; por ejemplo, el porcentaje de cobertura, la altura de los individuos, número o porcentaje de especies nativas o exóticas.
- + **Métricas o cuantificadores:** son los métodos para verificar, medir o evaluar un indicador; por ejemplo, el conteo de especies, o los análisis de suelos y sus correspondientes unidades.

### Principios para el monitoreo de restauración en el páramo

La restauración ecológica como disciplina integra una diversidad de aspectos que incluyen los biológicos, socioculturales, económicos y políticos (Clewell y Aronson, 2013). Estos principios proporcionan una estructura conceptual primaria para los proyectos de restauración y, por ende, para su monitoreo.

La degradación o transformación de los ecosistemas en el páramo está motivada por problemas sociales, económicos o políticos, y tiene manifestaciones en el ecosistema. Por lo tanto, es importante enfocar la formulación de las estrategias de restauración de forma holística, teniendo en cuenta los diferentes frentes, para asegurarse que se corrijan tanto las manifestaciones del problema como sus motores principales; de lo contrario, es posible que el proyecto no sea sostenible a mediano o largo plazo (Clewell y Aronson, 2013).



**Cuadro 4.** Atributos para la selección de criterios e indicadores de acuerdo con Chaverri y Herrera (1996).

- **Claridad:** comprendidos fácilmente en niveles públicos, políticos y técnicos.
- **Solidez científica:** basados en la investigación y en la experiencia científica.
- **Aplicabilidad:** pueden utilizarse y medirse con facilidad utilizando la tecnología disponible, por lo que obtenerlos no requiere arduo trabajo ni, por lo tanto, costos altos. Para esto se debe evaluar el costo-beneficio de la inversión (tiempo, insumos) e información recopilada.
- **Flexibilidad:** pueden emplearse en varios tipos de ecosistemas.
- **Pertinencia:** relevantes respecto a los componentes que definen el manejo ecosistémico.
- **Relación en forma directa con la meta de evaluación:** cada indicador debe estar directamente relacionado con el criterio, y cada criterio con el respectivo principio.
- **Definido en forma precisa:** la redacción en la definición debe ser simple y clara.
- **Especificidad en el diagnóstico:** como sea posible, los indicadores deben proveer información que permita una interpretación directa del significado del criterio.
- **Fácil de detectar, medir recolectar e interpretar:** deben seleccionarse de tal forma que no resulten en costos altos, contribuyendo a aumentar su efectividad respecto al costo de obtener la información.
- **Confiabilidad:** las técnicas o métodos necesarios para conseguir la información deben ser lo suficientemente confiables, indicativos y repetibles.
- **Sensibles a cambios en el manejo y a los elementos ecológicos o sociales:** deben proveer información bajo diferentes condiciones.
- **Proveer una medida integral en el espacio o el tiempo:** el indicador debe proveer la mayor cantidad de información acerca del sistema que se está evaluando, integrándola en una sola afirmación.
- **Atractivo e interés para los usuarios:** reconocer la importancia de las preferencias de los usuarios en determinar el grado de aceptación de los criterios e indicadores.



**Cuadro 5.** Características de un monitoreo eficiente (Aguirre y Torres, 2013):

- Los datos recopilados y los resultados deben ser acumulativos y estar disponibles para futuras experiencias de restauración.
- La eficiencia de los datos tomados debe ser maximizada y los costos minimizados para garantizar un menor esfuerzo de muestreo.
- El monitoreo debe realizarse a diferentes escalas que correspondan con los objetivos propuestos.
- Se deben seleccionar atributos que puedan ser monitoreados, los cuales permitan tener datos en mediciones repetidas en el tiempo.
- Los protocolos de seguimiento y toma de datos deben ser claramente delineados para que puedan tener continuidad.
- El monitoreo de eficiencia deben ser capaz de detectar cambios, por lo que los mejores indicadores son aquellos que están en estrecha relación con el objetivo de restauración.

**Principio biofísico:**

La restauración ecológica pretende una incidencia directa sobre los atributos de los ecosistemas, por lo que el monitoreo debe dar cuenta de los cambios que se generan después de implementar las acciones. El monitoreo, como componente esencial para legitimar el éxito de las acciones de restauración, es una etapa esencial para validar las acciones y los métodos empleados, así como identificar si el área está siguiendo la trayectoria formulada en los modelos (Pacto, 2013). Los parámetros que se incluyen en este principio generalmente son relativos a la funcionalidad.

Cuando existe una escasa evaluación y seguimiento a las actividades de restauración y no hay coherencia entre los objetivos planteados, se propicia la selección inadecuada de los indicadores acordes con las escalas espacio temporales y la falta de rigor

en la toma de datos y registros (Block et al., 2001), al igual que la tendencia a repetir las estrategias de otras experiencias sin analizar los resultados obtenidos en cuanto a efectividad (Clewell et al., 2000). Esto hace que se disminuyan las posibilidades de realizar un aporte críticamente objetivo en cuanto al éxito o fracaso de las acciones realizadas (Machmer y Steeger, 2002).

Como se ha mencionado, en los procesos de restauración ecológica es muy importante seguir los cambios que presentan los ecosistemas luego de haber implementado las acciones de restauración, ya que permite validar la eficiencia y efectividad de las distintas acciones de restauración, así como verificar si realmente se logró o no el restablecimiento del área alterada de acuerdo con el cumplimiento de los objetivos y metas (Reay y Norton, 1999; Block et al., 2001; Korb et al., 2003). Unido a esto, los resultados de monitoreo permiten identificar las acciones con una mejor relación costo-efectividad facilitando la identificación de acciones para los distintos tipos de áreas disturbadas, áreas a restaurar, aumentando de esta manera las oportunidades de éxito en procesos que ya se están ejecutando o que se encuentran en etapa de planificación.

La identificación del ecosistema de referencia no es un requisito estricto en restauración ecológica, sin embargo definirlo otorga mayor claridad metodológica para abordar el monitoreo, permite establecer metas reales, así como indicadores y cuantificadores más concretos. Esto facilita las comparaciones entre el sistema de referencia y el sistema en proceso de restauración en cada etapa del proceso (Clewell y Aronson, 2013; Balaguer et al., 2014), o verificar en qué medida las metas de restauración están alcanzando el objetivo, sin que necesariamente se considere el retorno a las características prístinas del ecosistema de referencia.

En el principio biofísico es clave determinar que el ecosistema de páramo –por las características dadas por sus orígenes geológicos, posición orográfica y aspectos climáticos– presenta condiciones que hacen que los procesos de sucesión y regeneración en los páramos sean lentos, esto es una determinante importante para la formulación de las acciones de restauración y el programa de monitoreo, ya que deben contemplar amplios plazos tanto en la implementación como en la evaluación y seguimiento.

**Principio socioeconómico:**

Los páramos tienen una larga historia de ocupación humana y son escenarios dinámicos de cambio en el uso de la tierra, especialmente en las zonas de transición entre bosques y páramos (Llambí, 2018). Los páramos en Colombia se componen de un paisaje cultural y social, donde deben incluirse las diferentes visiones y concepciones de los actores que lo habitan y lo transforman, incluyendo las acciones que generan tensión, de forma que se mire con integralidad no solo el espacio ecosistémico, sino sus interacciones con la gente, la historia de uso y su ambiente, y sus capacidades de transformación a diferentes escalas –individuo, familia, comunidad, gobierno local–.

El concepto inicial de la restauración es el restablecimiento de la estructura y la funcionalidad de un ecosistema prístino, o de las condiciones que se presentaban antes de los disturbios (SER, 2004). No obstante, debido a que la intervención humana ha sido tan intensa y prolongada que los ecosistemas de referencia necesariamente se debe integrar el componente antrópico. Tal es el caso de los agroecosistemas o ecosistemas culturales donde las condiciones físicas y bióticas han cambiado a lo largo del tiempo y lo continuarán haciendo a futuro (Benayas et al., 2017). Esto abre paso a una conceptualización de la restauración con un mirada más amplia y pragmática, cuyos objetivos son la optimización de la biodiversidad, los procesos ecológicos y la provisión de servicios dentro de un marco ecológico, socioeconómico y cultural (Higgs et al., 2014).

Generalmente los resultados de las acciones de restauración están fuertemente influenciadas y condicionadas por las características culturales, sociales y económicas de las comunidades de las áreas circundantes –p. ej. uso del suelo y territorio, dinámicas poblacionales y relaciones con la naturaleza– razón por la cual esta dimensión es un elemento esencial, los parámetros que se incluyen en este principio se relacionan con la continuidad a largo plazo de la restauración (De Campos y Finegan, 2002).

En los páramos de Colombia confluyen diferentes actores, como comunidades indígenas y campesinas, organizaciones e instituciones de carácter estatal o privados. En este mismo contexto, los objetivos del proyecto pueden estar enfocados a la par en la restauración de algunos elementos de la estructura y función del ecosis-

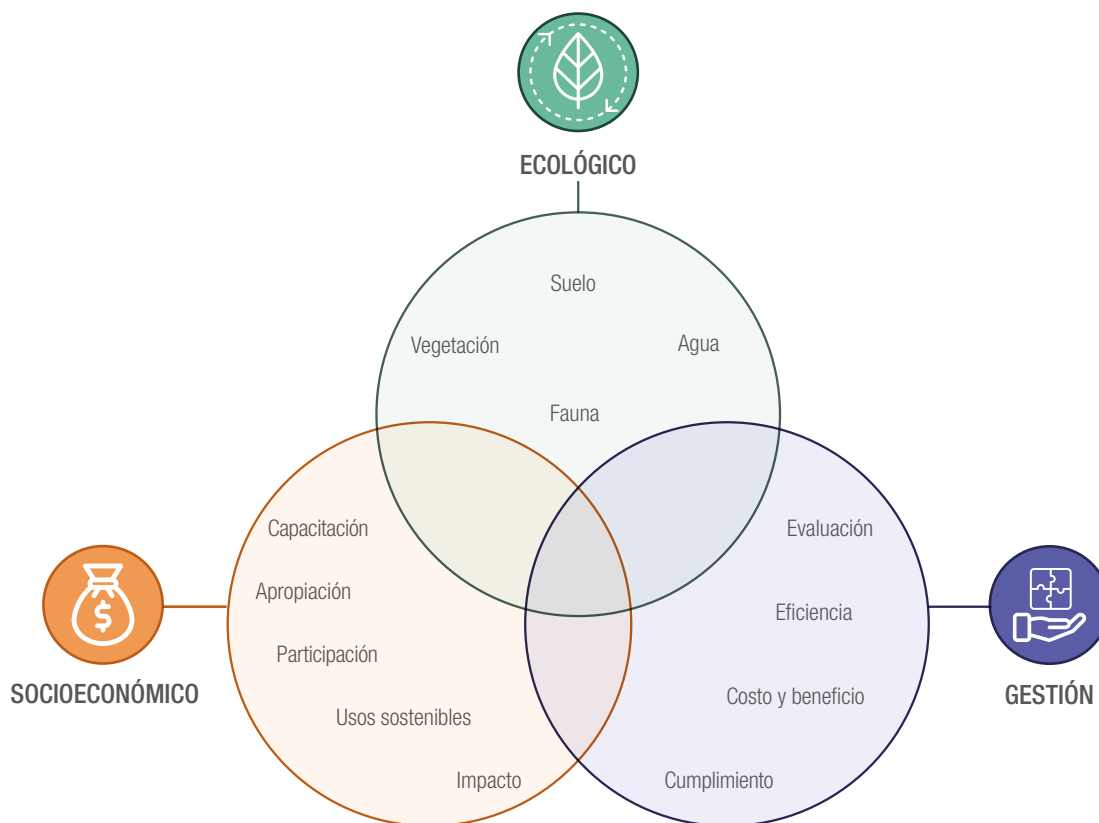
tema original junto con el aprovechamiento de productividad de la tierra de manera sustentable, con el fin ya sea de ofrecer productos que generen bienes económicos a la población local, llamado también “restauración productiva” (Ceccon, 2013) o rehabilitación ecológica.

Aunque el fundamento de la recuperación del “capital natural” sea una motivación para la restauración (Aronson et al., 2006; Clewell y Aronson, 2013), se requiere de un gran esfuerzo, compromiso e intervención de las comunidades locales en la realización de los proyectos, así como para el mantenimiento de las acciones y conservación (Lindig-Cisneros, 2011). Por tanto, es importante definir los principales objetivos de los esfuerzos de restauración, para establecer el enfoque adecuado del trabajo con las comunidades locales (Ceccon, 2013). Es claro que el éxito de la restauración dependerá del nivel de apropiación, significancia y relevancia de la comunidad hacia el proyecto.

Adicionalmente, von Bertrab y Zambrano (2010) exponen que el diseño, implementación y evaluación de proyectos de conservación y restauración implican la participación de grupos locales y actores externos –donantes, científicos, técnicos de campo y funcionarios del gobierno–. Esta participación conjunta es un reto, pues implica la comprensión de las estrategias de vida locales y las prioridades de los grupos de interés, y proporciona un conjunto de prácticas y herramientas que permiten la integración de intereses, necesidades y prioridades en el diseño de intervenciones. El monitoreo participativo es un método flexible que puede combinar varias herramientas de investigación de las ciencias sociales para determinar el éxito de los objetivos que los participantes quieren lograr (véase Capítulo 5).

**Principio de gestión**

Los proyectos de restauración ecológica deben contar con un mecanismo que evalúe si se han realizado las actividades de acuerdo con el plan preestablecido, y que mida la eficiencia en el uso de los recursos (Murcia et al., 2015). La dimensión de gestión busca garantizar la planificación, la evaluación, el control y la documentación adecuados, permitiendo una buena ejecución y, al mismo tiempo, la preservación de la memoria del respectivo programa de restauración (Pacto, 2013). Los parámetros que aquí se incluyen se relacionan con la viabilidad del proyecto (De Campos y Finegan, 2002).



**Figura 22.** Principios y plataformas a considerar en un plan de monitoreo en proyectos de restauración. Fuente: Elaboración propia.

Por ejemplo, la evaluación de la gestión puede incluir medidas para determinar si se realizaron todas las actividades u obras previstas y la supervivencia de las plantas (Murcia et al., 2014), las cuales son fundamentales para demostrar transparencia y eficiencia en el uso de recursos, y así satisfacer a los entes de financiación y garantizar la credibilidad de la disciplina. Otro ejemplo puede ser si se incluye información sobre el uso histórico de las áreas y métodos de restauración utilizados, mediante registros fotográficos, cálculo de costos, actividades de control y vigilancia, ejercicio de autoridad, y otros datos que permitan rescatar las posibles causas de éxito o fracaso de las iniciativas de restauración (Pacto, 2013).

Con la documentación de esta información, se hace posible replicar iniciativas e innovaciones exitosas y eliminar o reevaluar prácticas que generaron resultados insatisfactorios en los programas evaluados, a su vez

puede ayudar a identificar fallas en la gestión de las diversas etapas y actividades que componen un programa de restauración.

Dentro de los tres principios definidos: biofísico (ecológico), socioeconómico y de gestión, se encuentran las plataformas de monitoreo, sobre las cuales se formulan los criterios e indicadores de monitoreo que permiten conocer el avance de la restauración en diferentes ámbitos (Figura 22).

### Manejo adaptativo en la restauración de páramos

Se considera que se ha alcanzado un “estado restaurado” cuando los atributos del ecosistema están en una trayectoria segura próxima al objetivo de restauración de acuerdo con las metas de corto, mediano y largo plazo, o a su referencia ecológica previamente establecida, sin la necesidad de futuras intervenciones además de la protección y mantenimiento (SERA, 2017). A continuación, se presentan algunos atributos de acuerdo con SER (2004):

- ⊕ Presencia de un conjunto de especies –fauna o flora– características del ecosistema de referencia.
- ⊕ Presencia de todos los grupos funcionales necesarios para el desarrollo y estabilidad del ecosistema.
- ⊕ Presenta un ambiente físico que puede sostener poblaciones reproductivas de las especies necesarias para el mantenimiento de la funcionalidad a lo largo del tiempo, priorizando comunidades vegetales dispersoras y recicladoras.
- ⊕ Presenta un funcionamiento ecosistémico adecuado para el estadio de desarrollo del área –ciclaje de nutrientes, control biológico, entre otros– sin señales de disfunción.
- ⊕ El ecosistema restaurado se integra con el paisaje a través de intercambios bióticos y abióticos.
- ⊕ Se han eliminado o reducido las barreras para la restauración y el mantenimiento de la salud ecosistémica.
- ⊕ El ecosistema restaurado es resiliente y resistente frente las perturbaciones normales y periódicas del ambiente natural.
- ⊕ El ecosistema restaurado es autosostenible, puede persistir bajo las condiciones ambientales existentes.
- ⊕ Se restablecen las relaciones sociedad-ecosistema.

Determinar cuándo se alcanza este estado requiere, además del monitoreo, un manejo adaptativo, este último entendido como los correctivos que se deben implementar en los casos que el monitoreo reporte que el sistema en proceso de restauración se está desviando de la trayectoria deseada (Basto et al., 2018).

Este aspecto es fundamental y debe ser incorporado de manera cíclica en los procesos de restauración ecológica como parte del reconocimiento de la incertidumbre inherente en el manejo de recursos biológicos (González et al., 2015). Se realiza mediante un proceso de aprendizaje permanente y la planeación de actividades, la cual es retroalimentada mediante el monitoreo de resultados.

El manejo adaptativo es la integración de diseño, manejo y monitoreo para probar sistemáticamente ciertos supuestos y así lograr adaptación y aprendizaje (Salafsky et al., 2001). Por tanto, para que el manejo adaptativo sea efectivo requiere:

- ⊕ Tener claros los objetivos, metas y propósitos a alcanzar en los diferentes tiempos, así como los umbrales.

- ⊕ Realizar evaluaciones periódicas de la trayectoria deseada, propósitos, metas u objetivos a alcanzar.
- ⊕ Más allá de comprender cuáles acciones funcionan y cuáles no, debe haber entendimiento del porqué (análisis de datos).
- ⊕ A partir de este entendimiento, determinar los aspectos que deben ser mitigados o corregidos –especies seleccionadas, densidad de siembra, enmiendas, protección contra herbivoría, entre otros–.
- ⊕ Actuar de manera inmediata para mejorar el proyecto con base en los resultados del monitoreo: diseñar e implementar nuevas acciones o corregir y complementar las acciones ya establecidas.
- ⊕ Ajustar o seleccionar nuevos indicadores y continuar con el monitoreo.
- ⊕ Documentar y divulgar el proceso, así como los resultados logrados y las lecciones aprendidas.

El manejo adaptativo es determinante para el éxito de la restauración, ya que permite implementar los correctivos necesarios –implementando nuevas acciones de restauración o mejorando las ya establecidas– detectados en el monitoreo para poder retomar la trayectoria hacia las metas y objetivos. Sin embargo, la incertidumbre en las respuestas de los ecosistemas a las acciones de restauración es muy alta, por lo que es necesario aprender sistemáticamente de los éxitos y fracasos.

La mayoría de los proyectos de restauración requieren de manejo adaptativo, razón por la cual este aspecto debe ser considerado en el presupuesto y el cronograma del proyecto. Solo con el monitoreo será posible determinar cuándo es requerido y en qué condiciones.

### Instrumentos para presentación de resultados

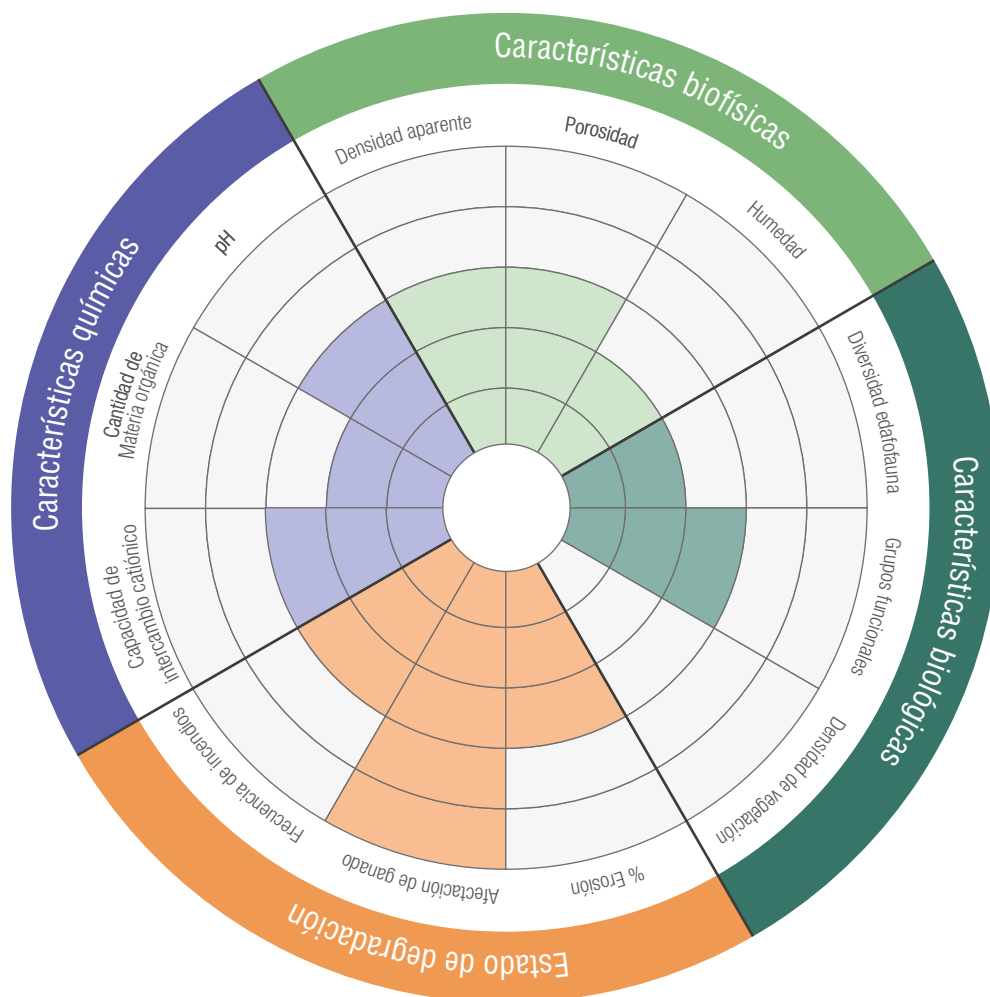
Una presentación efectiva de los resultados del monitoreo a las partes interesadas es tan importante como la recolección de los datos, por esto en el Capítulo 10 se señalan algunas alternativas para el tratamiento y análisis de datos. En este capítulo se resalta la importancia de algunas herramientas para la presentación de datos al público interesado en el proceso de restauración basado en análisis más claros y robustos. Una herramienta puede ser la visualización de resultados basada en un semáforo –con indicadores simples de color verde,

amarillo y rojo—, esta funciona para mostrar si los indicadores y metas han alcanzado el éxito, están encaminadas en la dirección correcta o requieren atención. Otra herramienta utilizada para presentar los resultados de monitoreo es la “rueda del progreso” (Figura 23) que ilustra hasta qué punto una iniciativa de restauración está logrando los objetivos acordados durante el diseño del proyecto en un periodo de tiempo específico, los indicadores de progreso se evalúan y se sombreen a medida que se alcanzan, en una escala de 1 (bajo) a 5 (logro completo) (Evans y Guariguata, 2017) (Figura 23). Ambas herramientas se presentan de acuerdo con los umbrales y la temporalidad establecida que deben ser alcanzados en un ecosistema restaurado, de acuerdo con las metas –corto, mediano o largo plazo– y objetivos de restauración preestablecidos.

## Conclusiones

El diseño de un proyecto de restauración ecológica debe vislumbrarse como un sistema cíclico que involucre el monitoreo y el manejo adaptativo como parte de mejora continua del proceso y con la posibilidad de detectar cambios en las trayectorias deseadas y hacer los correctivos necesarios en el momento apropiado.

Finalmente, el monitoreo es una herramienta indispensable que permite además de evidenciar los cambios en los ecosistemas y el éxito de la restauración, optimizar los recursos y evitar fugas presupuestales. Por su parte, el manejo adaptativo es posible solamente si se obtiene información pertinente, y a tiempo, relacionada con la necesidad de correctivos que permitan alcanzar los objetivos propuestos.



**Figura 23.** Ejemplo de la rueda del progreso. Modificada de SERA (2017).



# CAPÍTULO 04

---

# Lineamientos para la selección de objetivos, metas e indicadores para el monitoreo en procesos de restauración del páramo andino

- ⊕ Bases conceptuales
- ⊕ Relación entre Objetivos-Metas-Indicadores-VARIABLES
- ⊕ Marcos de referencia para interpretación de los indicadores
- ⊕ Recomendaciones
- ⊕ Conclusiones



El planteamiento de objetivos y metas es lo primero que se realiza al plantear un proceso de restauración ecológica. Estos deben ser lo suficientemente claros, específicos y medibles para que sean útiles, no solo para el planteamiento del proceso, sino para su implementación, evaluación y seguimiento. El tiempo invertido en el planteamiento claro de objetivos y metas será retribuido en la claridad con que se implementa el proceso de restauración, la facilidad de seguimiento al mismo y la capacidad de generar procesos adaptativos para ajustar las actividades y lograr los resultados esperados.



**Cuadro 6.** A lo largo del capítulo se utilizará el siguiente ejemplo para abordar cada sección. En el anexo 2 se presenta con mayor detalle el caso tratado.

**Problemática:** la cuenca alta del río Blanco posee una gran cantidad de humedales que se encuentran muy deteriorados debido al aumento en la cobertura de especies invasoras y a que el ganado pastorea en sus zonas de amortiguación. Esto ha llevado a una reducción en la cobertura vegetal nativa, en las poblaciones de aves acuáticas y en la calidad del agua. A pesar de que muchos habitantes tienen que traer agua del pueblo para consumo, no existe ninguna medida de conservación de los humedales.

**Objetivo general:** Mejorar la salud de los humedales de la cuenca alta del río Blanco (CARB).

**Objetivos específicos:**

- O1. Restaurar la cobertura vegetal de los humedales y sus áreas de amortiguación.
- O2. Restaurar los servicios ecosistémicos de provisión de hábitat para las aves acuáticas, y de agua potable para los habitantes de la CARB.
- O3. Mejorar la percepción que los habitantes de la CARB tienen acerca de la importancia de los humedales de alta montaña.

Los objetivos y metas son el norte para los planes, programas y proyectos, por lo tanto se deben tener presentes durante todo su desarrollo. Este capítulo presenta conceptos básicos sobre objetivos, metas, indicadores y el monitoreo de variables. Está escrito en forma de guía, buscando orientar al lector durante el diseño de programas de monitoreo asociados a procesos de restauración. Primero, se desarrolla un modelo conceptual para entender la relación entre los mismos. Luego, se dan lineamientos para la generación de objetivos y metas. Finalmente, se presenta un ejemplo de su implementación para la formulación de un programa de monitoreo.

## Bases conceptuales

### Objetivos:

Un objetivo es un enunciado que indica el propósito de su plan, programa o proyecto y lo que se pretende lograr. Los objetivos pueden ser generales o específicos. Un objetivo general indica el fin último de su proyecto y los objetivos específicos indican propósitos particulares que se relacionan con el general.

Hay que diferenciar el objetivo del proceso de restauración del objetivo de su programa de monitoreo. En esta sección se describen los objetivos y metas del proceso de restauración, asumiendo siempre que el objetivo general del programa de monitoreo es evaluar y seguir el cumplimiento, desempeño e impacto del proceso de restauración.

Los objetivos deben tener las siguientes características:

- ⊕ Estar enmarcados en objetivos globales y nacionales de biodiversidad.
- ⊕ Tener relación de manera positiva con objetivos de manejo y conservación regionales.
- ⊕ Enfocarse en lo que se debe lograr para solucionar un problema o mejorar una situación.
- ⊕ Ser relevantes e importantes para los actores involucrados o afectados en el proyecto.
- ⊕ Poder medirlos a través del planteamiento de metas e indicadores.
- ⊕ Iniciar con un verbo que indique la acción o propósito que se quiere lograr; luego enunciar el objeto,

atributo o situación sobre la cual se quiere efectuar dicha acción o propósito y, posteriormente, justificar el para qué se requiere dicha acción.

Cuando se están planteando los objetivos también es útil pensar en contestar las siguientes preguntas: ¿qué se quiere lograr con el proceso de restauración?, ¿cuál es el propósito de las acciones de restauración que pretenden implementar? Las respuestas a estas preguntas pueden abarcar muchas temáticas, por lo que es clave organizar las respuestas en objetivos específicos, que corresponden a las diferentes temáticas mencionadas en un objetivo general (Cuadro 6).

### Metas:

Son enunciados que indican el propósito del proyecto, se diferencian de los objetivos porque estas cuantifican los objetivos específicos y presentan una dimensión temporal de cuándo se pretende alcanzarlos.

Una vez los objetivos específicos estén definidos, es más fácil pensar en las metas a cumplir. Las metas deben tener las siguientes características:

- + Cuantificar la meta en unidades que puedan ser medidas en programas de evaluación y seguimiento.
- + Tener un límite de tiempo establecido en el que se debe cumplir la meta.
- + Responder al objetivo específico establecido, al comunicar la meta el receptor debe entender exactamente lo que pretende lograr y cómo lo va a lograr.
- + Ser alcanzable, puede ser ambiciosa pero debe ser posible y realista con base en las capacidades disponibles.
- + Puede existir más de una meta por objetivo.

Para definir las metas es necesario tener un diagnóstico de restauración y línea base, pues estos representan el estado en el que se encuentra la biodiversidad en el momento de iniciar su intervención o proyecto y los posibles sistemas de referencia. En ausencia de una línea base, las metas pueden ser generadas desde fuentes que evidencien las condiciones ambientales, sociales o económicas que conduzcan a alcanzar el propósito planteado en el objetivo (Clewell y Aronson, 2013) (Cuadro 7).



**Cuadro 7.** A partir del ejemplo, el objetivo específico O1 podría presentar las siguientes metas:

- M1. En dos años a partir del inicio del proyecto, haber cercado el 100 % del perímetro de las zonas de amortiguación de los humedales de la CARB.
- M2. En diez años a partir del inicio del proyecto, haber erradicado el 100 % de las plantas invasoras de los humedales de la CARB.
- M3. En diez años a partir del inicio del proyecto, conseguir un incremento sostenido de la tasa de reclutamiento para poblaciones de plantas nativas prioritarias.
- M4. En diez años a partir del inicio del proyecto, conseguir un aumento del porcentaje de cobertura de vegetación nativa al 80 %

La meta 1 es a corto plazo e indica que solo se considera como cumplida cuando se ha desarrollado la totalidad de la actividad. La meta 2 tiene un plazo mayor, pero nuevamente indica que se considera cumplida únicamente cuando se han erradicado todas las especies invasoras del lugar. En el caso de la meta 3, no hay una cantidad definida para el cumplimiento de la meta, pues puede darse el caso que la línea base para tasa de reclutamiento no existe y debe construirse durante el monitoreo. En casos como este es muy difícil saber qué tanto se va a poder aumentar un parámetro poblacional a partir de acciones de restauración, entonces se opta por una meta cualitativa que indica que la tendencia del parámetro debe ser permanecer igual o mejorar con el tiempo del proyecto. La meta 4 asume que se tiene una línea base cuantificando el porcentaje de cobertura de vegetación nativa y que es realista pensar que en diez años, dadas las acciones propuestas, esta aumente de su estado actual a un 80 % del área de estudio total.

### Indicadores:

Los indicadores son medidas que evalúan el avance logrado hacia el cumplimiento de la meta. Dada su relación con la meta y los objetivos, el indicador transmite información más allá del valor en sí mismo, toda vez que está inmerso en un contexto específico (Cuadro 8).

Las características de los buenos indicadores son:

- + Estar basados en datos verificables, es decir, en datos que se encuentren en repositorios de datos, debidamente documentados y que permitan recalcular el indicador si es necesario.
- + Ser reactivos a los cambios en la variable de interés, deben ser acordes con los objetivos y metas, y suficientemente sensibles para emitir una alerta del cambio.
- + Tener fácil comprensión y uso. Se debe entender la incertidumbre asociada a los datos o al análisis que permitió el cálculo del indicador. Para hacer uso del indicador se debe conocer la procedencia de los datos y sus limitaciones.
- + No deben emitir juicios sobre los resultados, es decir este no debe ser redactado con palabras como: incremento de, reducción de, mejora de entre otros, pues es justamente esta interpretación la que debe ser evidenciada por el cálculo del indicador y no ser una cualidad del indicador en sí mismo.
- + Puede existir más de un indicador por meta.

A continuación, se detallan tres aspectos clave sobre los indicadores: su viabilidad, los usuarios y el monitoreo de variables.

### **Viabilidad del indicador**

Para cada indicador se debe evaluar de manera general la viabilidad de desarrollarlo, para esto se recomienda evaluar cada indicador con respecto a:

- + Datos apropiados disponibles: ¿existen fuentes de datos para calcular el indicador?, ¿es viable producir los datos mediante monitoreo de las variables asociadas al indicador?
- + Expertos o instituciones para calcularlos: ¿existen expertos que estén en disponibilidad de calcular el indicador? De no ser así, ¿existe la posibilidad de crear capacidades para el cálculo del indicador?, ¿existen personas que estén en capacidad y disponibilidad para coleccionar los datos asociados al monitoreo de las variables?, ¿existe la posibilidad de crear capacidades o de implementar programas de ciencia ciudadana o participativa para la generación de datos?



**Cuadro 8.** Para la meta 1 del ejemplo anterior dos posibles indicadores pueden ser: el porcentaje de perímetro de los humedales que ya ha sido cercado (I1R) y la probabilidad de ocupación de ganado de los humedales (I1P). El primero mide qué tan bien va la implementación del proyecto y el segundo mide si esta implementación está teniendo el impacto deseado, asumiendo que a medida que aumenta el porcentaje del perímetro cercado, disminuye la probabilidad de ocupación del ganado en los humedales.

Para la meta 2, los indicadores podrían ser el número de campañas de erradicación por año (I2R) y la probabilidad de ocupación de plantas invasoras (I2P). Nuevamente, el primero mide la ejecución del proceso de restauración y el segundo su impacto esperado, asumiendo que a medida que aumenta el número de campañas de erradicación por año, disminuye la probabilidad de ocupación de especies invasoras.

Para la meta 3 podrían ser el número de plántulas sembradas por año (I3R) y la tasa de reclutamiento anual (I3E), sobre la primera se tiene control ya que corresponde a una medida de ejecución del proyecto, mientras que la segunda depende tanto de nuestras acciones –ya que asumimos que a medida que aumenta el número de plántulas sembradas por año, aumenta la tasa de reclutamiento anual– como de una infinidad de variables poblacionales y ambientales que no podemos controlar, por ejemplo, la cantidad de lluvia o sequía o características de la historia de vida de las especies como una alta mortalidad de los individuos en estadios tempranos de vida.

Para la meta 4 el indicador evidente es el porcentaje de cobertura de vegetación nativa (I4E) en la zona de estudio. Idealmente, esta se medirá de la misma forma durante el monitoreo a cómo se midió durante la construcción de la línea base, para así asegurarse que los cambios representan cambios en el territorio y no en la forma de calcular el indicador.

### **Usuarios del indicador**

Identificar cuál es la audiencia prevista para los indicadores que se van a desarrollar, es decir, quiénes van a utilizar este indicador. Definir en términos de toma de decisiones y elaboración de informes cómo se van

a utilizar los indicadores elegidos. Una vez evaluadas estas condiciones se seleccionan los indicadores que son viables para implementar.

### **Monitoreo de variables**

Una vez se han planteado los objetivos del proceso de restauración, creado metas inteligentes cuyo cumplimiento permitirá alcanzar dichos objetivos y seleccionado los indicadores que permiten medir el desempeño hacia dichas metas, se procede a medir las variables necesarias para el cálculo de estos indicadores mediante el programa de monitoreo. El monitoreo se define como una medición y recolección de datos sistemática y repetida en el tiempo que se efectúa con el propósito de evaluar y seguir el estado, las tendencias y los cambios en variables relacionadas con los indicadores de las metas planteadas (Noon, 2003; Suter, 1993). Los datos que provienen del monitoreo son los datos verificables que alimentan los indicadores.

Las variables se miden sobre los objetos de monitoreo: aquellos paisajes, gradientes, ecosistemas, grupos de especies, especies, rasgos o procesos que se medirán de forma sistemática y continua en el tiempo, y que no deben confundirse ni con los objetivos



**Cuadro 9.** Al aplicar el concepto de objeto de monitoreo a nuestro ejemplo de restauración en la cuenca alta del río Blanco, tenemos que: para la variable *presencia/ausencia de especies invasoras* (V2P), el objeto de monitoreo son las especies invasoras existentes en la cuenca alta del río Blanco. Para la variable *área en vegetación nativa* (V4E), el objeto de monitoreo son las coberturas vegetales del área de estudio. Para la variable *número de individuos por especie* (V5E), el objeto de monitoreo son las especies de aves acuáticas que usan los humedales de la zona. Tener claro cuáles son los objetos de monitoreo permite hacer un mejor costeo del programa, ya que permite saber qué tipos de equipos, materiales, personal y entrenamiento se necesitarán para la medición de las variables necesarias para el cálculo de los indicadores seleccionados.

de restauración, ni con los objetivos de monitoreo. La elección de objetos de monitoreo para variables como composición y diversidad de especies, o distribución de especies focales, se puede hacer teniendo en cuenta criterios como funcionalidad ecológica, relación con los seres humanos, prioridad de conservación y manejo, potencial de información, y practicidad para el monitoreo. Esta selección debe hacerse de forma explícita, transparente y repetible (Sánchez-Claudio et al., 2019) (Cuadro 9).

Un indicador puede estar compuesto por una o más variables. Una variable es una característica que se puede cuantificar y que cambia en el tiempo o el espacio. A diferencia de los indicadores, las variables no están asociadas de manera directa con los objetivos y metas, sino que se relacionan de forma indirecta a través de su integración en los indicadores.

### **Relación entre Objetivos-Metas-Indicadores-Variables**

A continuación, se presenta un marco de referencia para comprender la relación entre objetivos, metas, indicadores y monitoreo de variables (Figura 24). Es necesario mantener presente esta relación durante el planteamiento y ejecución del proceso de restauración para garantizar que el sistema de monitoreo se encuentre articulado con los objetivos y metas, y para que sea útil en el seguimiento y manejo adaptativo (Lindenmayer y Likens, 2009) del plan, programa o proyecto de restauración (Cuadro 10).

Lo primero es tener claro el planteamiento de objetivos y metas, incluyendo la revisión de la línea base y el desarrollo del diagnóstico de restauración, con el fin de entender el contexto de la situación y tener información que permita establecer un valor cuantitativo a las metas. Una vez desarrollado este paso se continúa estableciendo los indicadores y luego con la definición de las fases del sistema de monitoreo. Cuando se tengan objetivos, metas, indicadores y variables planteadas y definidas, se pasa al diseño e implementación del programa de monitoreo, el cual provee los datos para alimentar los indicadores, cuya interpretación permite hacer un seguimiento de la restauración, saber si se han cumplido sus metas o si deben tomar medidas para ajustarla (Figura 24).

## Marcos de referencia para interpretación de los indicadores

Con el fin de organizar la información proveniente del monitoreo y que esta sirva para una gestión adaptativa, los indicadores se deben organizar bajo un marco de referencia que permita relacionar las acciones implementadas en los procesos de restauración y su impacto con otros agentes o circunstancias relacionadas con el proyecto que puedan afectar los resultados esperados.

Se deben diferenciar dos tipos principales de indicadores (capítulos 3 y 4): 1) indicadores de gestión o de implementación: son aquellos que demuestran que tanto se ha avanzado o cumplido con las actividades y obras diseñadas tanto en el proceso de restauración como en el proyecto de monitoreo; y 2) indicadores de efectividad o impacto: aquellos que demuestran el resultado de las acciones de restauración.

En los temas relacionados con restauración, los indicadores de impacto se pueden subdividir en cuatro temas: 1) indicadores de presión, 2) estado, 3) respuesta y 4) beneficios (PERB) (Sparks et al., 2011).

Los indicadores de **presión** corresponden a aquellas metas que se relacionan con la reducción de presiones que impiden o retardan los procesos de restauración, un ejemplo de indicador de presión puede ser: Número de evidencias de entrada de ganado en el área, y estar asociado a una meta en reducción de ganado bovino en áreas restauradas.

Los indicadores de **estado** corresponden a metas que aspiran al éxito de los procesos de restauración evidenciando un cambio en la estructura, composición o función de los ecosistemas restaurados; algunos ejemplos se trataron en el apartado anterior.

Los indicadores de **beneficios** son aquellos relacionados con metas que aspiran a incrementar los beneficios que como sociedades humanas recibimos de los procesos de restauración. Generalmente están asociados a servicios ecosistémicos o contribuciones de la naturaleza (Díaz et al., 2018); por ejemplo, Porcentaje de familias que generan su ingreso básico de iniciativas de turismo sostenible en áreas restauradas, o Biomasa disponible para forrajeo y alimento para los animales de pastoreo en proyectos silvopastoriles.

Finalmente, en los proyectos de restauración, los indicadores de **respuesta** están asociados a las metas para

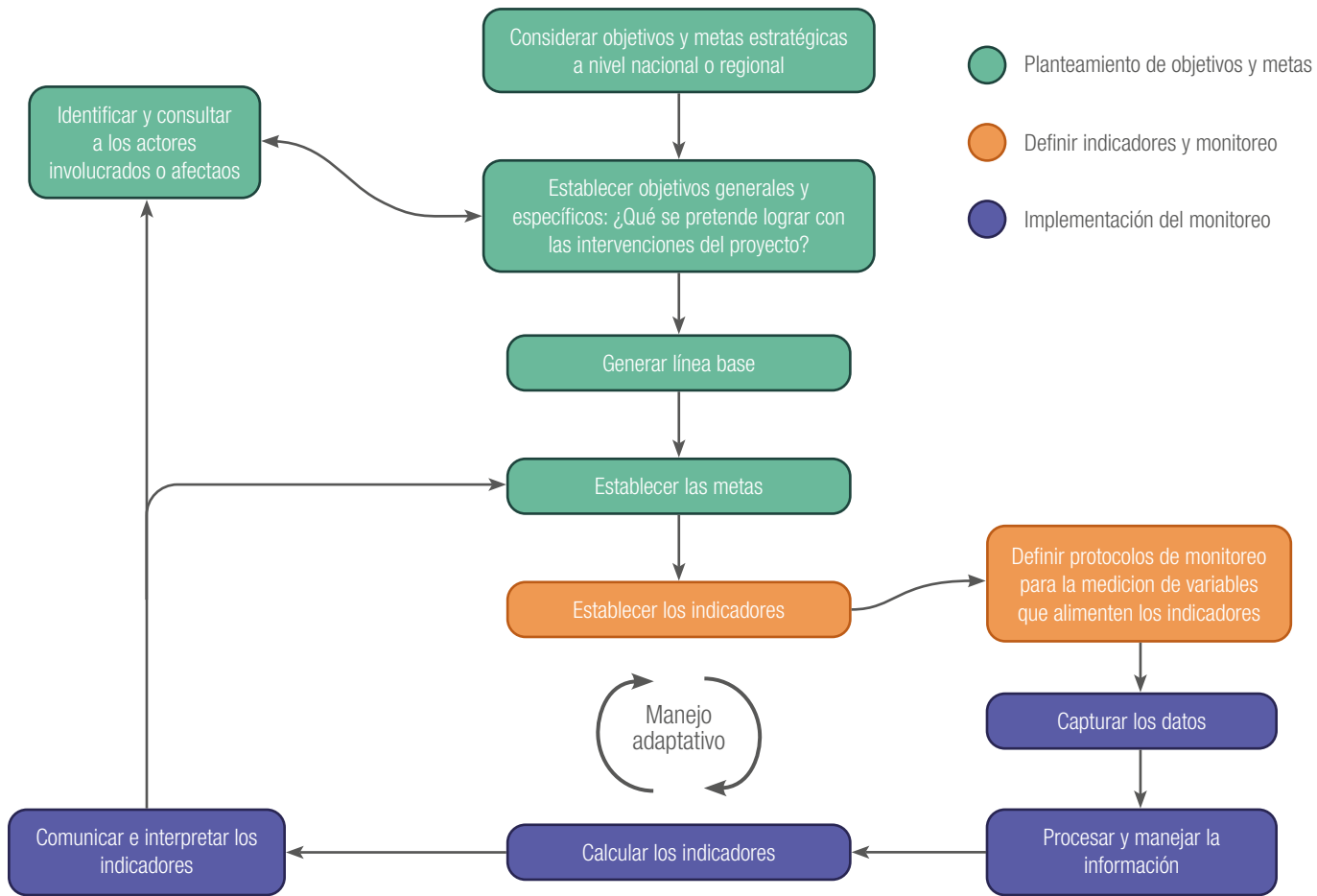


**Cuadro 10.** Para calcular el indicador I1P (probabilidad de ocupación de ganado) del ejemplo anterior se requiere medir la variable presencia/ausencia de ganado (V1P) cada cuatro meses durante dos años. La medición de la variable implicaría dividir los humedales del área de estudio en sectores o sitios, y que un equipo de personas registre de forma directa la presencia o ausencia de ganado en una muestra representativa de los sitios durante cada ocasión de muestreo. Con cada medición repetida se calcularía la probabilidad de ocupación usando las herramientas de modelamiento apropiadas, e incluyendo el indicador I1R (porcentaje de perímetro cercado) como uno de los factores que puede afectar la ocupación del ganado para de esta forma verificar que la estrategia está teniendo el impacto deseado.

Para calcular el indicador I4E (porcentaje de cobertura de vegetación nativa) se necesitaría medir la variable área en vegetación nativa (V4E) de la misma forma y con los mismos insumos que se midió en la construcción de la línea base; por ejemplo, imágenes obtenidas a partir de drones, con una resolución espacial de cinco metros, obtenidas en días con cobertura de nubes menor a 10 %, procesadas con un algoritmo de clasificación automática y verificadas manualmente por un experto. Según la disponibilidad de los insumos, se podría repetir esta medida cada dos años, durante los diez años del proyecto.

mejorar o implementar instrumentos de manejo y gestión de la biodiversidad, por ejemplo, acuerdos de conservación, declaratorias de áreas protegidas, regulaciones, decretos, planes de manejo, actitudes humanas hacia la biodiversidad, entre otros; por ejemplo, Número de acuerdos de conservación firmados, Plan Nacional de Restauración actualizado y evaluado. En algunos casos, bajo el marco PERB los indicadores de respuesta incluyen los indicadores de gestión o seguimiento.

En la Figura 25 se puede ver cómo se implementa el modelo PERB relacionando algunos de los indicadores presentados en el ejemplo de este capítulo. Establecer estas relaciones es importante porque permite: 1) evaluar



si las acciones implementadas, relacionadas en los indicadores de seguimiento, se relacionan con los indicadores de impacto esperados; 2) estas relaciones permiten tener una síntesis del problema y pueden evidenciar que existan otras presiones o condiciones de los ecosistemas (estado) que no se están teniendo en cuenta y que están afectando los indicadores de impacto. Por ejemplo, en la Figura 25 se evidencia que pese a que se reducen las evidencias de ganado y aumenta la cobertura, no aumentan las poblaciones de especies de aves, por lo que es necesario entonces adaptar el proceso de restauración para poder cumplir con esa meta o entender por qué no se está logrando. Definir estas relaciones permite plantear preguntas e hipótesis sobre los impactos, pues tanto las acciones propuestas como otros factores tienen incidencia en los resultados esperados.

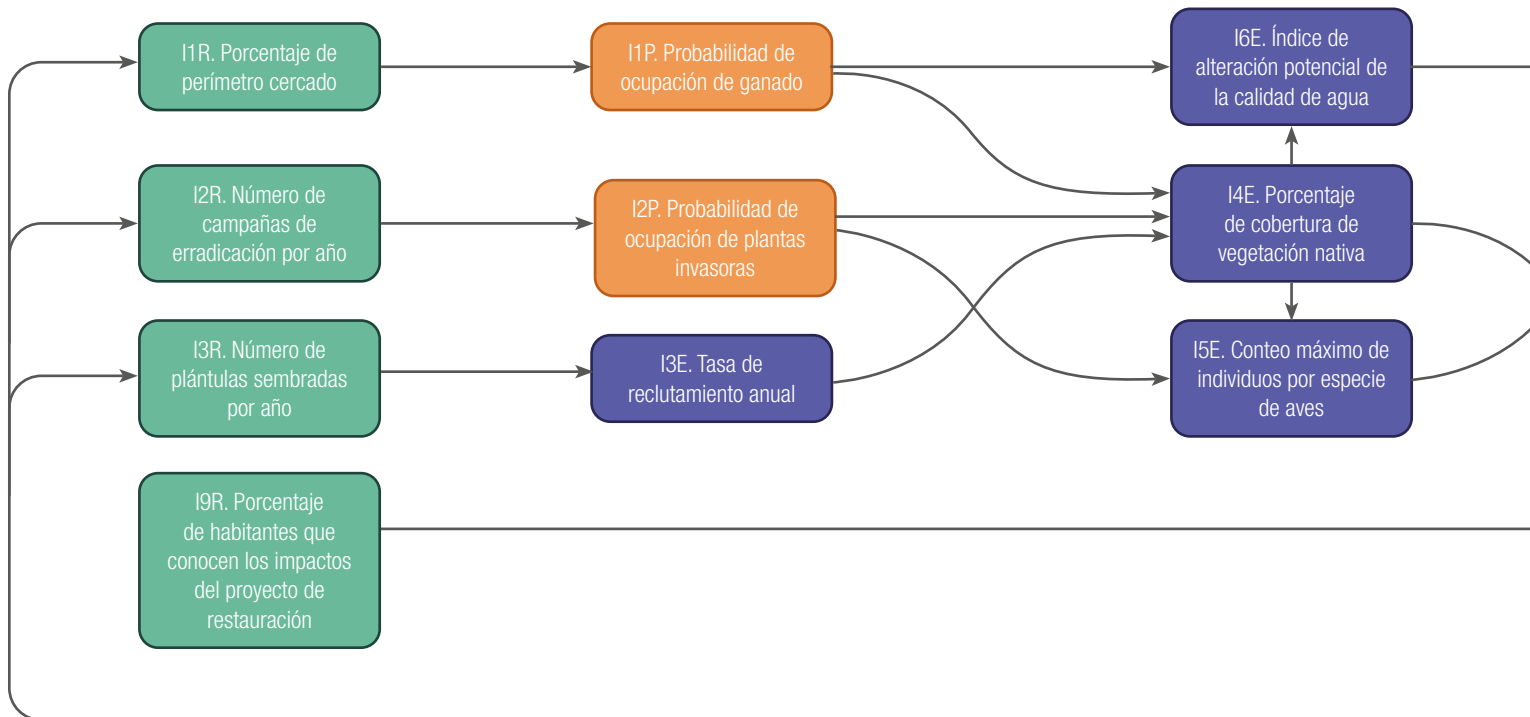
Siguiendo con el ejemplo anterior, quizás una presión indirecta como el cambio climático está afectando las poblaciones de aves, o quizás se requiera implementar áreas de conectividad con otros humedales,

**Figura 24.** Marco de referencia para la generación de Indicadores de Biodiversidad. Modificado de: Alianza sobre indicadores de biodiversidad (2011).

o realizar enriquecimiento vegetal para atraer a las poblaciones esperadas, también puede ser que el esfuerzo de muestreo y la técnica que se está usando para recopilar los datos del indicador no sean los adecuados. Bajo estas consideraciones se debe entonces: 1) complementar el sistema de monitoreo o diagnóstico de restauración y línea base para entender otras presiones, 2) modificar las acciones que se están realizando en el proyecto de restauración o el monitoreo para las variables que constituyen el indicador, o 3) replantear el objetivo específico, la meta y el indicador.

### Recomendaciones

Para el planteamientos de objetivos, metas e indicadores de restauración en Colombia se sugiere tomar como



**Figura 25.** Relación de indicadores de impacto y seguimiento para el ejemplo de proceso de restauración desarrollado en este capítulo. Fuente: Elaboración propia.

referencia los objetivos nacionales para la conservación de los páramos expresados en la Resolución No. 0886 del 18 de mayo de 2018 y la Ley No. 1930 del 27 de julio de 2018 (Congreso de la República de Colombia, 2018), a saber: 1) mantener la diversidad biológica de los páramos; 2) mantener la integridad ecológica de los páramos; 3) mantener los procesos ecológicos asociados al ciclo del agua; 4) mantener los procesos ecológicos asociados al ciclo del carbono, y 5) reconversión o sustitución de las actividades prohibidas (agropecuarias y mineras) de manera gradual.

A partir de las consideraciones generadas para el monitoreo en los páramos de Colombia, Sánchez-Clavijo et al. (2019) recomiendan las variables descritas en la Tabla 4 para el monitoreo de biodiversidad. Los objetos de monitoreo para la medición de estas variables dependen de los objetivos y metas planteadas en los diferentes procesos de restauración, así como de los Planes de Manejo Ambiental de cada complejo de páramo.

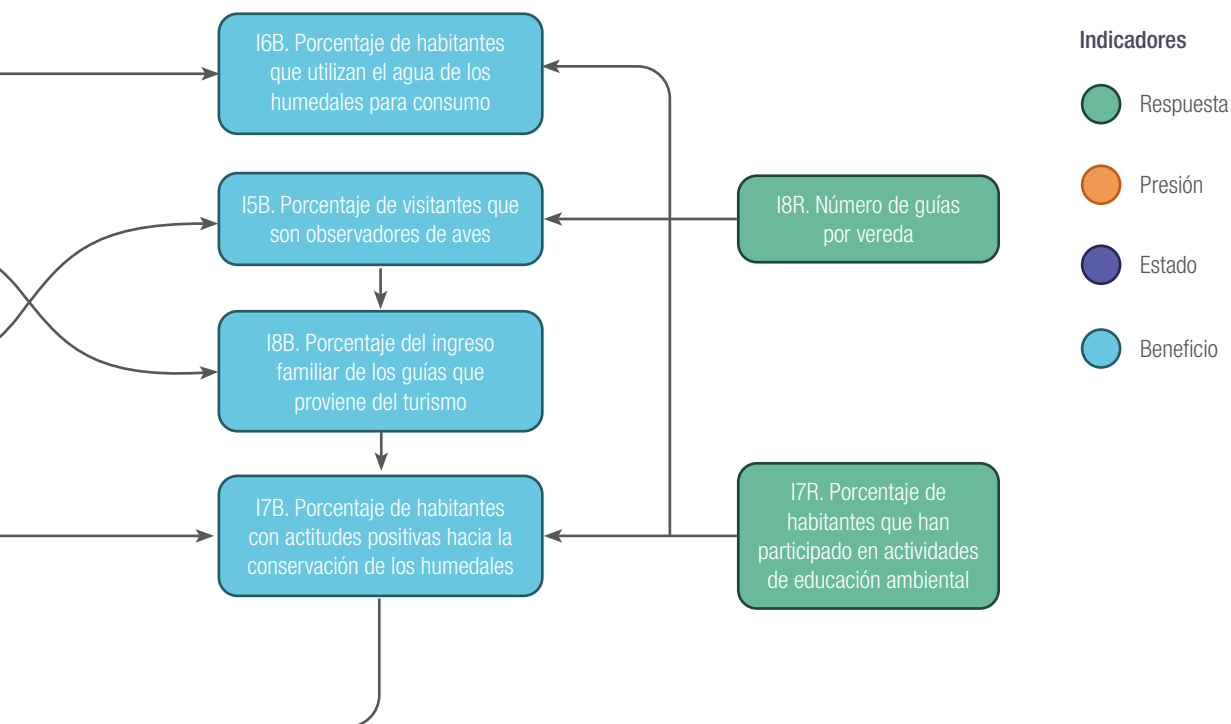
Articular los proyectos, programas y procesos de restauración con estos objetivos nacionales y propuesta de variables, puede facilitar el cumplimiento de las disposiciones normativas para incluir las acciones de

restauración en el manejo de los ecosistemas de páramo y dentro del programa de monitoreo, sobre esto la Ley No. 1930 de 2018 especifica que: “Dentro de los dos años siguientes a la expedición de la presente ley, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, con la participación activa de los institutos de investigación adscritos y vinculados al SINA y la academia, diseñarán e implementarán sistemas de monitoreo para realizar el seguimiento a la biodiversidad, los servicios ecosistémicos derivados, y la gestión realizada” (Artículo 29).

En general, se recomienda que los procesos de planteamiento de objetivos, metas, indicadores y monitoreo de variables sean procesos participativos en donde los diferentes actores, como comunidades locales, sectores productivos o autoridades ambientales que se vean afectados o beneficiados por los programas, proyectos o procesos, tomen decisiones conjuntas. Esto para garantizar que los diferentes actores sientan pertenencia por los objetivos y metas que deben ser alcanzados, que entiendan lo que se busca y el impacto que las acciones tendrán.

Así mismo, se recomienda que se tenga un proceso de comunicación transparente e independiente con los diferentes actores, acorde con los intereses que desde cada uno de ellos sean más relevantes. Se debe definir cuál es el público y cuál información es la que se desea comunicar para utilizar los medios más adecuados.





Finalmente, es importante que los resultados de los indicadores lleguen a los actores que puedan hacer los ajustes necesarios a las acciones implementadas o tomar las medidas necesarias para propender por el éxito de los procesos, programas o proyectos evaluados.

### Conclusiones

El planteamiento de Objetivos-Metas-Indicadores-VARIABLES debe hacerse de manera coordinada para garantizar una evaluación y seguimiento comprensivo del proceso, proyecto o programa de restauración. Los objetivos, metas e indicadores abarcan temáticas que van más allá de las medidas directas sobre la biodiversidad,

pues no solamente se refieren a cuantificación de especies o extensión de ecosistemas, sino también a las acciones de respuesta, presiones y beneficios que intervienen en el éxito o fracaso de la restauración. Los indicadores están subordinados al propósito planteado en los objetivos y metas, la interpretación que se le da al indicador depende del tema de interés, dada esta cualidad los indicadores y su adecuada articulación con objetivos, metas y procesos de monitoreo es el eje central para una toma de decisiones y una gestión adaptativa efectiva.

**Tabla 4.** Variables propuestas para el monitoreo de la biodiversidad en páramos (Sánchez-Clavijo et al. 2019).

Escala espacial	Composición	Estructura
Nacional	Listas de especies de páramo	Mapas de distribución de especies Mapas de zonificación
Regional/ complejos	Diversidad gamma Cobertura por categoría de zonificación	Distribución de especies focales Diversidad paisajística del área delimitada Diversidad paisajística zona de amortiguación
Paisajes/ gradientes	Diversidad beta Cobertura por hábitat	Ocupación de especies focales Conectividad de coberturas naturales
Ecosistema/ parcela	Composición de especies Diversidad alfa Cantidad de estratos de vegetación	Presencia de especies focales Densidad de especies focales Proporción de estratos de vegetación

# CAPÍTULO 05

---

# Generalidades del monitoreo participativo y su aplicación en la restauración ecológica

- ⊕ Participación de las comunidades en los procesos de restauración: punto de partida para el monitoreo
- ⊕ ¿Qué es el monitoreo participativo?
- ⊕ Lista de chequeo y pasos para el monitoreo participativo
- ⊕ Recomendaciones para la implementación y sostenibilidad del monitoreo participativo
- ⊕ Conclusiones



Como se ha abordado en capítulos anteriores, la restauración ecológica es una herramienta fundamental para la gestión integral del territorio. En los últimos años, se ha involucrado un gran número de actores en la restauración (Calle et al., 2015) y varias experiencias en América Latina han mostrado que se han hecho esfuerzos por garantizar la participación de las comunidades locales, y articular sus conocimientos y saberes con las prácticas de restauración (Ceccon y Pérez, 2016). De esta manera, se ha venido consolidando la idea que la restauración ecológica, como un campo del conocimiento integrador, puede promover escenarios y oportunidades reales de participación, que acercan la brecha entre las experiencias de restauración comunitaria y la de los científicos (Gross, 2006; citado en Ceccon y Pérez, 2016).

Colombia se ha comprometido con generar e implementar diversas iniciativas de restauración para ayudar a reducir en alguna medida la degradación y fragmentación de ecosistemas estratégicos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Sin embargo, una fracción aún muy pequeña de dichas iniciativas han logrado involucrar a las comunidades locales en el diagnóstico, implementación y monitoreo de la restauración (Murcia et al., 2016); este es uno de los principales retos para cumplir los objetivos desde lo técnico y a la vez responder a las necesidades de las comunidades, de acuerdo con sus intereses y realidades locales (Hockley et al., 2005).

Por otro lado, para conocer la efectividad de las acciones de restauración es necesario hacer un monitoreo, estrategia que facilita evaluar el avance y el cumplimiento de objetivos y metas de restauración (Lindenmayer et al., 2012), y cuya implementación requiere del trabajo conjunto y articulado entre diversos actores del territorio (Evans y Guariguata, 2016). El monitoreo, además, permite hacer un seguimiento a indicadores que evidencian el éxito o fracaso de las medidas implementadas (Calle et al., 2015; Vargas et al., 2017), con el fin de tomar decisiones de gestión sobre los ecosistemas intervenidos, que a su vez conduzcan a alcanzar los objetivos planteados (Lindenmayer et al., 2012).

El enfoque de un monitoreo participativo ha demostrado que las comunidades pueden trabajar de forma articulada con profesionales e investigadores, lo que en términos generales garantiza la sostenibilidad del pro-

ceso a largo plazo, genera un mayor compromiso sobre las áreas a restaurar y aumenta la probabilidad que en el futuro el uso de los recursos y ecosistemas restaurados sea más sostenible (Calle et al., 2015; Vargas et al., 2017). Así, el monitoreo participativo se convierte no solo en una estrategia que puede reducir costos en la recolección de datos, sino que aporta beneficios en cuanto a la integración del conocimiento local y el fortalecimiento comunitario, genera aprendizaje, adaptación y mejoras en el manejo y gestión del territorio (Evans y Guariguata, 2016).

Con este contexto, en este capítulo se abordan las generalidades sobre el monitoreo de la restauración con enfoque participativo, las cuales serán de utilidad para científicos, profesionales, comunidades y otras personas que quieran implementar el monitoreo a la restauración ecológica, con un énfasis en las comunidades como ejecutoras de este proceso y no como grupo focal objeto dentro del mismo. Cabe aclarar que, aunque este libro se enfoca en la restauración de páramos, estas generalidades se pueden replicar en los diversos ecosistemas donde se planeen acciones de restauración con enfoque participativo.

### **Participación de las comunidades en los procesos de restauración: punto de partida para el monitoreo**

Involucrar a las comunidades debe ser transversal a todos los pasos de un proyecto de restauración. Si bien el nivel de participación puede variar en cada etapa, incentivar la contribución de pobladores locales desde el inicio es fundamental para lograr la apropiación del proceso, y más adelante el liderazgo de la estrategia de monitoreo con el apoyo y planificación adecuadas. Esto se convierte en una oportunidad para vincular los intereses locales de las partes involucradas con los objetivos de la restauración a gran escala, generando información valiosa sobre su éxito (Evans y Guariguata, 2016).

Esta participación, sin embargo, no debe limitarse a la asistencia a talleres informativos o mediante la obtención de información en una sola vía; por el contrario, debe ser entendida como un diálogo de saberes entre conocedores locales y científicos, que genere conocimiento sobre la restauración ecológica a través de procesos de investigación activa y participativa. La Tabla 5 muestra cómo se puede vincular a la comunidad en las



**Tabla 5.** Fases del diseño e implementación de un proyecto de restauración y su articulación con la participación comunitaria. Adaptado de: Aguilar-Garavito et al. (2016).

Fase	Etapas	Articulación con participación comunitaria	Herramientas
Fase 0. Analítica	*Búsqueda de información *Definición de ecosistema de referencia	En este punto el conocimiento ecológico tradicional que aporta una comunidad es fundamental para hacer una reconstrucción histórica del ecosistema a restaurar, usos previos y motores de transformación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Construcción de líneas de tiempo con conocedores locales.</li> <li>+ Entrevistas semiestructuradas.</li> <li>+ Encuestas.</li> </ul>
Fase 1. Diagnóstico	Diagnóstico socioecológico	Evaluación del estado actual del ecosistema e historia del disturbio	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Cartografía social.</li> <li>+ Perfil de grupo.</li> <li>+ Estrategias de vida.</li> <li>+ Línea del tiempo.</li> <li>+ Gráfico histórico de la comunidad.</li> <li>+ Otras herramientas de diagnóstico rural participativo.</li> </ul>
		Evaluación y definición de tensionantes, limitantes y potenciadores	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Árboles de problemas que permitan hacer la descripción de la barrera a la restauración desde el punto de vista de la comunidad.</li> </ul>
		Zonificación y priorización	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Cartografía social.</li> <li>+ Mapa de servicios y oportunidades.</li> <li>+ Mapa de recursos naturales y de usos de la tierra, entre otras herramientas de diagnóstico rural participativo.</li> </ul>
Fase 2. Implementación	Definición de técnicas y estrategias a implementar según el caso	Las comunidades aportan información valiosa sobre especies nativas adecuadas para la restauración, los tiempos de siembra, trasplante, técnicas, entre otros (Fajardo, 2008).	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Construcción de viveros comunitarios para propagación de especies.</li> <li>+ Otras técnicas planeadas de forma comunitaria que se consideren pertinentes.</li> <li>+ Establecimiento de acuerdos socioambientales.</li> </ul>
Fase 3. Monitoreo	*Evaluar cuantificadores *Establecer efectividad de medidas adoptadas	Involucrar a las partes interesadas en el diseño, recolección y análisis de la información obtenida para monitorear el éxito de una estrategia de restauración es clave. Esto fomenta el aprendizaje y favorece el manejo adaptativo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Monitoreo participativo</li> </ul>

diferentes etapas del proceso y qué herramientas de trabajo participativo pueden emplearse, respectivamente. La Figura 26 muestra cómo se articula el proyecto de restauración con el monitoreo participativo.

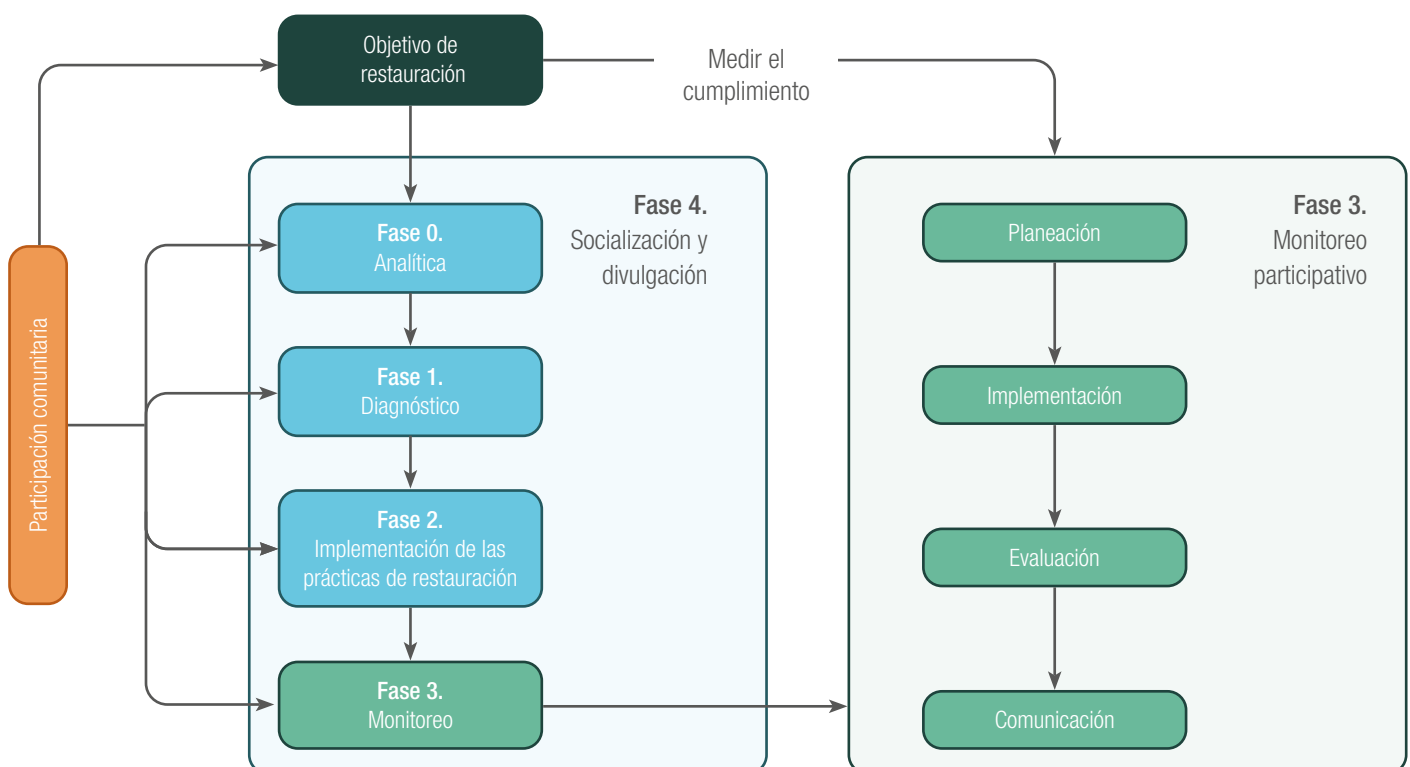
En este sentido, antes de iniciar el monitoreo participativo se debe consolidar la participación de las comunidades haciendo un diagnóstico de los actores en territorio, articulando sus necesidades con el proceso de restauración e involucrándolas en el planteamiento de objetivos y metas.

### Diagnóstico socioecológico

Es importante articular la fase de diagnóstico de la implementación del proyecto de restauración con la elaboración de un diagnóstico que permita construir una línea base de información socioecológica según saberes locales o antecedentes de investigación.

Este diagnóstico será útil para tener un contexto claro del proceso de restauración que se quiere realizar y entender cómo los sistemas culturales y económicos del

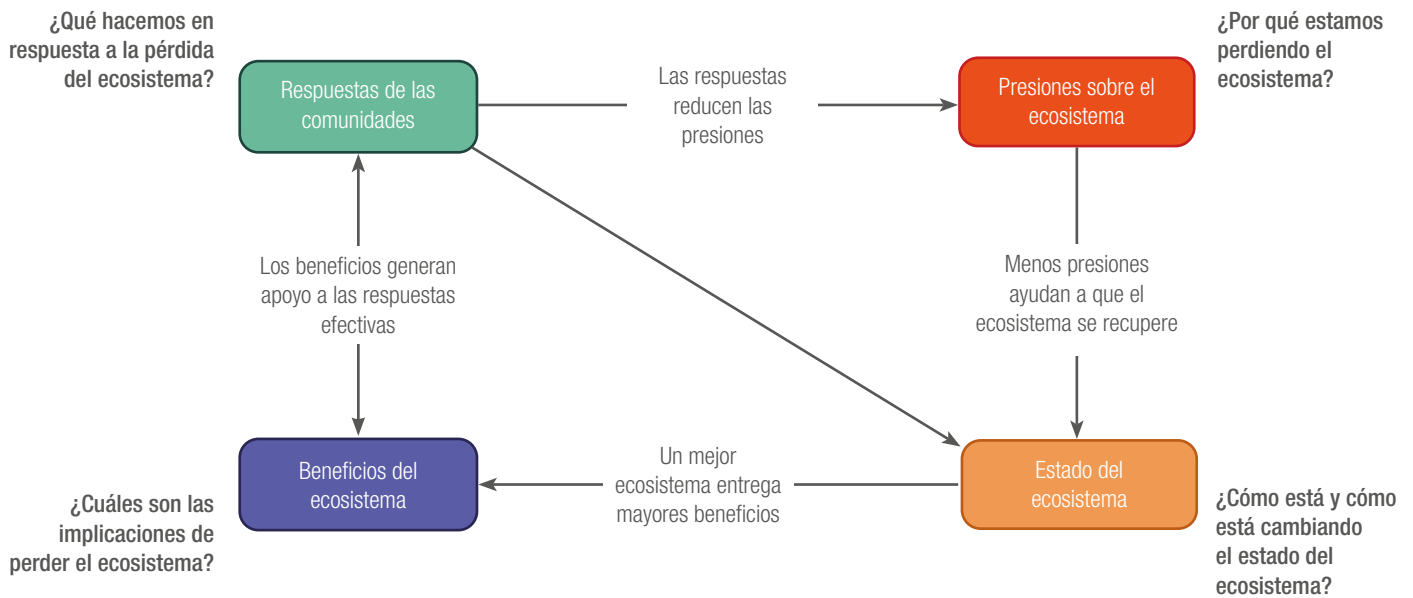
**Figura 26.** Articulación del planteamiento de un proyecto de restauración con el monitoreo participativo de la biodiversidad. Adaptado de: Aguilar-Garavito et al. (2016).



territorio inciden sobre el uso y percepción de los recursos y el ecosistema (Hinojosa, 2019). Este análisis integral de componentes sociales, ambientales y económicos permite tener una visión general de la interacción entre las comunidades y sus recursos, y de las relaciones históricas y actuales entre el sistema natural y socioeconómico, este último es uno de los aspectos clave que incide en la capacidad de restaurar un ecosistema (Vargas, 2017).

### ¿Qué aspectos se deben considerar en el diagnóstico y monitoreo participativo?

- + Los aspectos sociodemográficos y actividades productivas de la comunidad.
- + La identificación de actores estratégicos, líderes comunitarios, y cómo estos se articulan para tomar decisiones en el territorio, así como los niveles de organización social (Hinojosa, 2019). Puede ampliarse la información relacionada sobre las acciones y los objetivos de participación de estos actores relevantes y sus roles.
- + Las instituciones públicas y privadas presentes en el área de estudio y, si es posible, la influencia e impacto de estas a diferentes escalas.
- + Las experiencias y proyectos vinculados al manejo y uso de los recursos naturales que hayan sido de-



**Figura 27.** Modelo conceptual de las relaciones presión-estado-beneficio-respuesta. Adaptado de: Sparks et al. (2011).

sarrolladas o estén en curso en el territorio, para generar espacios de articulación y sumar aprendizajes.

- + La percepción y uso de la biodiversidad y la identificación de servicios ambientales por parte de los actores presentes en el territorio.

Los anteriores aspectos permiten conocer e identificar de forma efectiva necesidades colectivas y particulares, y visibilizar el estado actual, las causas, los agentes limitantes y potenciadores para realizar la restauración del ecosistema desde el punto de vista de las comunidades (Aguilar-Garavito et al., 2015). Así mismo, es importante identificar plenamente los roles de cada uno de los actores involucrados en la restauración, así como el nivel de participación al que se pueden vincular, ya que esto permite definir el alcance y estructurar el diseño metodológico.

### Relación de las comunidades con las dinámicas de los ecosistemas a restaurar

Entender el problema o la necesidad de generar un proceso de restauración local es vital para reconocer cómo el monitoreo aporta a medir y hacer seguimiento a su éxito. Para ello, se propone construir con diferentes actores del territorio explicaciones sobre los **beneficios**

que ofrece el ecosistema, las **presiones** que se ejercen sobre este, el **estado** en el que se encuentra y cómo cambia, y qué **respuestas** o **acciones** se pueden realizar para mejorar su condición actual. Es decir, construir un modelo conceptual presión-estado-respuesta-beneficio (véase capítulos 3 y 4), para entender la relación de las comunidades con las dinámicas de los ecosistemas a restaurar (Figura 27).

Con la construcción de estas explicaciones será más fácil identificar con las comunidades cuáles son las necesidades de información sobre el monitoreo participativo, los aspectos clave para implementar las acciones de restauración e identificar cuál es el objetivo y las metas que deben cumplirse para que la restauración funcione.

### Planteamiento de objetivos y metas de restauración

Como se ha visto en los capítulos anteriores, el objetivo de restauración permite reflejar cuál es la condición final a la que se quiere llevar el área priorizada, y verificar si estas acciones de restauración implementadas son exitosas o no. Este, si bien puede ser planteado a una escala regional o de un proyecto en específico, debe alinearse con la mirada de las comunidades para responder también a las necesidades que existan a nivel local. Con el objetivo de restauración definido se puede plantear con las comunidades cuáles son los pasos concretos o **metas** que permiten alcanzar el objetivo de restauración.

## ¿Qué es el monitoreo participativo?

El monitoreo participativo o monitoreo comunitario es aquel que integra diferentes actores que no cuentan con formación especializada y tienen distintos grados de conocimiento, experiencias, roles sociales e intereses (Lawrence y Ambrose-Oji, 2001; Danielsen et al., 2005a; Evans y Guariguata, 2016), en la toma de datos orientados a la evaluación de la efectividad de las herramientas de gestión y manejo de los recursos naturales (Evans y Guariguata, 2016).

Si bien esta participación puede generar grandes volúmenes de datos, el monitoreo participativo es una estrategia que permite, además, orientar, consolidar y fortalecer los esquemas de manejo de la biodiversidad a escalas locales (Danielsen et al., 2000). Sin embargo, para que esto sea posible, estas estrategias deben ser contexto-dependientes, y estar impulsadas por las necesidades locales, de tal manera que las comunidades

que dependen de los ecosistemas y sus recursos usen esta información.

Así, el monitoreo participativo en el caso particular de proyectos de restauración puede ser útil para que las personas involucradas conozcan si se están logrando las metas u objetivos planteados, o si es necesario adaptar las estrategias o fortalecer procesos, con el fin de cumplir los objetivos y metas en un plazo determinado (Crawford y Brynce, 2003; Yepes et al., 2018).

## ¿Cuáles son las ventajas de garantizar la participación de las comunidades en el monitoreo?

Dentro de las ventajas identificadas se encuentran: la mejora de capacidades locales, el fortalecimiento de la gobernanza, la integración de otros tipos de conocimiento, la obtención de datos de calidad y la reducción de costos de ejecución.



### 01. MEJORA CAPACIDADES LOCALES

Ofrece herramientas a las comunidades para adquirir nuevos conocimientos y mejora los modos de vida locales al ofrecer oportunidades para participar en procesos de investigación.



### 02. FORTALECE LA GOBERNANZA

Es una oportunidad para incidir de forma positiva sobre las decisiones de gestión de los recursos y la biodiversidad. Esto se debe a que todos los procesos asociados al monitoreo fomentan el trabajo colaborativo, actúan como un catalizador del aprendizaje y permiten el desarrollo constante de habilidades de los participantes en la toma de decisiones.



### 04. PROVEE DATOS DE CALIDAD

Cuando es una estrategia bien aplicada, que contempla la cadena de gestión de datos aportados por las comunidades, puede garantizar la obtención de información a diferentes escalas de forma sistemática y continua.



**Figura 28.** Ventajas de garantizar la participación comunitaria en el monitoreo. Fuente: Elaboración propia.



### 03. INTEGRA OTROS TIPOS DE CONOCIMIENTO

Cierto tipo de información solo puede ser brindada por los habitantes locales, tales como cambios o eventos que han ocurrido durante largos periodos de tiempo en un ecosistema, el uso tradicional del páramo y percepciones de la comunidad respecto a éste. Aspectos fundamentales para la restauración.



### 05. ES COSTO-EFICIENTE

Reduce los costos de ejecución. Sin embargo, esto puede variar dependiendo del enfoque del monitoreo, la ubicación del estudio, las inversiones de capacitación, el tiempo de ejecución, y el mecanismo de participación de la comunidad que se puede ser voluntaria o incluir incentivos.



### 06. CONFIERE SOSTENIBILIDAD

Ayuda a garantizar la viabilidad de los procesos de restauración a largo plazo con el fortalecimiento de capacidades locales, incentivando el liderazgo y trabajo autónomo por parte de los actores involucrados, quienes a su vez son los usuarios de los recursos y los conocedores del territorio.

### ¿Cómo se implementa una estrategia de monitoreo participativo en un proceso de restauración ecológica?

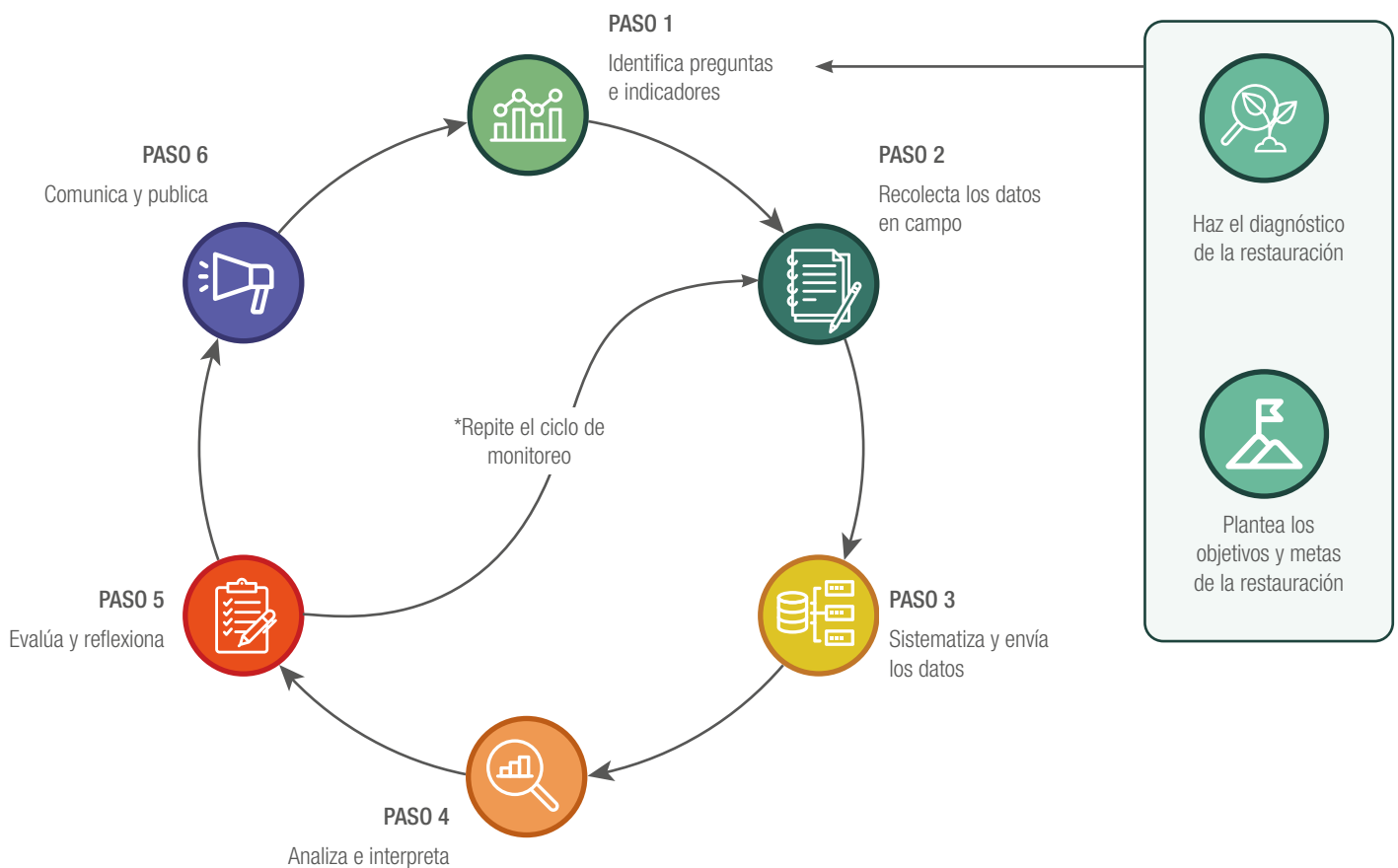
El monitoreo independientemente del contexto socioecológico, de la escala espacial en la que se pretenda desarrollar o del objetivo al que haga seguimiento, debe ser aplicado según el “ciclo de monitoreo participativo” caracterizado por diferentes fases (Figura 29). Cada fase debe ser diseñada conjuntamente y direccionada hacia las necesidades de información (diagnóstico) identificadas para el contexto socioecológico específico (Reed et al., 2016).

#### **Paso 1. Identificar la pregunta de monitoreo e indicadores**

A partir del objetivo y las metas de restauración definidas se proponen preguntas que cuestionan el progreso de la restauración (Lindenmayer et al., 2012). El planteamiento de una buena pregunta es uno de los

pasos clave para llevar a cabo un monitoreo efectivo (Lindenmayer y Likens, 2018). Algunos autores sugieren que puede ser más útil que los actores locales formulen preguntas sobre qué información es necesaria para la toma de decisiones, que apoyen los objetivos de la restauración, en lugar de concentrarse inicialmente en la formulación de indicadores (Lawrence et al., 2002; Kusumanto, 2007).

La pregunta ayuda a definir las variables que se van a medir, así como los criterios, indicadores y cuantificadores a los que se hará seguimiento. Es muy valioso que las preguntas e indicadores propuestos se generen desde el enfoque comunitario, dado que ayudan a satisfacer los intereses y necesidades de las partes involucradas (Evans y Guariguata, 2016). Los indicadores deben ser coherentes con el objetivo y las metas planteadas y, a su vez, deben medir y evaluar la incidencia del proceso de restauración ecológica.



**Figura 29.** Fases del monitoreo participativo de la restauración: 1) planeación (pasos 1 al 2); 2) implementación (pasos 2 al 4); 3) evaluación (paso 5), y 4) comunicación (paso 6). Fuente: Elaboración propia.



### **Paso 2. Recolectar los datos en campo**

Una vez se definan la(s) pregunta(s) e indicador(es) de monitoreo, es importante formular un diseño de muestreo que tenga en cuenta la selección de las áreas a restaurar y los métodos, frecuencia y responsables. Para esta fase es importante generar con los participantes protocolos estandarizados para la recolección de datos, así como definir la cadena de gestión de la información recopilada.

La recolección de datos debe seguir los protocolos de campo y formatos definidos. Es importante contar con la participación y compromiso de los diferentes actores para garantizar la calidad e integridad de la información. Deben definirse los roles que tendrán los participantes dentro del diseño de muestreo planteado, incluyendo todas las etapas necesarias para fortalecer capacidades, así como elaborar un plan de acción que resuma aspectos clave del proceso con cada actor. Pueden consolidarse grupos de monitores comunitarios locales, coordinadores locales, comunicadores, entre otros.

Se deberán realizar prácticas en campo con los monitores para fortalecer sus capacidades, no solo en la toma de datos usando los protocolos definidos, sino también en generalidades propias del proceso de restauración que generen apropiación por el ejercicio, e implementar varios acompañamientos en campo, en los que el apoyo de personal profesional y técnico es fundamental. A medida que las capacidades locales se fortalezcan, y se identifique que la comunidad ya ha apropiado los elementos fundamentales, el monitoreo de la restauración puede ser gradualmente más autónomo y liderado por los monitores locales.

Finalmente, es necesario definir con los participantes todas las actividades a desarrollar, roles y responsables, tiempos estimados y establecer un método para el seguimiento y la evaluación de indicadores de monitoreo y gestión.

### **Paso 3. Sistematizar y enviar los datos**

La gestión de la información debe ser transversal al proceso. Dependiendo de la estrategia de colecta de datos (análoga, digital), todos los monitores comunitarios deben organizar los formatos de registro en campo, y entregarlos a coordinadores locales; estos pueden ser entidades o actores clave que estén permanentemente

en la zona, para evitar que los cierres de los proyectos acoten el desarrollo del monitoreo. Los coordinadores locales recopilan los formatos de los monitores de forma mensual, y sistematizan los datos generados; de esta manera, se cuenta con un respaldo de la información en versión física y digital. Durante este proceso es clave fortalecer las capacidades de personas del grupo de monitoreo participativo sobre procesamiento y manejo de plataformas digitales para enviar la información si así se requiere. Los datos se deben ajustar a la metodología propuesta de acuerdo con el protocolo de muestreo contemplado en el paso anterior, con ello se garantiza la estandarización y calidad de la información generada durante el evento de monitoreo.

Es esencial realizar reuniones con los monitores comunitarios y otros actores interesados para verificar y evaluar la calidad de los datos, aclarar dudas, entre otros aspectos que se consideren relevantes para su posterior análisis.

### **Paso 4. Analizar e interpretar los datos**

Con los datos verificados y organizados por parte de los monitores comunitarios se pueden generar los análisis y resultados del proceso. En este paso se retoman los insumos previos al monitoreo donde se especifican las acciones de restauración propuestas por comunidades y expertos al inicio, y se evalúa si es necesario mantener y fortalecer las acciones que se están desarrollando, o por el contrario si se deben tomar medidas de manejo alternativas para cumplir las metas y el objetivo de restauración (Reed et al., 2016).

Es posible que las comunidades participen menos en el análisis que en la recolección de datos, pero mientras los resultados sean claros y se discutan abiertamente podrán tomar decisiones con base en los mismos (Carter, 1996). Es importante que en esta fase se programen reuniones con los actores interesados para discutir e interpretar los resultados.

#### **\*Repetir el ciclo de monitoreo**

Este paso es el que garantiza el seguimiento en el tiempo de los indicadores elegidos. Tener repeticiones permite identificar cambios en el tiempo y es el elemento clave de una estrategia de monitoreo. A medida que se van haciendo repeticiones comparables de las variables de monitoreo seleccionadas, se puede interpretar el

éxito o falencias de la implementación de las acciones de restauración en el territorio.

### **Paso 5. Evaluar y reflexionar**

Con el desarrollo del monitoreo, las comunidades tendrán los elementos para evaluar diferentes aspectos del proceso; por ejemplo, la calidad de los datos recolectados y sus aportes, si se responde o no a la pregunta planteada con los datos recolectados, si la metodología debería ajustarse, entre otras. Las dinámicas del proceso e incluso de las comunidades pueden variar a través del tiempo, por esta razón se debe adaptar y ajustar los pasos del monitoreo que sean necesarios.

Esta fase también permite evaluar las estrategias de restauración desarrolladas en el territorio y adaptarlas, si así se requiere, para alcanzar de forma exitosa los objetivos propuestos al inicio del proceso.

### **Paso 6. Comunicar y divulgar los avances**

La información obtenida debe ser abierta y estar disponible para los actores involucrados. Deben proponerse estrategias de divulgación que sean dinámicas e invo-

lucren un equipo interdisciplinario que ponga los resultados en lenguaje sencillo y cotidiano. De esta forma se garantiza que la información pueda ser utilizada por los actores cuyas necesidades motivaron el monitoreo.

En este punto, crear estrategias de comunicación efectivas que involucren tanto a los monitores comunitarios como a tomadores de decisiones en los territorios es fundamental para generar el interés de organizaciones y grupos que quieran apoyar las iniciativas locales, y articularlas con otros procesos, además de destacar el esfuerzo de las comunidades en el aporte de información relevante. Esto brinda un sentimiento de orgullo sobre sus territorios y los motiva a darle continuidad a los procesos de restauración (Becker et al., 2005).

## **Lista de chequeo y pasos para el monitoreo participativo**

En la Figura 30 se presentan una serie de pasos que deben considerarse para desarrollar una estrategia de monitoreo participativo.



#### **Previo al monitoreo**


- ⊕ Prioriza actores
- ⊕ Consolida un grupo focal de trabajo
- ⊕ Identifica necesidades locales
- ⊕ Define objetivos y metas que se articulen con las necesidades de las comunidades

#### **Durante el monitoreo**

- ⊕ Define la pregunta, indicadores y protocolos para la toma de datos con las comunidades
- ⊕ Define roles de los actores
- ⊕ Fortalece capacidades
- ⊕ Analiza en conjunto los datos obtenidos

#### **Después del monitoreo**

- ⊕ Reflexiona sobre los resultados del proceso
- ⊕ Adapta y ajusta el proceso de acuerdo con las necesidades
- ⊕ Socializa los resultados con todos los actores involucrados

 **Figura 30.** Lista de chequeo y pasos para el monitoreo participativo. Fuente: Elaboración propia.

## Recomendaciones para la implementación y sostenibilidad del monitoreo participativo

Con el fin de garantizar el éxito del monitoreo aplicado a cualquier proyecto participativo, a continuación se presentan algunas recomendaciones finales.

En cuanto a la planificación e implementación de un monitoreo es clave tener presente que este requiere tiempo, además de un compromiso concertado entre las partes. Si no se cuenta con los recursos y el tiempo para completar el ciclo de monitoreo –es decir, que los datos hayan sido recolectados, analizados y utilizados para tomar decisiones sobre la estrategia de restauración implementada– es necesario evaluar la pertinencia de incluir un enfoque participativo (Evans y Guariguata, 2016).

Asimismo, la participación de las comunidades puede ser difícil de sostener a largo plazo. Por este motivo es importante motivar a las personas con capacitaciones periódicas que fortalezcan sus habilidades prácticas, y resalten los beneficios que brinda la restauración (Galabuzi et al., 2014). Autores como Whitelaw et al. (2003) presentan algunos elementos que ayudan a garantizar la continuidad de los actores involucrados:

- ⊕ Entender las motivaciones de los participantes, así como su nivel de capacitación y hacer que estos se identifiquen con los protocolos de monitoreo seleccionados.
- ⊕ Incorporar capacitación sobre los protocolos de monitoreo, supervisión en campo y verificación de datos del monitoreo participativo.
- ⊕ Generar espacios de reconocimiento para las personas de la comunidad que realizan el monitoreo.
- ⊕ Comunicar a los participantes que es un proceso voluntario, si así se define, y que su trabajo aporta a la gestión del territorio y la toma de decisiones.

Por otro lado, autores como Danielsen et al. (2005b) determinan algunos principios que contribuyen a la sostenibilidad de un programa de monitoreo participativo local sin apoyo externo:

- ⊕ Identificar y responder a los beneficios que la comunidad establece de acuerdo con el hábitat o ecosistema que se está monitoreando o en este caso específico, restaurando.

- ⊕ Generar beneficios para las comunidades locales participantes que superen los costos.
- ⊕ Apoyarse, en lo posible, con instituciones del territorio y otras estructuras de gestión locales.
- ⊕ Almacenar y analizar localmente los datos obtenidos, velando por mantener la calidad y la accesibilidad para las comunidades involucradas.
- ⊕ Reconocer las dinámicas de las comunidades, de tal manera que el monitoreo no se convierta en una actividad que interrumpa sus actividades diarias, y sea acorde a sus condiciones e intereses teniendo en cuenta, por ejemplo, acceso a las zonas de monitoreo, seguridad, entre otras.

## Conclusiones

El monitoreo participativo es una fase indispensable en un proceso de restauración ecológica porque permite conocer la trayectoria del proceso, evidenciar los beneficios e impactos de la restauración y articular las necesidades e intereses de las comunidades locales. Este es una estrategia útil para que las personas involucradas identifiquen si la restauración se cumple satisfactoriamente, o si es necesario adaptar o fortalecer procesos, con el fin de cumplir los objetivos y metas planteadas.

Cuando se incluye a las comunidades locales y sus necesidades en un esquema de monitoreo, hay mayor probabilidad de generar información útil para orientar y fortalecer el manejo y la gestión de los ecosistemas y sus recursos naturales. Aunque involucrar a las comunidades tiene dificultades y demanda tiempo y esfuerzos, los beneficios sociales y para la restauración pueden ser mayores y más duraderos. Es por esto que es necesario reafirmar el compromiso y la motivación de los participantes en tomar acciones para el cambio, como una de las metas y desafíos de los procesos de monitoreo participativo (Evans y Guariguata, 2016).

# CAPÍTULO 06

---

# Protocolo para el monitoreo de la restauración ecológica en los páramos

- + Monitoreo ecológico y para la restauración ecológica
- + Biodiversidad
- + Vegetación y trayectorias sucesionales
- + Fauna
- + Suelo
- + Agua
- + Funciones ecológicas de evaluación rápida
- + Conclusiones



Orlando Vargas, Olga Adriana  
León y Sandra Liliana Rojas

**E**n este capítulo se presenta una propuesta para desarrollar el monitoreo de la restauración ecológica de ecosistemas terrestres con énfasis en los páramos y se presenta una propuesta para el monitoreo de los componentes o plataformas que hacen parte del principio ecológico –vegetación, fauna, suelo, agua– en un proyecto de restauración ecológica. Incluye los criterios, indicadores y cuantificadores por cada una de las plataformas o componentes. Adicionalmente, se presentan métodos de muestreo y análisis.

### Monitoreo ecológico y para la restauración ecológica

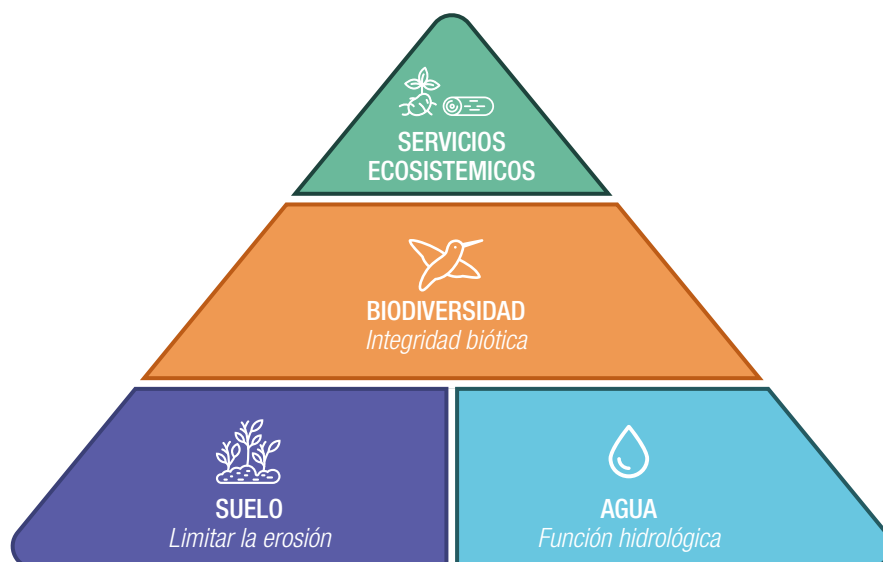
Un programa de monitoreo consiste en una serie de muestreos que se realizan a lo largo del tiempo con la finalidad de analizar las variaciones temporales en diversas propiedades de un sistema de interés (Lindig, 2017; Aguilar-Garavito y Ramírez, 2015) y para evaluar el cambio o tendencia en uno o más recursos (Block et al., 2001). Un monitoreo efectivo se entiende como un proceso que acompaña la restauración desde el diagnóstico del estado actual del ecosistema y continúa durante la implementación de los tratamientos de restauración y el desarrollo de estos, terminando en el

momento en que se considera que el ecosistema ha recuperado su integridad ecológica (Holl y Cairns, 2002). En el diseño del monitoreo de un proceso de restauración conviene tener en cuenta que existen dos tipos de monitoreo relevantes: monitoreo de implementación y monitoreo de efectividad (capítulos 3 y 4).

Un problema recurrente en la medición del éxito de la restauración ecológica en Latinoamérica y el Caribe es la corta duración de los programas de monitoreo que se reportan en la literatura científica (Mazon et al., 2019). En Colombia, los proyectos de restauración casi siempre son de corto plazo y son pensados en términos de vegetación y no de procesos ecológicos de largo plazo que recuperen servicios ecosistémicos. Este problema tiene que ver con las financiaciones de los proyectos, la tenencia de la tierra, la estabilidad de las instituciones y con la preparación y formación de funcionarios que sean capaces de diseñar proyectos a largo plazo con financiaciones adecuadas para cumplir los objetivos (Murcia y Guariguata, 2014). Para el caso de los ecosistemas de páramo, la documentación de la restauración ecológica y el monitoreo es particularmente escaso y, de existir, es de limitado acceso y, por lo mismo, de poca utilidad para la comunidad vinculada en la investigación y la práctica de la restauración (Mazón et al., 2019).

Para pensar en un programa de monitoreo es indispensable partir de la premisa que al implementar acciones de restauración ecológica se busca alcanzar o mantener la integridad ecológica porque es la base de la función de los ecosistemas y para el caso del

**Figura 31.** El monitoreo debe tener como base la evaluación de cambios en el suelo, agua y biodiversidad (de acuerdo con los objetivos que se planteen), que son los factores básicos de los servicios ecosistémicos. Adaptado de: Riginos et al. (2010); Herrick et al. (2006b).



páramo se basa en la relación Suelo-Agua y Biodiversidad (Figura 31). Por esto, a continuación se abordarán los siguientes temas: biodiversidad, vegetación y trayectorias sucesionales, fauna, suelo, agua y funciones ecológicas de evaluación rápida.

## Biodiversidad

Según Llambí (2018) la pérdida de la biodiversidad tiene efectos significativos sobre los servicios ecosistémicos debido a la estrecha relación existente entre la biodiversidad y la productividad ecosistémica, la eficiencia en el uso de los recursos y la resiliencia frente a transformaciones.

## Vegetación y trayectorias sucesionales

La vegetación es la matriz estructural y funcional de los ecosistemas y tiene un papel fundamental en la regulación del intercambio de materia y energía entre la biosfera y la atmósfera. Es una condición primaria para la recuperación de la fauna y de las comunidades microbianas a causa de las relaciones tróficas e influye en la recuperación de algunas características fisicoquímicas del suelo, lo que implica en parte su recuperación (Davy, 2002).

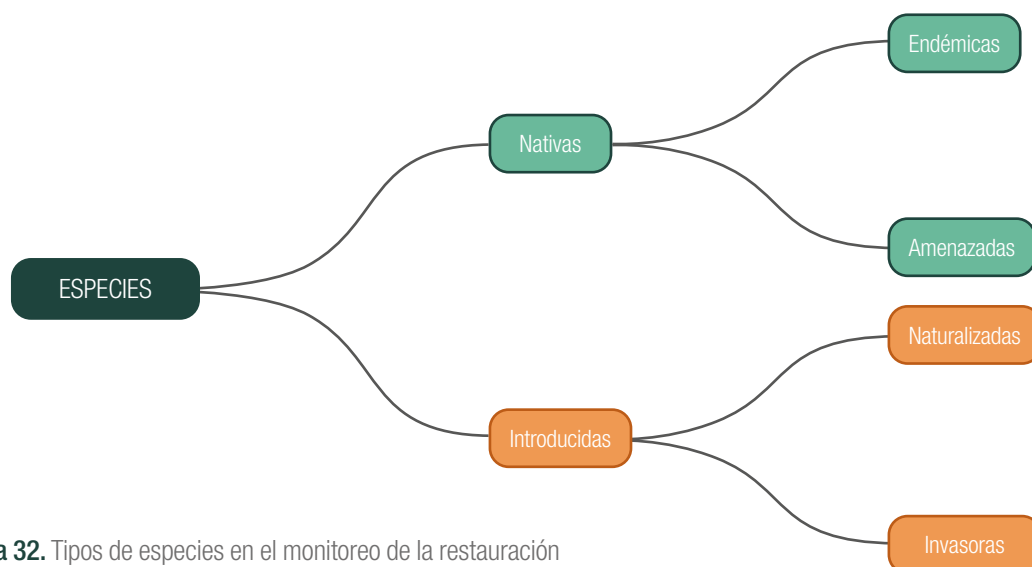
Es un componente altamente sensible a las perturbaciones y cambios ambientales, por lo que se usa como un indicador del estado del ecosistema (Matteucci y Colma, 1982) a través de cambios de su estructura y composición. Es por esto que las técnicas más

frecuentemente usadas en restauración se enfocan en la introducción y ensamble de especies vegetales. Los indicadores de la vegetación son los más usados y fácilmente medibles en cuanto a composición y estructura (Wortley et al., 2013; Kollmann et al., 2016), los cambios son observables en cortos y largos períodos de tiempo y en diferentes escalas espaciales.

## Composición:

La restauración ecológica busca recuperar en alguna medida la composición de especies propias del ecosistema de referencia, aquellas que habitaban originalmente el área antes de la degradación. Restablecer el ensamble de especies es importante por cuanto hace parte de los factores que hacen posible el correcto funcionamiento del ecosistema y la consecuente oferta de servicios ecosistémicos (Herrick et al., 2006a). Así mismo, en el proceso de regeneración asistida, las especies y sus trayectorias conforman el potencial de regeneración (Vargas-Ríos, 2011).

En los páramos las especies a monitorear se pueden clasificar de la siguiente manera (Figura 32): especies nativas, de las cuales son de interés las especies endémicas y las especies amenazadas de extinción local o regional; y especies introducidas, dentro de las cuales están las especies naturalizadas y las especies invasoras, de estas se identifican las que invaden sistemas agrícolas y las invasoras de ecosistemas naturales y seminaturales.



**Figura 32.** Tipos de especies en el monitoreo de la restauración de los páramos. Fuente: Elaboración propia.

Los indicadores y cuantificadores que comprende la composición florística (Figura 33) son generales para diferentes ecosistemas; sin embargo, deben evaluarse considerando los tipos de especies y de acuerdo con los métodos apropiados para las características de los páramos como se describe más adelante.

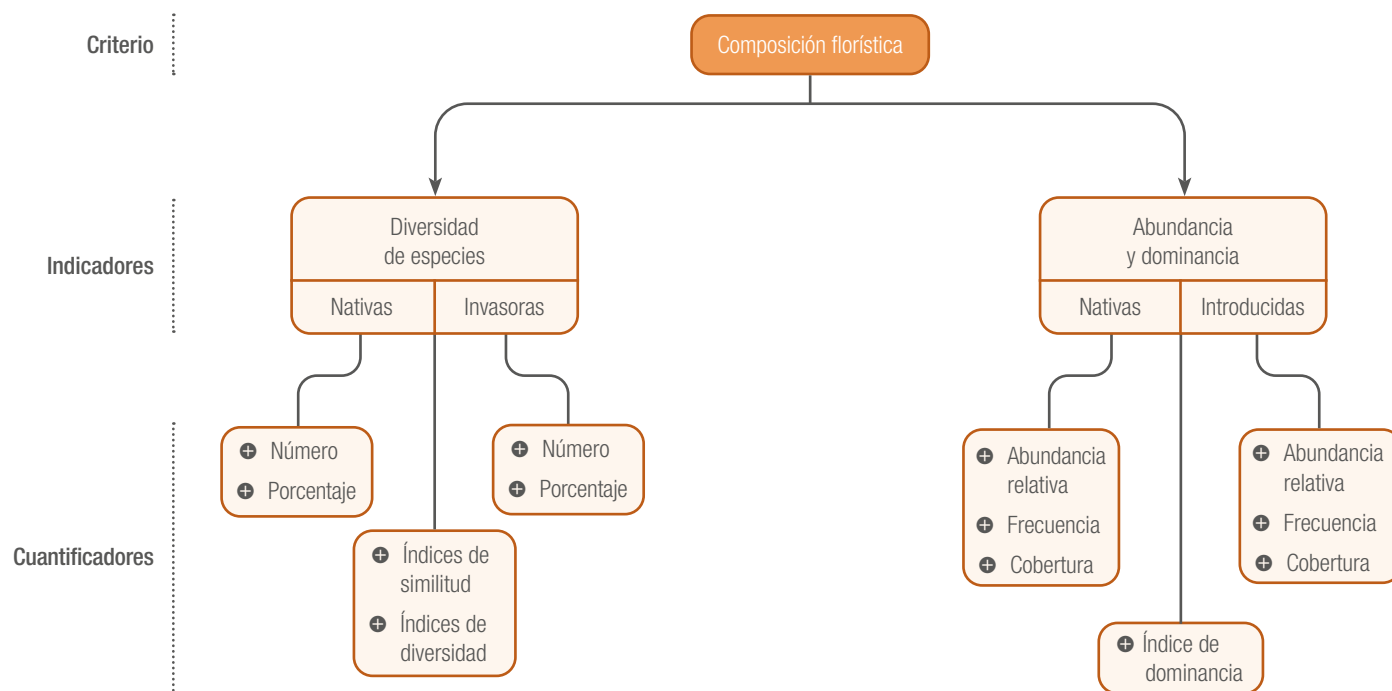
**Estructura de la vegetación:**

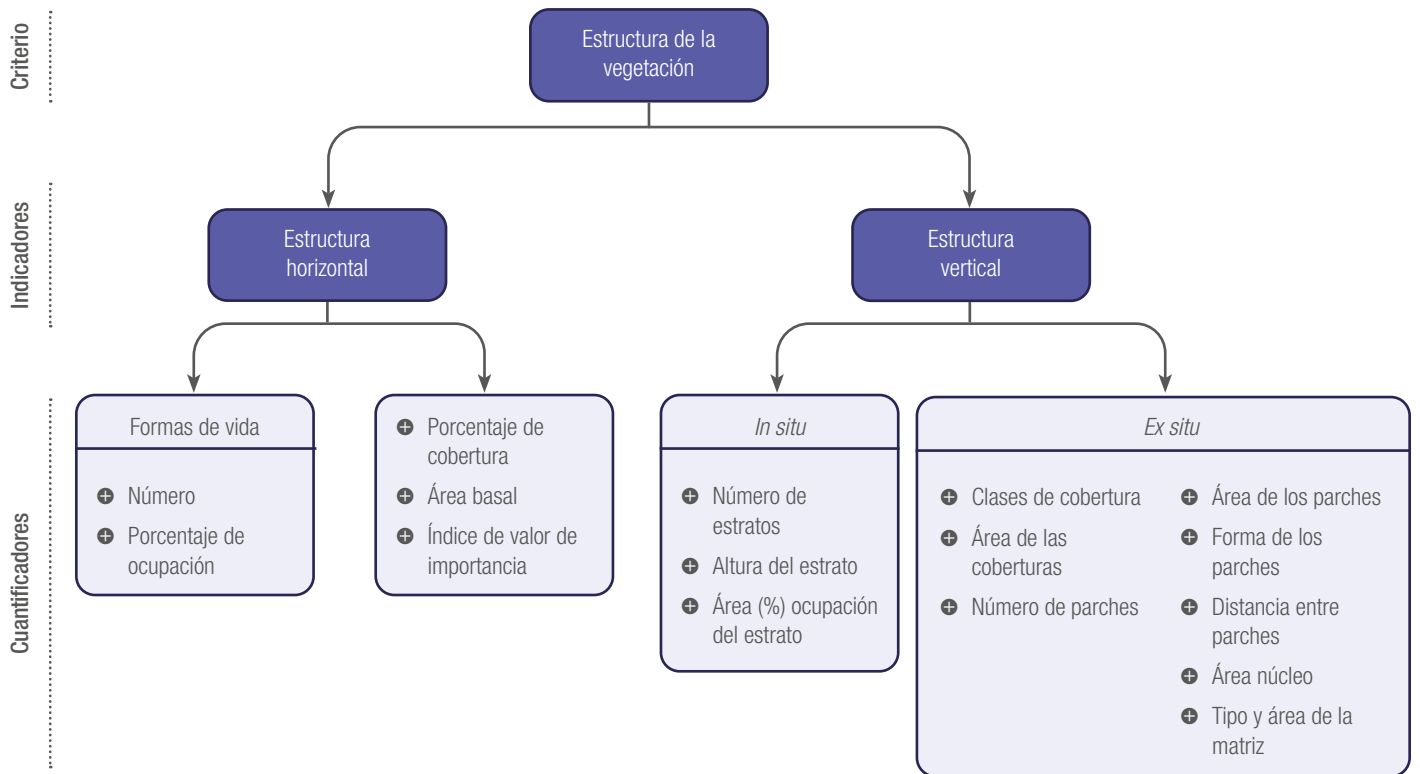
La *estructura vertical* se expresa en el número y complejidad de estratos presentes en la vegetación, dentro de las unidades de muestreo. En el páramo los estratos obedecen a las formas de vida de las plantas. La *estructura horizontal* hace referencia a la organización espacial de la vegetación independiente de los estratos y obedece a condiciones del suelo o del clima.

Para objetivos de restauración o rehabilitación, se espera llegar a estados de complejidad estructural como reflejo de la función protectora de la vegetación – control de la erosión del suelo y de retención de agua–, así como de la oferta de hábitats y recursos alimenticios para la fauna.

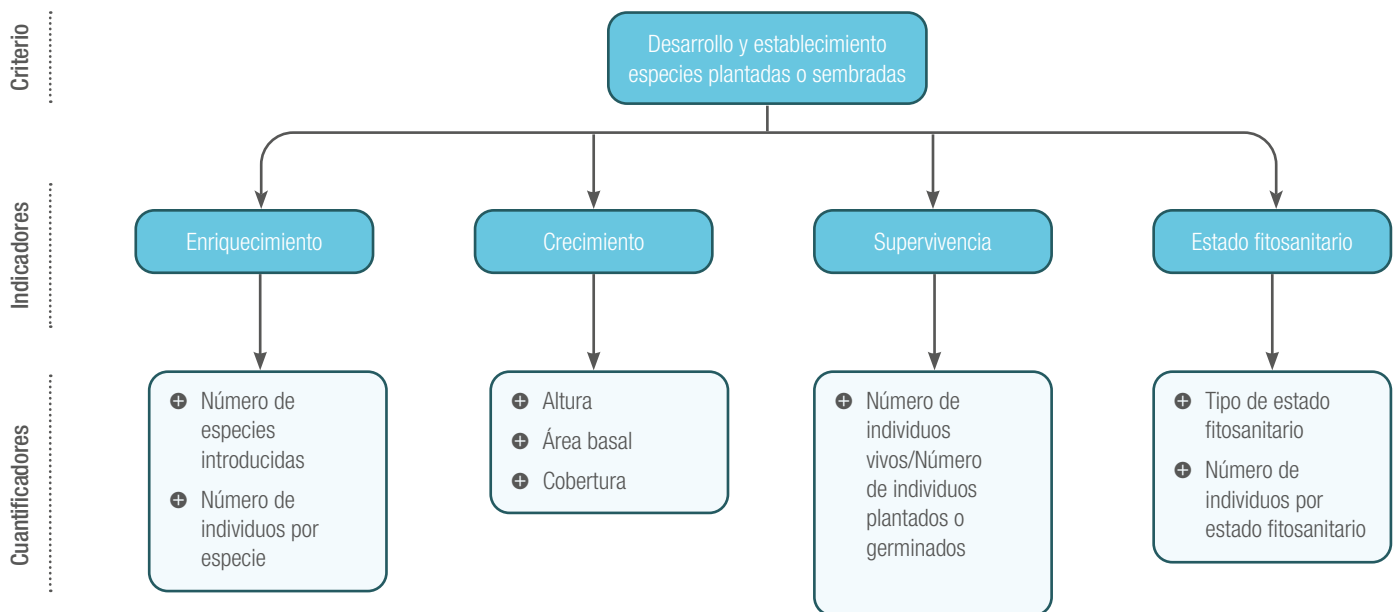
Desde hace tiempo los biólogos y ecólogos han utilizado diferentes métodos para evaluar la estructura de la vegetación *in situ*, pero recientemente los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han sido de gran utilidad para analizar la distribución espacial de la vegetación *ex situ*, a escala global, regional o local, y permiten, además, detectar cambios en el tiempo. Sin embargo, por sí sola, la teledetección no puede explicar: las causas por las que las coberturas naturales aumentan o disminuyen –es decir, los factores que impulsan el cambio–; la composición de dichas coberturas; si la población local apoya (o no) la restauración; posibles amenazas; si existen elementos funcionales clave que aporten a la resiliencia del ecosistema; presencia de especies invasoras, o si proporcionan los bienes y servicios que se esperan de ellos según su estado de desarrollo (Evans y Guariguata, 2017). Es por esto que se contemplan criterios e indicadores complementarios que proporcionen la mayor cantidad de información (Figura 34).

**Figura 33.** Indicadores y cuantificadores para la evaluación de la composición florística. Fuente: Elaboración propia.





**Figura 34.** Indicadores y cuantificadores para la evaluación de la estructura de la vegetación. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 35.** Indicadores y cuantificadores para la evaluación de las especies vegetales plantadas o sembradas. Fuente: Elaboración propia.



### *Especies plantadas o sembradas:*

Las especies plantadas (plantas) o sembradas (semillas) tienen la función de facilitar, por cuanto mejoran la calidad de algunas condiciones ambientales y ofrecen microhábitats favorables para la regeneración de otras especies de plantas sucesionales tardías, especialmente en áreas con una fuerte presión ambiental, como los pastizales. El monitoreo de estos individuos permite determinar el éxito de las técnicas y de las especies seleccionadas, para esto se proponen los indicadores y cuantificadores de la Figura 35.

### *Métodos de muestreo y análisis de vegetación:*

La selección de áreas a monitorear debe considerar la escala de la intervención, extensión, topografía y coberturas vegetales en el área, depende también de las técnicas de restauración que se han implementado –pasiva o activa–, así se define el tipo –parcelas, transectos, entre otros–, cantidad y tamaño de las unidades de monitoreo. La frecuencia del monitoreo depende de las variables y las variaciones climáticas con el fin de evaluar la respuesta de las especies a estas, al inicio del proyecto se recomienda mayor frecuencia que va disminuyendo en el largo plazo.


En esta vía, el primer paso para seleccionar los métodos de muestreo es definir la ubicación, tipo y tamaño de las zonas a muestrear, así como el tamaño y esfuerzo de muestreo para las distintas unidades ambientales de monitoreo, para esto se deben considerar los siguientes aspectos:

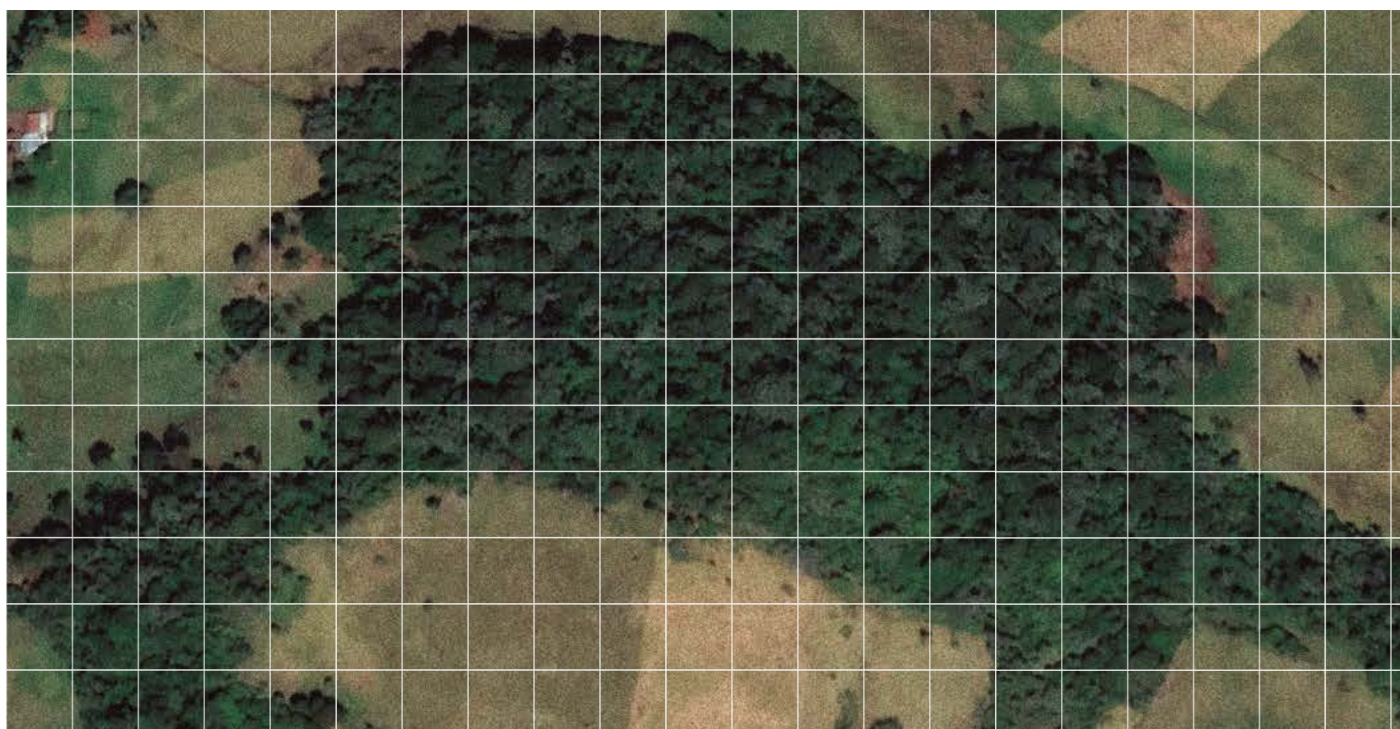
#### ***Ubicación:***

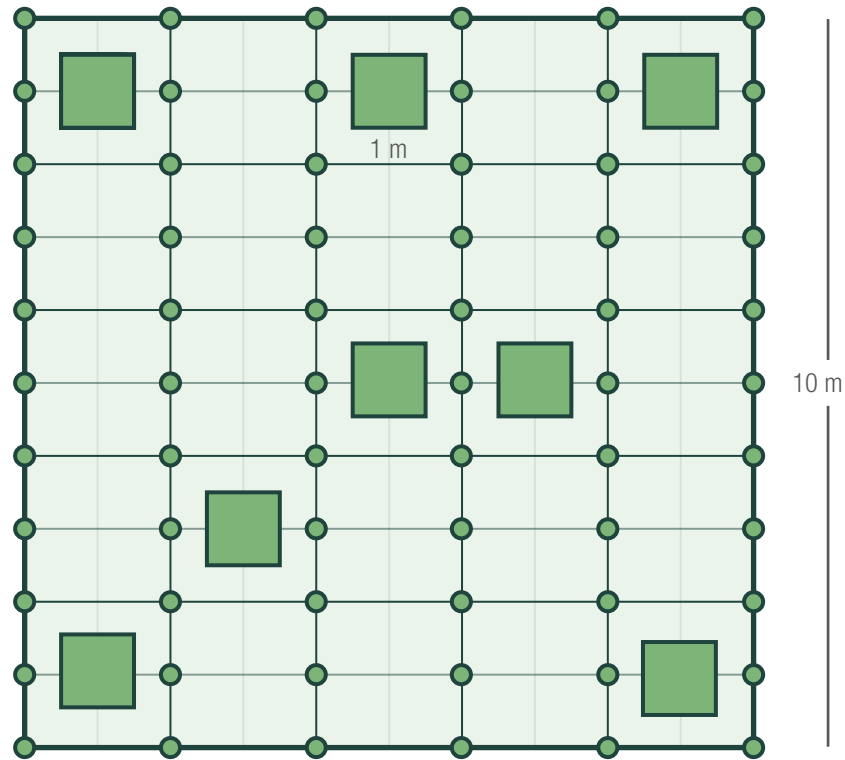
Para evitar sesgos, se sugiere aleatorizar la selección de las zonas de monitoreo, una de las técnicas sugeridas es haciendo uso de cuadrículas sobre fotografías aéreas como se muestra en la Figura 36, se usan también tablas de números aleatorios u otras técnicas de muestreo aleatorio. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que los tratamientos de intervención incluyen la plantación de módulos de especies nativas, por lo tanto, debe darse la posibilidad de que se incluyan uno o más módulos (Rodríguez y Rojas, 2009).

#### ***Tipo y tamaño de las zonas a muestrear:***

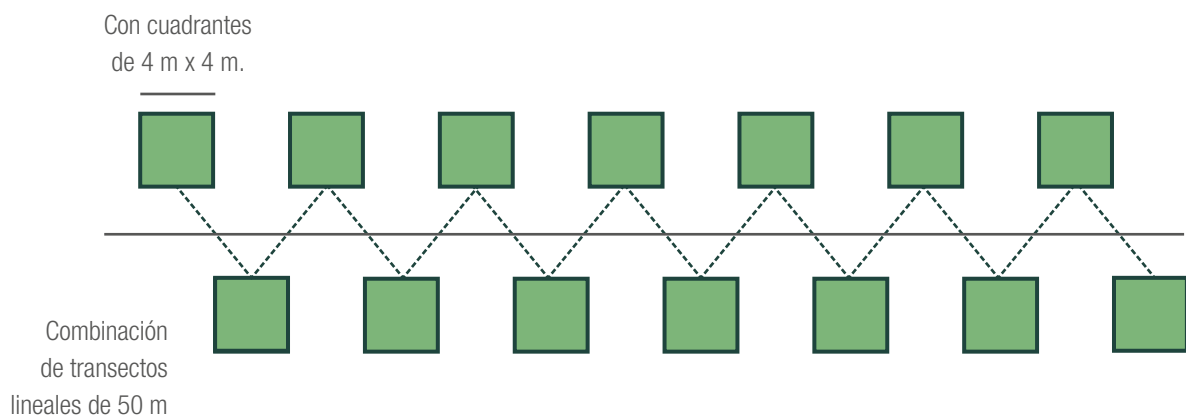
Distintos estudios de vegetación demuestran la importancia, utilidad y pertinencia de varias técnicas para el

 **Figura 36.** Ejemplo de ubicación aleatoria de parcelas permanentes (10 m x 10 m) en un área homogénea. Imagen vereda de Santo Domingo, páramo de Sumapaz. Fuente: Elaboración propia.





**Figura 37.** Cuadrantes de muestreo de riqueza de 1 m x 1 m ubicadas aleatoriamente dentro de las parcelas permanentes de 10 m x 10 m. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 38.** Combinación de transectos y cuadrantes. Fuente: Elaboración propia.

muestreo de la vegetación y sus atributos, tales como la instalación de parcelas permanentes en arreglos variados (Kalkhan et al., 2007; Abella y Covington, 2004; Peet et al., 1998) y la instalación de transectos lineales permanentes (Herrick et al., 2005; Korb et al., 2003; Gódinez-Álvarez et al., 2009). Estas técnicas facilitan el monitoreo de la vegetación considerando la extensión (representatividad), el costo (demanda de tiempo), y la precisión de los datos (Korb et al., 2003) para la evaluación de aspectos clave relacionados con la diversidad en vegetación –riqueza y abundancia de especies, invasiones por especies exóticas, persistencia de especies nativas, entre otras–. La elección de uno u otro método está estrechamente relacionada con los objetivos del monitoreo.

En restauración uno de los principales objetivos es identificar la trayectoria sucesional al implementar al-

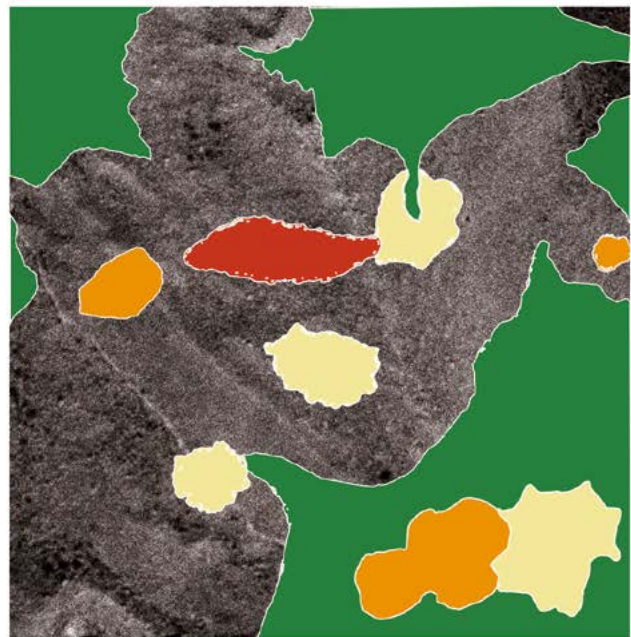
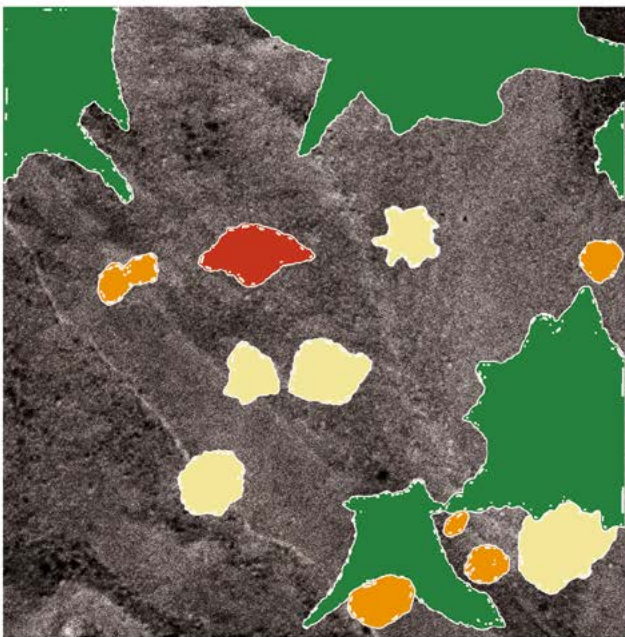
**Figura 39.** Ejemplo de parcelas de 0.50 m x 0.50 m en el monitoreo de la regeneración después de incendios. Los colores indican la variedad de especies de plantas, siguiendo el ejemplo: verde, *Rhynchospora macrochaeta*; amarillo, *Calamagrostis effusa*; naranja, *Ageratina theifolia*; amarillo, *Arcytophyllum nitidum*. Tomado de: Vargas-Rios (2000).

guna estrategia –pasiva o activa–, y así evaluar si se dirige al objetivo planteado; también es común que se implementen diferentes arreglos de especies para acelerar la sucesión y aumentar la diversidad en las áreas a restaurar.

Peet et al. (1998) consideran conveniente la utilización de parcelas de 10 m x 10 m como unidad básica de muestreo, en arreglos flexibles, para evaluar la vegetación del sitio. En páramos donde predomina el estrato herbáceo y rasante se evalúa la estructura de la vegetación y riqueza de especies en cuadrantes de 1 m x 1 m y los transectos sirven para la estimación de coberturas, frecuencias y abundancias. Allí también puede evaluarse el desarrollo y establecimiento de especies plantadas (Figura 37).

Otra técnica usada en frailejonal-pajonal para evaluar la riqueza y cobertura es: a lo largo de transectos de 50 m colocar a lado y lado parcelas de 4 m x 4 m (Figura 38).

Para el muestreo de la regeneración después de incendios o parcelas de restauración se pueden utilizar parcelas fijas de 0.50 m x 0.50 m en donde se registra la cobertura de diferentes especies a lo largo del tiempo (Figura 39).





**Figura 40.** Transectos transversales a la corriente para el monitoreo de la vegetación en áreas riparias en proceso de restauración. Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de los proyectos en zonas riparias, se sugieren transectos transversales a las quebradas con la metodología de línea-punto-intercepto para realizar el monitoreo a la vegetación riparia (Herrick et al., 2006a) (Figura 40).

#### **Tamaño y esfuerzo de muestreo:**

El número de parcelas o transectos se define a partir de la extensión de las áreas y la representatividad mínima requerida para los análisis estadísticos. Pacto (2013) sugiere cinco unidades de muestreo por hectárea y se agrega una por cada hectárea adicional.

Cada proyecto debe considerar si se implementan parcelas permanentes o semipermanentes, en cualquier caso, deben ser demarcadas, georreferenciadas y distribuidas de manera aleatoria, evitando la cercanía a los bordes, se toman fotografías en puntos permanentes –incluyendo toda esta información en los formatos diseñados para ello–. Para esto se debe realizar la medición de los individuos, toma de datos, análisis de datos. A continuación explicaremos los aspectos individuales más relevantes a medir, así como los temas más relevantes al momento de tomar y analizar los datos de monitoreo de la vegetación.

#### **Medición de individuos:**

- a. Altura:** se toma la altura de cada individuo desde la base hasta la terminación de la rama más apical, para individuos con alturas superiores a 3 m se estima la altura con la ayuda de una vara graduada a 1,5 m, o utilizando un hipsómetro (González et al., 2015).
- b. Área basal:** diámetro del tallo a 30 cm de altura. Si se encuentra un individuo cuyo tallo es ramificado desde la base (arbustos), debe medirse el diámetro de cada una de las ramificaciones y posteriormente sumar las áreas basales obtenidas de cada una de estas ramificaciones, registrando su pertenencia al mismo individuo (Marín et al., 2015).
- c. Diámetro de copas (m):** la medición de las copas se realiza con un flexómetro, tomando los extremos de la copa mayor y los extremos ortogonales de esta copa, estos valores se promedian obteniendo el diámetro de copa definitivo (González et al., 2015).

Para macollas y otras formas de crecimiento cuya individualización sea difícil, como arbustos bajos, subarbustos o individuos con reproducción clonal, Rojas-Zamora (2013) y Marín et al. (2015) sugieren:

- ⊕ **Altura:** distancia desde la base de la macolla hasta el ápice de la hoja más larga.
- ⊕ **Cobertura:** diámetro mayor y el diámetro menor de la cobertura de hojas en la base de la macolla, aproximándola la cobertura a una elipse.

Para frailejones (Rojas-Zamora, 2013):

- ⊕ **Altura:** distancia desde la base del tallo hasta el ápice de la hoja de mayor tamaño.
- ⊕ **Diámetro del tallo (DT)** a 30 cm.

#### **Toma de datos:**

- a. Estratos y tipos de vegetación:** Según Rangel-Ch (2007) los estratos en el páramo son: Herbáceo (0.3-1.5m); Arbustivo (>1.5-5m); Arbolitos (>5-12m) y Arbóreo (> 12m). Llambí (2015) diferencia tres estratos en los bosques parameros: a) uno emergente con árboles pequeños y arbustos altos; b) uno rico en

formas arbustivas y subfrútices; y c) uno herbáceo más bajo y variable.

- b. Formas de vida:** las principales formas de vida de las plantas de los páramos son: rosetas caulescentes, rosetas acaulescentes, macollas, bambusoides, cojines, radicantes o estoloníferas, trepadoras, arbustos (Vargas-Ríos y Pedraza, 2003) (Capítulo 1, Figura 4).
- c. Abundancia/Frecuencia:** para la evaluación rápida de la vegetación presente en áreas de pajonales principalmente, se utiliza el método de línea intercepto el cual consiste en una cuerda de 30 m marcada cada 50 cm (60 segmentos en total), en cada segmento se registra la intercepción de las plantas por encima y por debajo de la cuerda, este método da datos de frecuencias. Se hacen varios transectos separados cada 5 m. (Vargas-Ríos, 2000; Vargas-Ríos et al., 2002). Para evaluar la abundancia de especies que se pueden contar fácilmente como frailejones un método rápido son los transectos de 30 m x 2 m. Se traza una cuerda de 30 m y a lado y lado del transecto se hace un rastreo con una vara de 1 m perpendicular al transecto hasta para cubrir a lado y lado un total de 60 m<sup>2</sup> (Figura 41).

El método de punto centrado (Figura 42) se utiliza para medir la regeneración de la vegetación y la estructura vertical. Consiste en una varilla de 1.50 m o 2 m, según la altura de los estratos, segmentada cada 5 cm, en cada segmento se registran los contactos de la vegetación con la varilla. Una combinación de línea intercepto y punto centrado se conoce como intercepción de punto en línea se utiliza también para cuantificar el dosel de la planta, la cubierta basal y la cubierta del suelo y la hojarasca. La cubierta del dosel de la planta es un indicador importante de producción, mientras que la cobertura del suelo es el indicador más importante de resistencia a la erosión (Herrick et al., 2006b).

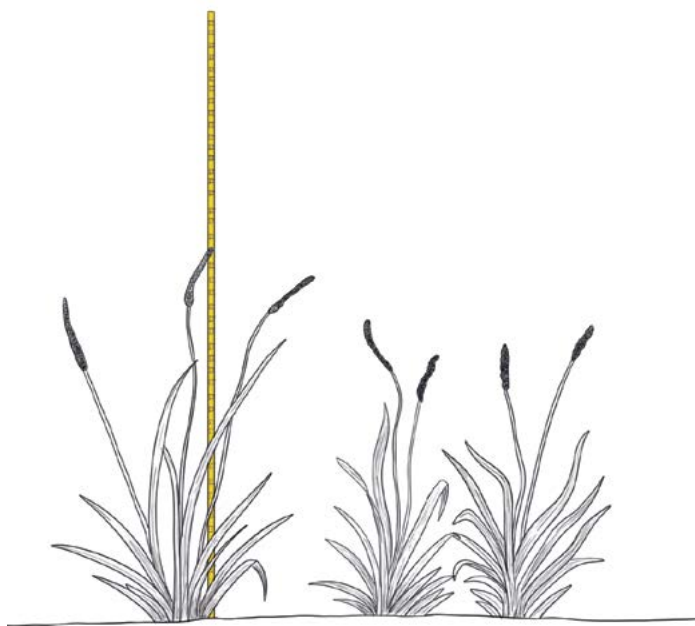
- d. Estado fenológico:** vegetativa, en floración o en fructificación.
- e. Estado fitosanitario:** los daños fitosanitarios se presentan por diversos factores entre los que están los bióticos –insectos nocivos, fitopatógenos, parásitas, entre otros–, abióticos –contaminantes ambientales, deficiencias nutrimentales, exceso o escases de humedad, luz, incendios, heladas, sequías– y sociales



**Figura 41.** Método de línea intercepto. Transectos lineales de 30 m. Cuerda segmentada cada 0.50m. Intercepciones por debajo y arriba de la vegetación. Fotografía: Orlando Vargas.

–sobrepastoreo, turismo– (Claudio-García, 2008). Generalmente los daños fitosanitarios se evalúan en la vegetación plantada; sin embargo, se han encontrado reportes de daños a especies de frailejones (*Espeletia* sp.), puyas (*Puya* sp.), chusques (*Chusquea* sp.), uvas camaronas (*Macleania* sp.) y encenillos (*Weinmannia* sp.) por parte de polillas, hongos y escarabajos, los cuales deben ser registrados en el monitoreo.

Para realizar este diagnóstico se revisan las estructuras anatómicas de las plantas –flores, frutos, semillas, hojas, brotes, yemas, ramas, fuste y raíz– y así detectar signos y síntomas de las afectaciones. Dentro de los daños se puede encontrar: muerte apical a causa de insectos o enfermedades o deficiencias de nitrógeno; en las hojas pueden detec-



**Figura 42.** Método de punto centrado. Fuente: Elaboración propia.

tarse protuberancias, cuerpos fructíferos de hongos, ablandamientos por bacterias, manchas foliares, cenicillas, enrollamientos u orificios de estas que puede albergar insectos, degeneración del crecimiento, ramas muertas, defoliación prematura, entre otros; en la corteza pueden encontrarse alteraciones como galerías u orificios en la misma, lo que puede significar presencia de insectos (Claudio-García, 2008). Estos registros del tipo afectación y la proporción de individuos afectados deben ser evaluados por un experto que indique el manejo adecuado.

- f. Rasgos funcionales:** los rasgos funcionales son las características morfológicas, fisiológicas o fenológicas medidas a nivel individual que impactan el éxito biológico a través de sus relaciones con el crecimiento, reclutamiento y mortalidad (Salgado-Negret y Paz, 2015). Por tanto, en restauración ganan importancia en la medida que proporcionan información del desempeño de las especies bajo condiciones como las del páramo, y de los efectos que estas pueden generar en el ambiente. Así, rasgos foliares se relacionan con la ganancia de carbono y el crecimiento del individuo, rasgos de madera indican resistencia a la sequía o al daño, otros rasgos como los regenerativos aportan información sobre el potencial de dispersión y establecimiento (Salgado-Negret et al., 2015).

Así, es posible determinar grupos funcionales, los cuales son conjuntos de especies que poseen atributos –morfológicos, fisiológicos, conductuales o de historia de vida– que son semejantes y que desempeñan papeles ecológicos equivalentes. Beneficios como la provisión de agua dulce, la fertilidad de suelos agrícolas, la regulación del clima, el control de plagas, la producción de alimentos, la prevención de desastres naturales y la regeneración de la vegetación, entre otros, dependen de la actividad de diferentes grupos funcionales y de la biodiversidad contenida en ellos (Cárdenas-Arévalo y Vargas-Ríos, 2008; Martínez Ramos, 2008). En restauración ecológica, los atributos de los grupos funcionales se emplean como indicadores del funcionamiento del ecosistema y de los cambios generados por perturbaciones (Vásquez y Solorza, 2017). Salgado-Negret et al. (2015) proporcionan una serie de métodos para evaluar estos rasgos funcionales, algunos de ellos en campo y otros requieren un trabajo en laboratorio. En el Capítulo 7 se presenta un detalle metodológico para hacer monitoreo desde los rasgos funcionales.

- g. Origen:** con ayuda de literatura especializada se registra considerando si la especie es nativa, exótica o invasora. El Catálogo de flora de Colombia (Bernal et al., 2019) ofrece esta información en línea.

#### *Análisis de datos:*

Aunque existen diversos índices que pueden ser aplicados, para el cálculo y posterior análisis de los datos se sugiere tener en cuenta las recomendaciones de la Tabla 6 (Marín et al., 2015; Rojas-Zamora, 2013). De igual forma, en el capítulo 10 se profundiza en los métodos de procesamiento y análisis de datos.

#### *Variables relacionadas con las especies plantadas:*

El registro en campo se realiza en formatos estandarizados diseñados por el equipo de monitoreo. A cada una de las plantas se le registra: la altura, el diámetro mayor de la copa y su perpendicular, el diámetro basal a la altura del suelo y el DAP cuando corresponda (altura de la planta mayor a 1.40 m). A partir de las medidas señaladas anteriormente se realiza el cálculo de:


**Tabla 6.** Método de análisis para monitoreo de vegetación.

Método de análisis	Definición	Fórmula
Riqueza total	Número especies encontradas en la unidad de muestreo.	
Densidad total	Número total de individuos en la unidad de muestreo.	
Frecuencia (Fi)	Porcentaje del número de unidades muestrales en las que aparece la especie (mi) en relación con el número total de unidades muestrales (M).	$Fi = \frac{mi}{M} \times 100$
Áreas basales	Valores del diámetro o circunferencia basal, tomados a 30 cm del suelo.	$A = \pi * \left[ \frac{d}{2} \right]^2$ $d = \text{diámetro del círculo}$
Área basal total*	Sumatoria de las áreas basales de todos los individuos de una especie determinada en la parcela.	
Índice de Valor de Importancia (IVI)	Sumatoria de los valores de dominancia relativa –bien sea área basal relativa o cobertura relativa–, frecuencia relativa –número de subparcelas en las que aparece la especie sobre la sumatoria total de frecuencias relativas de todas las especies– y densidad relativa –número de individuos de cada especie sobre el total de individuos–.	
Supervivencia	Número de individuos vivos con respecto a los plantados.	
Tasa de crecimiento	Incremento en altura entendido como la diferencia de altura (o cobertura en macollas) entre el intervalo de tiempo.	TC= (tamaño final – tamaño inicial) / tiempo
Diversidad	Índice de diversidad de Shannon-Wiener.	$H' = - \sum_{i=1}^{S} P_i \cdot \ln P_i$ $H = \text{Índice de Shannon-Wiener};$ $P_i = \text{abundancia relativa};$ $\ln = \text{logaritmo natural}$
Dominancia	Índice de Simpson.	$S = 1 / \sum_{i=1}^{S} \left[ \frac{n_i(n_i-1)}{N(N-1)} \right]$ $S = \text{Índice de Simpson}$ $n_i = \text{número de individuos en la } i\text{ésima especie}$ $N = \text{número total de individuos}$
Proporción de nativas y exóticas	A partir del conteo de especies presentes y la determinación de su origen.	$\% \text{ Nativas} = \frac{\# \text{ spp nativas}}{\# \text{ Total de spp}} \times 100$ $\% \text{ Exóticas} = \frac{\# \text{ spp exóticas}}{\# \text{ Total de spp}} \times 100$
Índice de similitud cualitativo de Sørensen	Basado en presencia - ausencia de especies entre el sitio a (ecosistema de referencia, por ejemplo) y el sitio b (zona intervenida, por ejemplo).	$Is = \frac{2c}{(a+b)}$ $c = \text{número de especies compartidas por los dos sitios}$ $a = \text{número de especies en el sitio A}$ $b = \text{número de especies en el sitio B}$

\* En el caso de arbustos que tengan varias ramificaciones, es necesario calcular primero el área de cada tallo para luego sumar el área basal total y no sumar los diámetros ni las circunferencias medidas, puesto que esto lleva a una sobreestimación del área basal total del individuo.

- a. *Tasa de crecimiento relativo (TCR)*, tanto en altura como en área de copa, se hace aplicando la fórmula:

$$TCR = \frac{\text{Tamaño}_{t+1} - \text{Tamaño}_t}{T(\text{tiempo})}$$

Donde: Tamaño t es el tamaño en el tiempo inicial, Tamaño t+1 es el tamaño registrado en una medida posterior y Tiempo es el tiempo transcurrido en días entre los dos tiempos de medición.

- b. *Porcentaje de supervivencia (%S)* se calcula aplicando la siguiente fórmula:

$$\%S = \frac{\# \text{ ind. plantados vivos}}{\# \text{ ind. plantados}}$$

### Georreferenciación de áreas y puntos de muestreo, y generación de bases de datos en Sistemas de Información Geográfica (SIG) del monitoreo:

El sistema de información geográfica está diseñado en varios archivos independientes que permite su consulta por cada tema, pero a su vez un único archivo resultado de la vinculación de las distintas coberturas de datos, que permite tener un fácil acceso a la consulta por cada proyecto, donde se conservan las características de cada una de esas capas individuales, con el detalle por establecimiento. Los resultados generan una variedad de mapas que pueden ser discriminados por cada proyecto.

El proceso metodológico requiere de tres etapas:

- Etapas antes de campo:** se hace la delimitación del área de estudio, la selección de la información base a partir de: cartografía básica, fotografías aéreas, bases de datos e imágenes de satélite.
- Etapas de campo:** se realiza la verificación de coberturas vegetales teniendo como herramienta los puntos georreferenciados con GPS, los cuales son tomados dependiendo de los cambios que se encuentren en las diferentes coberturas. Estos datos son pasados a un software (p. ej. QGIS, ArcGis), que corrige con mayor precisión, para ser desplegados gráficamente y transferirlos a un SIG.
- Etapas después del campo:** con las capas temáticas obtenidas se realiza la gestión y manipulación para

elaborar la base de datos, el análisis y generación de nueva información a partir de la ya incluida y la representación cartográfica de los datos, así como la incorporación de nueva información además de su actualización.

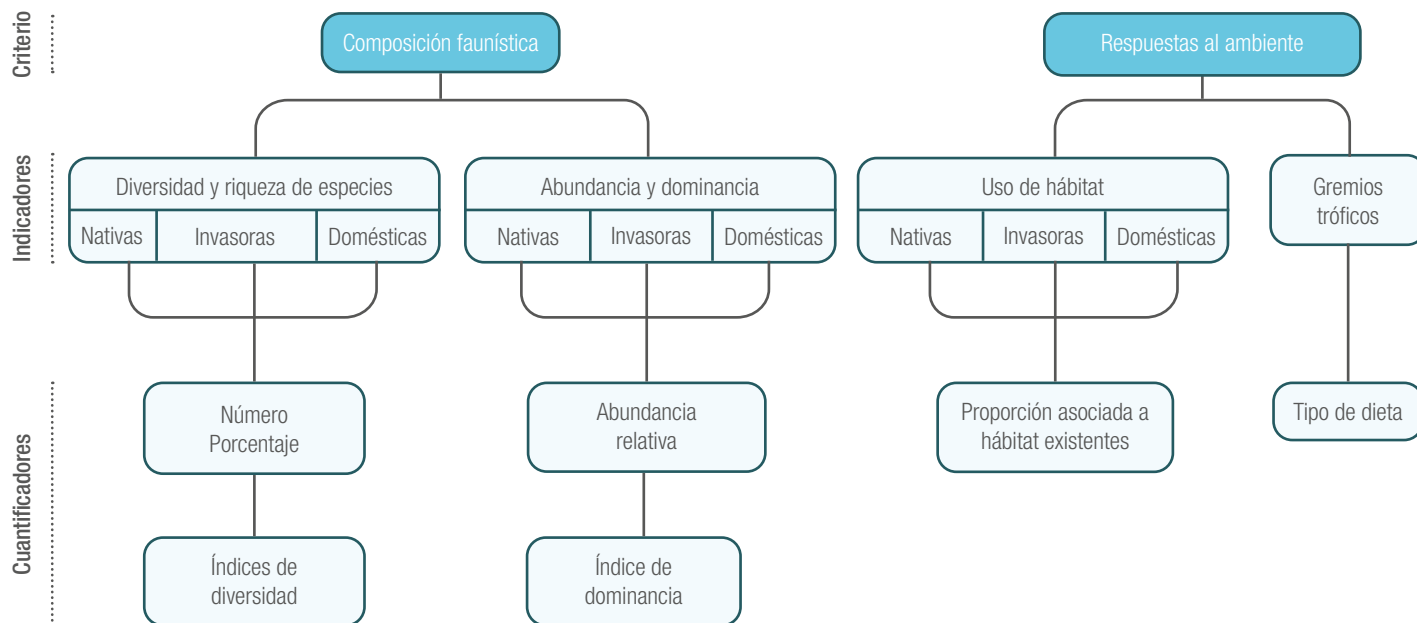
## Fauna

La fauna cumple un rol muy importante en los ecosistemas en relación con el desarrollo de procesos, por lo que es un indicador de la funcionalidad de los ecosistemas en diferentes escalas. Las aves, por ejemplo, cumplen funciones clave como la polinización y la dispersión de semillas, garantizando la reproducción de muchas especies vegetales, y son controladoras de poblaciones de insectos y roedores (Basto et al., 2018). Este grupo se considera un excelente indicador de la biodiversidad, ya que son más fáciles de identificar y detectar que otros grupos faunísticos (Pelayo y Soriano, 2014).

La función ecológica de los mamíferos carnívoros en el páramo se relaciona con el mantenimiento de la estructura de las comunidades terrestres mediante procesos ecológicos como la depredación; la ausencia de estos depredadores en los paisajes naturales genera cascadas tróficas e indican importantes alteraciones en la estructura de las comunidades ecológicas. Sin embargo, existen dificultades para su estudio porque tienen densidades muy bajas, son elusivos y crípticos, además las respuestas de las especies a los disturbios antropogénicos son muy poco conocidas (Zapata-Ríos y Branch, 2014).

Las funciones que cumple la entomofauna en los páramos inciden en la regulación del ecosistema a través de procesos ecológicos como la formación y estructuración del suelo, descomposición de la materia orgánica y el desarrollo de los ciclos biogeoquímicos, aportan a la eliminación de plagas incidiendo sobre la cadena trófica edáfica y contribuyen con la polinización a la supervivencia de muchas especies de plantas (Granadillo, 2014; Basto et al., 2018). Se consideran indicadores del estado de conservación del ecosistema, la productividad que estos presentan y sus niveles de intervención, a través de los cambios en la composición y estructura de las comunidades causadas por la actividad antropogénica y natural (Granadillo, 2014).





**Figura 43.** Criterios, indicadores y cuantificadores de la fauna. Fuente: Elaboración propia.

2017). De manera general los cuantificadores para la fauna se resumen en la Figura 43.

El monitoreo de la arthropofauna del suelo a corto y largo plazo resulta una herramienta útil para evaluar el éxito de la restauración ecológica en ecosistemas alterados (Díaz et al., 2007). Junto a las plantas, los artrópodos del suelo son sensibles a los cambios que conlleva un proceso de restauración y se reconocen como indicadores eficientes del grado de madurez del suelo (Andrés y Mateos, 2006). Adicionalmente, el rango de vida de la edafofauna permite que funcione bien en el monitoreo a la restauración de suelos alterados (Andrés y Mateos, 2006).

Los anfibios y reptiles cumplen funciones en los ecosistemas como ayudar a mantener las aguas limpias, son controladores de plagas y de vectores de enfermedades humanas, influyen en la producción primaria y el ciclaje de nutrientes, polinizan los órganos florales y dispersan semillas, incrementan la dinámica de sedimentos en los cuerpos de agua y, en general, mantienen el flujo de materia y energía entre ambientes acuáticos y terrestres, así como entre el dosel de los bosques y el suelo (Urbina-Cardona et al., 2015). Este grupo es usado como bioindicador de contaminación, ya que tienen la capacidad de acumular contaminantes, tienen limitada movilidad, y pueden dar indicios de las condiciones tanto en ecosistemas terrestres como en acuáticos (Suárez,

**Métodos de muestreo y análisis:**

- a. **Anfibios:** el método más usado y efectivo en inventarios y monitoreos es la técnica de recorridos libres. Este método es apropiado para registrar y analizar especies raras o poco comunes y se pueden muestrear grandes áreas y topografías abruptas. Consiste en realizar caminatas aleatorias hacia una dirección determinada. Durante estas se realizan búsquedas intensivas por encuentro visual cronometradas (VES) en todos los microhábitats disponibles –rocas, troncos, necromasa de frailejones, hojarasca, bordes de quebradas, entre otros– registrando todas las especies y datos ecológicos relevantes. Se recomiendan recorridos de 200 m a 500 m en el día y de igual extensión en la noche, entre las 9 am y la 1 pm (cuatro horas en el día) y entre las 6:30 pm y 10:30 pm (cuatro horas en la noche), realizando el mismo esfuerzo de muestreo en todas las estaciones altitudinales. La información que se obtiene es abundancia relativa, riqueza de especies, diversidad –a partir de la abundancia relativa– (Marín et al., 2015).
- b. **Aves:** una de las técnicas más recomendadas para la identificación visual y detección auditiva de la avifauna es el conteo en puntos de radio fijo, que consiste en que un observador permanece en el centro del punto


**Tabla 7.** Métodos de análisis para monitoreo de fauna.

Método de análisis	Descripción	Fórmula
<b>Diversidad</b>	Índice de diversidad de Shannon-Wiener.	$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \cdot \ln P_i$ <p><math>H</math> = Índice de Shannon-Wiener  <math>P_i</math> = abundancia relativa  <math>\ln</math> = logaritmo natural</p>
<b>Dominancia</b>	Índice de Simpson.	$S = 1 / \sum_{i=1}^S \left[ \frac{n_i(n_i-1)}{N(N-1)} \right]$ <p><math>S</math> = Índice de Simpson;  <math>n_i</math> = número de individuos en la <math>i</math>ésima especie  <math>N</math> = número total de individuos</p>
<b>Abundancia relativa</b>	Frecuencia de registros de cada especie en cada sitio de muestreo.	
<b>Prueba de Kolmogórov-Smirnov</b>	Permite identificar si la composición, abundancia y uniformidad de especies presentan diferencias estadísticamente significativas entre los sitios de muestreo.	

y toma nota de todas las aves detectadas visual y auditivamente en un área y tiempo en un radio de observación de 25 m a 50 m por un tiempo de 10 a 15 minutos. Se deben situar puntos fijos para cada una de las áreas restauradas y en el ecosistema de referencia, se recomienda el uso de binoculares y la toma de registros fotográficos. Como las aves poseen diferentes momentos de actividad a lo largo del día, los avistamientos deben coincidir con estos: en la mañana entre las 05:45 h y las 11:00 h y en la tarde desde las 15:30 h hasta las 17:45 h. Esta metodología es recomendada en hábitats heterogéneos y de topografía compleja, permite medir tamaño poblacional, relación con el hábitat, evaluar todos los hábitats y obtener listas completas. Dentro de las limitaciones está que no permite la medición de los individuos y tiene baja sensibilidad a especies crípticas (Marín et al., 2015; Basto et al., 2018)

**c. Edafodauna epigea:** dentro de los métodos recomendados por Marín et al. (2015) están las trampas

de caída, usadas para capturar la fauna de invertebrados del estrato rasante. Son recipientes plásticos de 8 cm a 10 cm de diámetro y de 300 ml a 500 ml de capacidad, que se entierran con la boca a ras de suelo con una mezcla de 1/3 de etanol al 70 %, 2/3 de agua y una gota de jabón líquido sin aroma, a media capacidad. Se ubican separadas entre sí de 5 m a 10 m, y se pueden ubicar en una línea, en zigzag, cuadrículas o arreglos aleatorios. Estas trampas permanecen 48 horas instaladas y al retirarlas se adiciona etanol al 96 % hasta completar al menos  $\frac{3}{4}$  de capacidad de cada uno de los recipientes. También puede usarse el de captura directa mediante recorridos libres para la búsqueda y captura de individuos, o en muestras seleccionadas de hojarasca y necromasa de frailejón.

**d. Gremios:** para fauna se incluye el término gremio ecológico, el cual hace énfasis en la agrupación de especies que explotan de manera semejante un mismo recurso del ambiente (Martínez Ramos, 2008). Pueden

determinarse por el uso que hacen de los hábitats –terrestre, acuático, arbórea, entre otros– y por su dieta que se relaciona con su rol dentro del ecosistema.

En aves los tipos de dieta definen los siguientes grupos: carnívoro, carroñero, herbívoro, frugívoro, granívoro, insectívoro, malacófago, nectarívoro y omnívoro. Los anfibios se alimentan de invertebrados pequeños y medianos, vertebrados pequeños y algunos son generalistas. Dentro de la entomofauna se encuentran fragmentadores, recolectores, depredadores, raspadores y filtradores.

### *Análisis de datos:*

Para el análisis se sugiere tener en cuenta las recomendaciones de la Tabla 7 (Marín et al., 2015) y los procedimientos del Capítulo 10. De igual forma, se recomienda consultar las distintas plataformas de monitoreo para fauna presentada por Aguilar-Garavito y Ramírez, (2015).

### **Suelo**

Los suelos son la base de toda comunidad vegetal, agrícola o natural y constituyen espacios tridimensionales donde interactúan constantemente factores físicos, químicos y biológicos (Pizano y Curiel, 2015). La regulación hídrica y el almacenamiento de carbono, importantes servicios ambientales de los páramos, están asociados directamente a los suelos, que se caracterizan por una lenta descomposición de materia orgánica y procesos de humificación. Gracias a su composición hidromórfica, el suelo es capaz de retener grandes volúmenes de agua, esta capacidad de retención hídrica obedece a características físicas de los suelos paramunos como baja densidad aparente, alta porosidad y condiciones de consistencia muy friable (Buytaert et al., 2006), esto a su vez se constituye en limitante para el desarrollo de actividades agropecuarias, las cuales modifican las características de los suelos y afectan los procesos de captura retención y almacenamiento de agua, función principal de los suelos de páramo (Daza et al., 2014). Además, existe una estrecha relación del suelo con la vegetación y otros niveles tróficos, como los herbívoros y los invertebrados del suelo (Schafer et al., 1979).

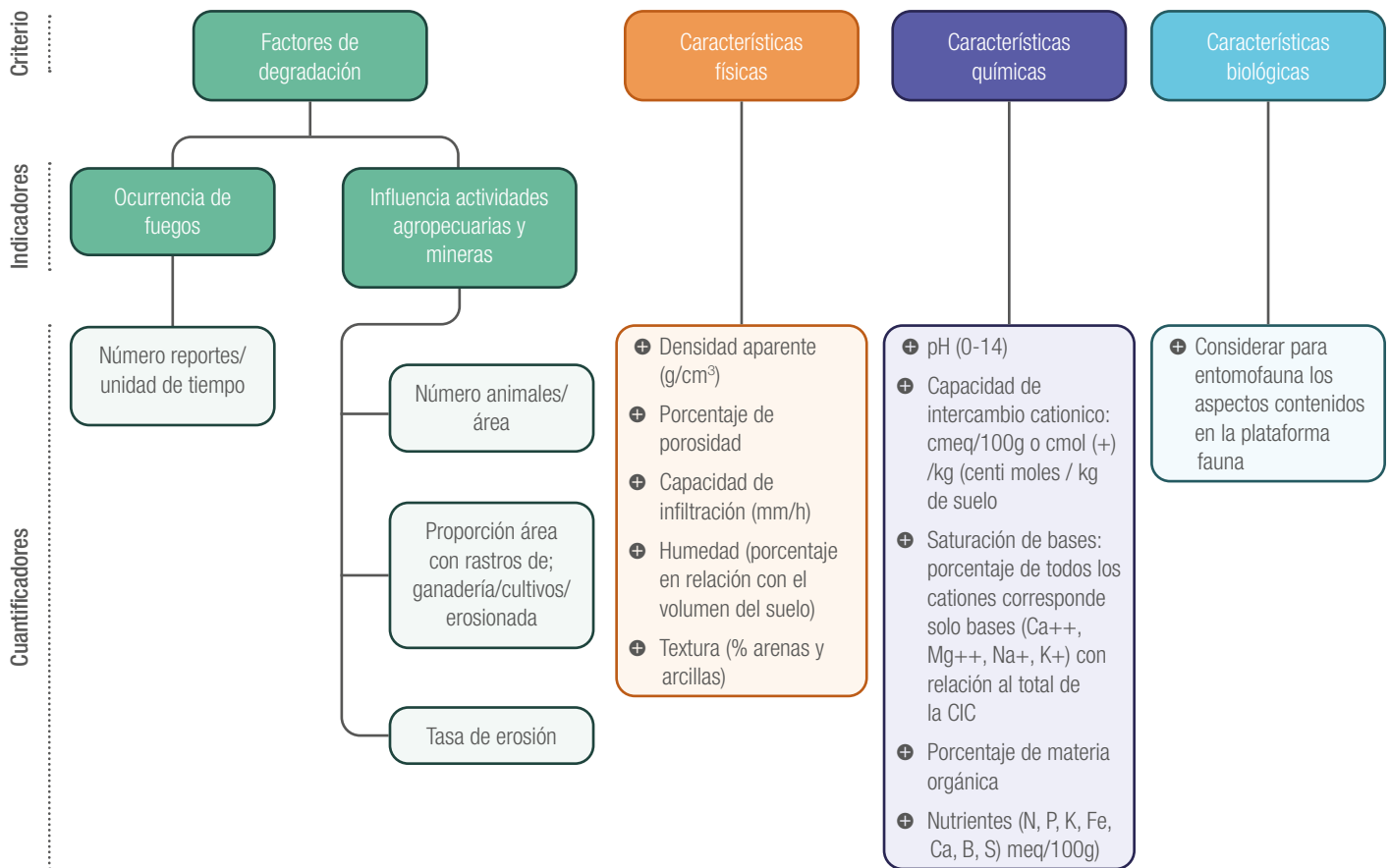
Este recurso ha sufrido de manera acumulativa los efectos de las malas prácticas agropecuarias, como el pastoreo intensivo, las quemadas recurrentes, el uso excesivo de agroquímicos y, más recientemente, el turismo sin control y la minería. La ineficiente gestión del ecosistema se ha reflejado en una degradación paulatina del suelo de los páramos (Buytaert et al., 2006). Estudios acerca de los efectos de diferentes actividades sobre los suelos de páramo (Daza et al., 2014; Crespo et al., 2014) muestran de manera general que se presenta disminución de la humedad, la porosidad, el porcentaje de carbono orgánico y la saturación, y aumento de la densidad aparente.

Es necesario que transcurran varios años de descanso para recuperar las funciones del suelo, pero sin duda las características de los suelos son un importante indicador de las acciones de restauración. Cárdenas y Tobón (2017) en un estudio realizado en los páramos de Belmira, Chingaza y Romerales (PNN Los Nevados), concluyeron que páramos con bajo grado de disturbios, en esquemas de restauración pasiva, pueden recuperar gran parte de sus características y de su funcionamiento hidrológico en pocas décadas.

Pizano y Curiel (2015) determinan que los buenos indicadores de recuperación de salud de suelos deben: 1) integrar información sobre procesos físicos, químicos y biológicos; 2) ser fáciles de medir e interpretar en campo; 3) ser aplicables a un amplio rango de ecosistemas y condiciones; 4) ser muy sensibles a los cambios que sufre el suelo en procesos de degradación y recuperación, y 5) estar relacionados con procesos a nivel del ecosistema. Herrick et al. (2006a) señala que la sostenibilidad de los sistemas restaurados depende de procesos asociados a los nutrientes y a los ciclos hidrológicos (Figura 44).

### *Métodos de muestreo:*

Generalmente para conocer las características del suelo se toman muestras y se envían a un laboratorio especializado. Pizano y Curiel (2015) recomiendan hacer muestreos tanto en las áreas en proceso de restauración como en los ecosistemas de referencia. En cada zona sugieren tener al menos tres sitios (réplicas) considerando la variabilidad espacial a nivel de paisaje en cuanto a roca madre y estructura de la comunidad vegetal.



**Figura 44.** Criterios, indicadores y cuantificadores del suelo. Fuente: Elaboración propia.

El número de muestras de suelo a tomar debe cubrir la heterogeneidad espacial pero también dependerá del presupuesto que se tenga para realizar los análisis posteriores de suelo. Para la toma de muestras se usa un barreno de suelo a una profundidad de 20 cm - 30 cm, removiendo previamente la capa superficial de vegetación y hojarasca del punto de muestreo –un círculo de diámetro aproximado de 30 cm– y buscando mantener la integridad de la muestra. Cada muestra debe ir dentro de una bolsa plástica nueva y limpia y se registra la fecha, el lugar de colecta y el número de muestra. Luego se almacena en una nevera de poliestireno expandido con hielo hasta que puedan llevarse al laboratorio –se recomienda el Instituto Geográfico Agustín Codazzi y la Universidad Nacional sede Bogotá–.

Los cambios generados por las acciones de restauración se pueden evidenciar a largo plazo, y en muchos casos requiere de análisis especializados para interpretar los resultados en las trayectorias, lo cual puede elevar los costos. Aunque los resultados más exactos

los proporciona el análisis de laboratorio, existen también algunos muestreos sencillos que pueden realizarse en campo para determinar el estado de las propiedades del suelo (Tabla 8). De igual forma Pizano y Curiel (2015), presentan una serie de indicadores, cuantificadores y métodos para el monitoreo del suelo en procesos de restauración ecológica.

### Agua

El agua es uno de los elementos más significativos del páramo, la importancia de este ecosistema radica fundamentalmente en regular los flujos hídricos superficiales y subterráneos y prestar servicios ambientales. Estos ecosistemas han desarrollado un gran potencial para interceptar, almacenar y regular el agua, procesos que se relacionan directamente con la vegetación y los suelos, por esto en ocasiones la evaluación de este componente se da de manera indirecta.

La amplia transformación de los ecosistemas altoandinos ha generado importantes perturbaciones en el recurso hídrico, tanto en la cantidad como en la calidad de este, lo cual genera una disminución en el

**Tabla 8.** Cuantificadores y métodos de muestreo de suelos. Tomado de: Badía et al. (2016); Borja (2012).

Cuantificador	Definición	Método
Textura	Es una propiedad del suelo que se refiere a la abundancia relativa de distintas clases de partículas agrupadas según su tamaño: arena, limo y arcilla (Badía et al., 2016).	Uno de los métodos propuestos por Borja (2012) para determinar la textura del suelo se presenta en la Figura 45.
Densidad aparente	Se refiere a la relación entre la masa de un suelo y el volumen aparente que ocupa, que incluye el volumen que ocupan los poros. Permite hacer inferencias sobre el comportamiento hídrico del suelo –capacidad de almacenaje de agua, permeabilidad, entre otros– y sobre su función como hábitat –compactación, facilidad para la penetración de las raíces, apertura de galerías, entre otros–.	Un método rápido de medición utiliza un cilindro metálico que se clava en el suelo con la ayuda de un martillo, debe introducirse de manera perpendicular y sin compactar la muestra con el martillo. Se extrae el cilindro con un cuchillo y la muestra se introduce en una estufa a 105°C para determinar el peso seco del suelo. Medido el volumen del cilindro ( $V = \pi r^2 h$ ), se calcula la densidad aparente expresando el resultado en kg o g/m <sup>3</sup> . La densidad aparente del suelo se calcula como (Badía et al., 2016): $\text{Densidad aparente} = \frac{\text{Masa suelo seco (g)}}{\pi * R^2 * h}$
Contenido de humedad	Cantidad de agua en el suelo.	La estimación de la cantidad de agua en el suelo puede realizarse mediante la evaporación de esta mientras se cuantifica la pérdida de peso en el proceso. La diferencia de peso anterior y posterior al calentamiento permitirá obtener el contenido de humedad. Se toma una muestra de suelo con un cilindro metálico y se pone una pequeña cantidad (entre unos 10 a 30 gramos) en un recipiente metálico previamente pesado (T). Luego se pesa, para calcular el peso del suelo húmedo (Phúmedo). Posteriormente se coloca la muestra en la estufa a 105°C durante 24 horas. Pasado este tiempo se deja enfriar y se pesa de nuevo (Pseco). El contenido de humedad del suelo se expresa como porcentaje referido al peso de suelo seco, y se puede calcular según la expresión (Badía et al. 2016): $\text{Agua (\%)} = \frac{P_{\text{húmedo}} - P_{\text{seco}}}{P_{\text{seco}} - T} * 100$
Porosidad		Se toma una muestra de suelo en un cilindro metálico con precaución de no alterarla al introducirlo al suelo, el contenido ( $V_i$ ) se vacía en una probeta y se incorpora un volumen de agua aproximadamente igual ( $V_{H_2O}$ ), esto da un volumen final ( $V_f$ ). La diferencia entre el volumen final y el esperado ( $V_f - (V_i + V_{H_2O})$ ) se debe a la presencia de aire en el suelo –obviando los procesos de disolución–. La cantidad de aire puede expresarse mediante la siguiente expresión (Badía et al., 2016): $\text{Aire (\%)} = \frac{(V_f - V_{H_2O} - V_i)}{V_i} * 100$
Presencia de materia orgánica	La materia orgánica actúa sobre las propiedades físicas –agregación, porosidad, retención de agua, entre otros–, químicas –regulación del pH, capacidad de retención y liberación de nutrientes al mineralizarse, entre otros– y biológicas del suelo –abundancia y diversidad, solubilización y asimilación de nutrientes, entre otros–.	Para detectar la presencia de materia orgánica en el suelo se toma una muestra de suelo seco al aire, 10 gramos aproximadamente, y se humedece ligeramente con agua. A continuación, se aplican unas gotas de agua oxigenada. Si el suelo es muy orgánico se producirá una cierta efervescencia, hecho que no se produce si el suelo es pobre en materia orgánica (Badía et al., 2016).
pH		En un recipiente mezclar suelo seco y agua destilada en una proporción de 1:1. Mezclar suficiente suelo y agua, de manera que la determinación se pueda hacer en el agua que queda por sobre el material del fondo. Utilizar una cuchara para mezclar y tener cuidado de no tocar el suelo con las manos ya que esto podría alterar los valores del pH a determinar. Agitar muy bien de tal manera que el agua y el suelo se mezclen completamente. Introducir una tira de papel tornasol en el agua de la mezcla. Comparar el color que ha adquirido el papel tornasol con los patrones de color para determinar el valor de pH del suelo (Borja, 2012).

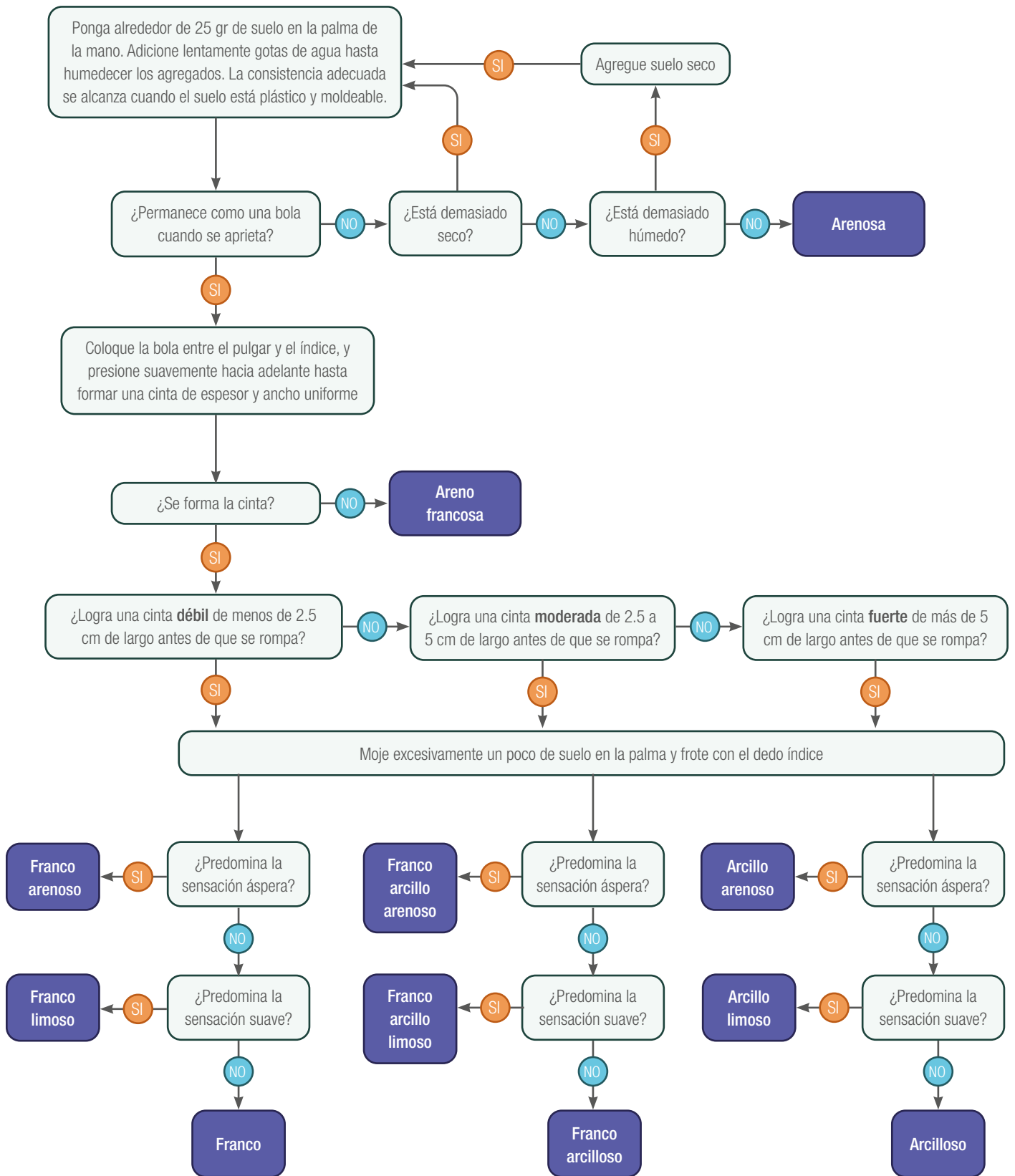


Figura 45. Método para la determinación de la textura del suelo.

Tomado de: Borja (2012).

acceso y disponibilidad para las plantas, y agudiza los conflictos sociales en torno a su uso y manejo. Este hecho genera la necesidad de desarrollar acciones de gestión para la conservación de los páramos, mediante el mejoramiento de las prácticas productivas, la declaración de áreas protegidas o restauración ecológica, entre otras.

Recientemente los procesos de restauración han sido asociados a la oferta de servicios ambientales en ecosistemas acuáticos, de acuerdo con Little y Lara (2010) para conservar o mantener cuencas en estados naturales o intervenidos, mejorando aspectos como prácticas de manejo de suelo, composición, densidad y tamaño de bosques. Muchas de las actividades de restauración que se realizan en los páramos buscan en el largo plazo, recuperar, mantener o mejorar la función hidrológica de estos ecosistemas; sin embargo, según García Herrán (2018) el monitoreo del agua en páramos es muy escaso y se ha identificado que no existen planes específicos para el monitoreo hidrológico en estos ecosistemas.

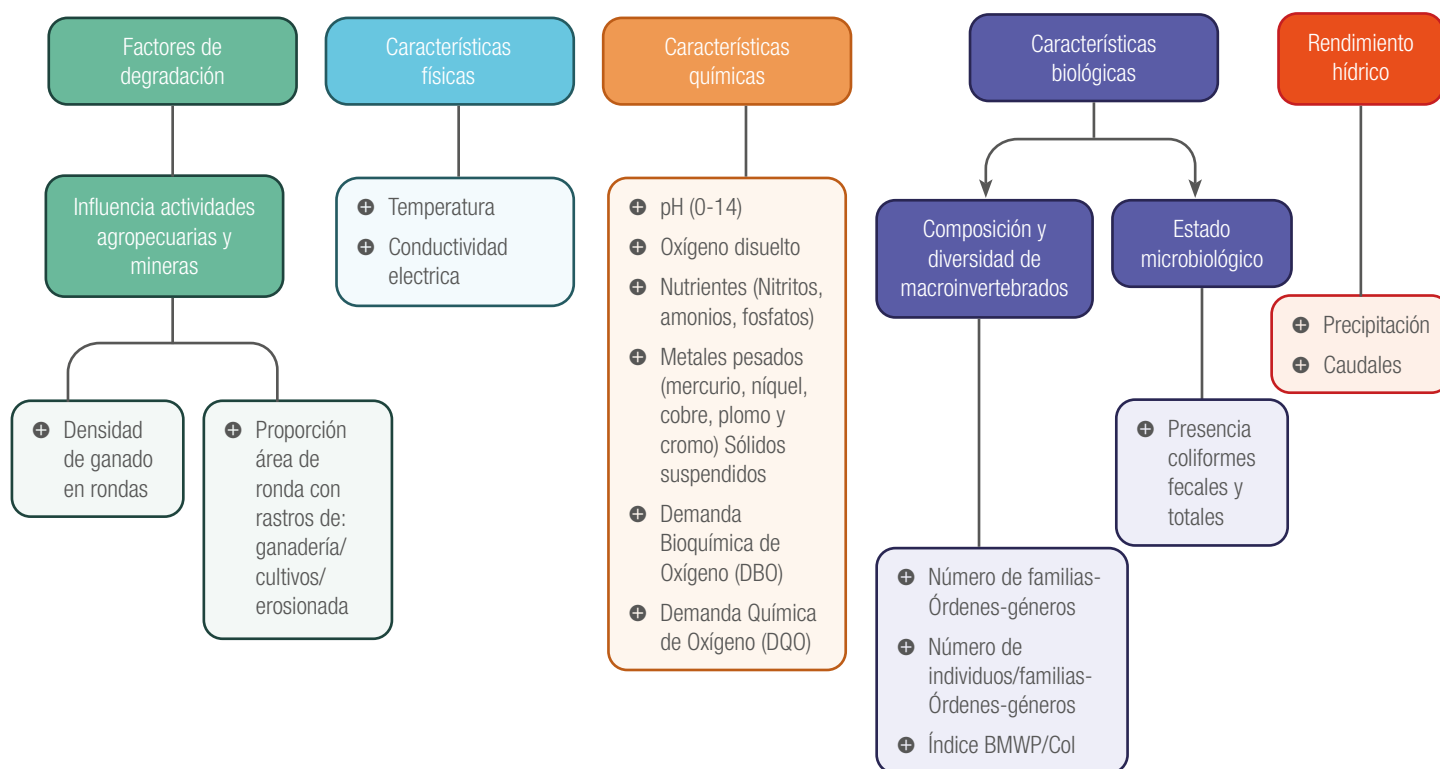
Dada la íntima relación entre la regulación hídrica y los páramos, los proyectos de restauración deben considerar escalas temporales y espaciales grandes que permitan conocer los efectos de las estrategias sobre esta función ecosistémica. Para ello debe considerarse

el impacto de la perturbación sobre el recurso hídrico teniendo en cuenta las condiciones típicas del páramo y factores como la cantidad de precipitación.

Ideam, Pabón y García (1996) reconocen como indicadores básicos del agua las propiedades físicas, químicas y biológicas, con las cuales es posible evaluar el estado, composición del agua, la dinámica de los procesos que hacen parte de la hidrosfera, y dar una valoración cuantitativa de estos elementos.

En Colombia existen instituciones con incidencia y responsabilidades en la gestión del recurso hídrico que van desde el nivel nacional con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible responsable de diseñar las políticas; el Ideam encargado de obtener, almacenar, analizar, estudiar, procesar, divulgar la información básica y hacer seguimiento a los recursos biofísicos de la nación. A nivel regional, las corporaciones autónomas regionales encargadas de la regulación ambiental y del control de la calidad del agua. Y, a nivel local, los municipios a través de las empresas de servicios públicos deben garantizar el abastecimiento del recurso hídrico. (Figura 46).

**Figura 46.** Criterios, indicadores y cuantificadores del agua. Fuente: Elaboración propia.



Por tanto, y considerando que los ecosistemas de páramos son la principal fuente abastecedora de agua en el país, cualquier actividad de restauración en el recurso hídrico, y por ende los beneficios que esta conlleve, podrá ser evaluada en diferentes niveles o escalas, y parte de la información relevante para monitoreo puede ser evaluada por algunas de estas instancias, o puede ser útil como punto de referencia para la línea base.

### Métodos de muestreo:

En su mayoría la toma de muestras, evaluación y estándares de monitoreo de aguas se han establecido para el consumo humano (Resolución 2115 de 2015), y, dado que gran parte de las poblaciones urbanas y rurales se proveen de estos ecosistemas, en este apartado se siguen estos preceptos y se deja a consideración del contexto de cada proyecto de restauración seguirlos.

El muestreo de agua debe estar diseñado para garantizar que las muestras tomadas sean representativas, para esto se debe tener en cuenta:

- a. **Sitios de muestreo:** la selección debe considerar la heterogeneidad del paisaje, incluir los sitios restaurados y que sean de interés de la comunidad. Para el muestreo debe incluirse las coordenadas con eventos y observaciones que se den al momento del muestreo –lluvias, vertimientos observables, presencia de basuras o ganado, aumento de caudal, entre otros–.
- b. **Aprestamiento:** antes de asumir el monitoreo de este componente es necesario definir claramente cómo serán tomadas las muestras, presupuesto disponible para materiales, análisis de laboratorio, personal y su disponibilidad, la capacitación del personal, el transporte, los costos de inversión, los costos de operación y mantenimiento, entre otros.
- c. **Toma de muestras:** existen procedimientos y formatos exigidos por los laboratorios acreditados por Ideam mediante la Resolución 2053 del 28 de septiembre de 2015.

En la Tabla 9 se presentan algunos métodos que pueden ser realizados *in situ*, los cuales no sustituyen los análisis de laboratorio, pero pueden contribuir con una evaluación del componente agua.

### Funciones ecológicas de evaluación rápida

Algunas funciones de los ecosistemas pueden ser monitoreadas de manera sencilla, replicable y estandarizada para permitir comparaciones en el tiempo y determinar si la restauración está logrando la recuperación de procesos ecológicos. Meyer et al. (2015) establecieron una metodología para evaluar once variables que en conjunto sirven como descriptores primarios del funcionamiento general de los ecosistemas terrestres. No obstante, Kollmann et al. (2016) sugieren incluir un grupo mínimo de variables debido a su relevancia y a que están asociadas a interacciones entre especies que subyacen el funcionamiento de los ecosistemas, pero que han sido escasamente estudiadas o reportadas en la literatura científica –p. ej. productividad, descomposición, polinización y herbivoría–.

Como regla general, y para facilitar comparaciones, se sugiere que las mediciones propuestas se hagan en las temporadas o estaciones de mayor productividad del sistema a evaluar. En la Tabla 10 se presentan los compartimentos ecosistémicos de interés (Meyer et al., 2015).

### Conclusiones

El monitoreo de áreas en proceso de restauración ayuda a identificar tanto el nivel de éxito de las acciones de restauración, el costo-beneficio de las técnicas y estrategias de restauración, así como aquellas actuaciones correctivas que se deben aplicar para lograr éxito. Además, el monitoreo retroalimenta la construcción de conocimiento técnico y práctico sobre restauración ecológica. Este protocolo sintetiza los aspectos mínimos para desarrollar el monitoreo de la restauración ecológica de ecosistemas terrestres paramunos. Es así como se presentan las plataformas y los métodos básicos de colecta y análisis de datos para el monitoreo de la vegetación, la fauna, el suelo y el agua, incluyendo criterios, indicadores y cuantificadores para cada uno.



**Tabla 9.** Cuantificadores y métodos de muestreo de agua.

Cuantificador	Método
pH	Uso pH-metro o mediante indicadores, ácidos o bases débiles que tienen diferente color según el pH, como el papel tornasol.
Conductividad eléctrica	Conductímetro.
Temperatura	Conductímetro, medidores multiparámetros o con termómetros de alcohol coloreado.
Oxígeno disuelto	Sensor de Oxígeno Disuelto.
Caudal	Molinete hidráulico portátil o un vertedero hidráulico.
Macroinvertebrados acuáticos	El análisis de macroinvertebrados se realiza mediante el Biological Monitoring Working Party (BMWP), que es un método simple y rápido para evaluar la calidad del agua, usando los macroinvertebrados como bioindicadores, ya que solo se requiere llegar hasta nivel de familia y los datos son cualitativos (presencia o ausencia) (Roldan-Pérez 2003, 2016).

**Tabla 10.** Métodos de muestreo de funciones ecosistémicas.

Relaciones	Funciones ecosistémicas asociadas	Método
Plantas y ciclos de elementos	Productividad primaria de biomasa aérea	Colección de muestra de vegetación herbácea en área conocida para secar y determinar la biomasa seca.
	Productividad primaria de biomasa subterránea	Extracción de una muestra de suelo de volumen conocido y luego lavar raíces para determinar la biomasa seca.
	Fertilidad del suelo	Colección de muestras de suelo y posterior realización de mediciones disponibles en kits de estudio de suelos.
	Disponibilidad de agua	Colección de muestras de suelo y posterior realización de ensayos de sedimentación para determinar textura del suelo.
Redes tróficas de organismos saprófagos	Descomposición	Descomposición de sustratos estandarizados –p. ej. madera o bolsas de té– y con peso conocido que son enterrados en el suelo por un tiempo determinado tras el cual se mide la pérdida de masa seca. Véase adicionalmente Keuskamp et al. (2013) para detalles del índice de descomposición de bolsas de té.
	Productividad secundaria de biomasa subterránea	Extracción de insectos del suelo presentes en una muestra de suelo de volumen conocido y luego estimación de la biomasa fresca y seca.
Interacciones asociadas a las relaciones plantas-consumidores	Productividad secundaria de biomasa aérea	Uso de succionadores para capturar insectos presentes en un área definida del sitio de estudio y luego estimación la biomasa fresca y seca.
	Herbivoría de vertebrados	Se estima a partir de la diferencia en biomasa producida entre parcelas cercadas y no cercadas.
	Herbivoría de invertebrados	Detección y estimación de daño foliar en una muestra de biomasa aérea conocida colectada en campo.
	Fito infecciones	Detectadas en una muestra de biomasa aérea colectada en campo.
	Predación de invertebrados	Estimación de la tasa de remoción de presas estandarizadas –p. ej. áfidos, adheridos a una superficie expuesta en el campo–.
	Polinización	Uso de platos-trampa de color azul, amarillo y blanco UV para estimar número, diversidad y biomasa de insectos polinizadores.
Dispersión de semillas	Estimación de la tasa de remoción de semillas, usando semillas estándar dispuestas en cuadrículas sobre una superficie expuesta en el campo.	

## CAPÍTULO

## 07

# Lineamientos para el monitoreo de rasgos funcionales de la vegetación de páramo

- ⊕ Alcance de la aproximación funcional en el monitoreo
- ⊕ Selección de rasgos funcionales como indicadores en el monitoreo
- ⊕ Selección de especies e individuos para la toma de información
- ⊕ Colecta y medición de los rasgos funcionales como indicadores para el monitoreo de la restauración ecológica
- ⊕ Colecta de rasgos foliares
- ⊕ Análisis de la información
- ⊕ Conclusiones



Este capítulo presenta unos lineamientos generales para incluir los rasgos funcionales de las plantas como indicadores en el monitoreo a la restauración del páramo. Estos lineamientos buscan entender el alcance de esta aproximación ecológica, presentar algunas consideraciones para la selección de los rasgos funcionales y mostrar la metodología para la colecta y medición de los rasgos funcionales. Además, a lo largo del texto, se presentan referencias bibliográficas con información más detallada para que sea consultada por él y la lectora de este libro.

### Alcance de la aproximación funcional en el monitoreo

Monitorear el páramo mediante los rasgos funcionales significa cuantificar y analizar las características de las plantas que son utilizadas como indicadores de procesos ecológicos más complejos (Lavorel y Garnier, 2002). No todas las características de las plantas son consideradas rasgos funcionales, únicamente aquellas características morfológicas, fisiológicas o fenológicas que guardan relación con el desempeño biológico de las plantas se clasifican como rasgos funcionales (McGill et al., 2006) (Cuadro 6). Es decir, los rasgos funcionales son indicadores de los procesos biológicos claves para los organismos, por ejemplo, el crecimiento, la nutrición, la respiración y la reproducción. Estos procesos y funciones biológicas representan diversas estrategias que las plantas disponen para su supervivencia. De manera que, al investigar los rasgos funcionales, se pueden identificar la variabilidad de las estrategias de las plantas en cuanto a su crecimiento, nutrición, dispersión y reproducción en el ecosistema paramuno.

Al utilizar este enfoque, es importante considerar que los rasgos funcionales de las plantas están influenciados por las condiciones bióticas y abióticas del ecosistema. Es decir, que los factores bióticos –p. ej. interacción entre plantas, la interacción con polinizadores

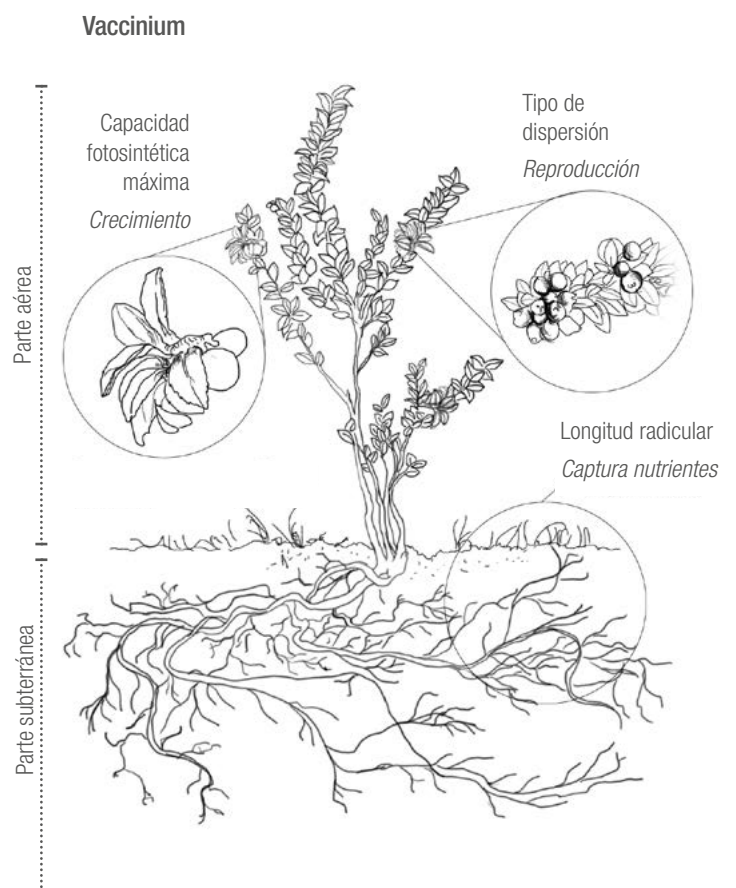
**Figura 47.** Representación de los rasgos funcionales medidos en la parte aérea –capacidad fotosintética máxima en la hoja y el tipo de dispersión– y en la parte subterránea –longitud radicular– y su relación con los procesos ecológicos de una planta de páramo. Ilustración: Cristian Jiménez.



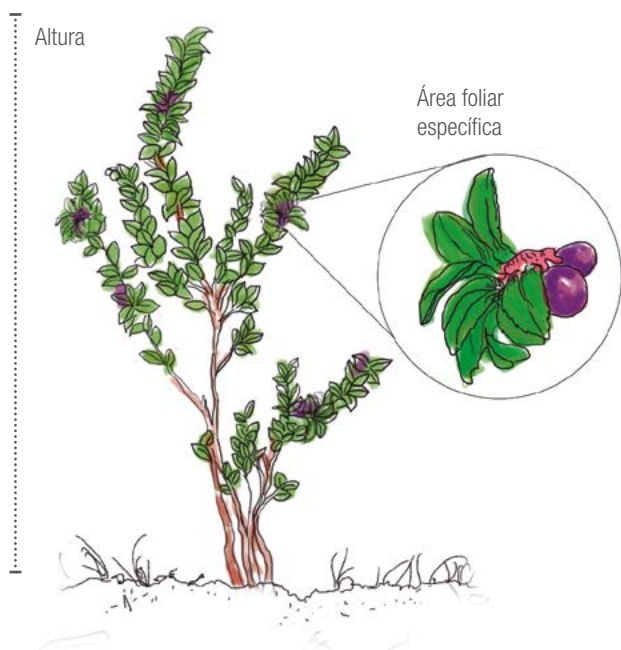
#### Cuadro 6. ¿Qué son los rasgos funcionales?

Los rasgos funcionales son características morfológicas –p. ej. forma de crecimiento–, fisiológicas –p. ej. capacidad fotosintética máxima– y fenológicas –p. ej. tiempo de floración– que guardan relación con las estrategias de las plantas en cuanto a su crecimiento, nutrición, reproducción y longevidad (Figura 47).

Los rasgos funcionales se miden a nivel individual, se pueden tomar en la parte aérea de la planta, en sus hojas, tallo, y órganos-sistemas reproductivos o en la parte subterránea como la raíz –p. ej. longitud radicular– y órganos de almacenamiento radicular. Los rasgos medidos u observados pueden ser descritos en categorías –p. ej. formas de crecimiento como hierbas, arbustos, pastos– o en valores numéricos continuos –p. ej. altura total, área foliar–.



## Individuo



## Comunidad



**Figura 48.** Relación entre los rasgos funcionales medidos a nivel de individuo —altura y área foliar específica— que a nivel de comunidad pueden informar sobre la producción de biomasa, cuya información a nivel de ecosistema se relaciona con funciones claves del páramo como el almacenamiento de carbono, la capacidad hídrica del suelo y la protección del suelo. Ilustración: Cristian Jiménez.

y dispersores— y los factores abióticos —p. ej. clima, la disponibilidad de nutrientes del suelo— actúan como filtros ambientales y seleccionan a las plantas que tengan ciertos rasgos funcionales que les permitan sobrevivir, crecer y colonizar condiciones ambientales específicas (Keddy, 1992). Por ejemplo, en el páramo las bajas temperaturas promedio anuales, los cambios bruscos de temperatura durante el día y las condiciones del suelo hacen que las plantas presenten rasgos funcionales relacionados con estrategias de conservación de recursos, es decir, son plantas que presentan un crecimiento lento y una mayor longevidad, lo que permite que estas especies puedan sobrevivir y establecerse en el páramo. Durante la recuperación del páramo, se espera que muchas de las condiciones ambientales cambien a lo largo del tiempo; por esta razón, evaluar

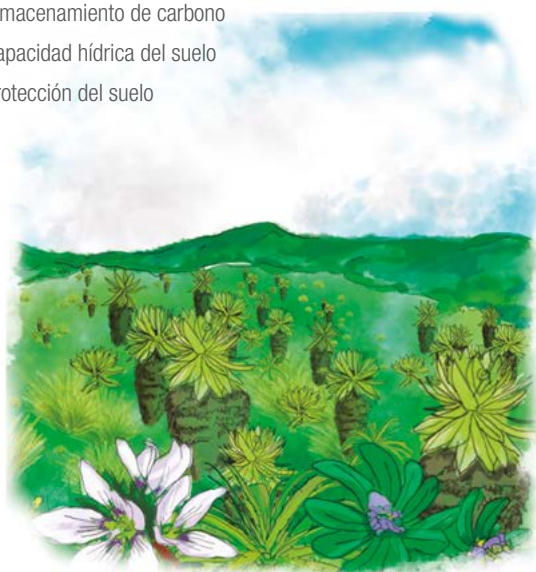
los rasgos funcionales junto con las condiciones ambientales, puede ayudar a entender cómo los cambios ambientales contribuyen o no en el establecimiento, crecimiento y reproducción de las plantas después de implementar las acciones de restauración.

Además, utilizar esta aproximación podría esclarecer cómo la información de los rasgos funcionales colectada a pequeñas escalas —a nivel de poblaciones o comunidades vegetales— se relaciona con las funciones y procesos a nivel del ecosistema (Lavorel y Garnier, 2002). Esto se fundamenta en que los rasgos funcionales de las plantas representan procesos ecológicos que, medidos u observados en varias especies y en distintos sitios de muestreo, pueden representar lo que sucede a nivel de comunidad y a nivel de ecosistema (Figura 48). De esta manera, si los objetivos de la restauración están encaminados a recuperar ciertas funciones del páramo, al monitorear los rasgos funcionales de las plantas se puede monitorear también los cambios a nivel estructural y funcional que inciden, en este caso, sobre las funciones ecosistémicas del páramo.

En resumen, los rasgos funcionales pueden ser utilizados como indicadores de:

## Ecosistema

Almacenamiento de carbono  
Capacidad hídrica del suelo  
Protección del suelo



- a. Los cambios en las estrategias de las plantas en cuanto a su crecimiento, nutrición y reproducción después de implementar la restauración en el páramo.
- b. Cómo los cambios en las condiciones ambientales tanto abióticas como bióticas afectan las respuestas funcionales de las plantas durante la recuperación del páramo.
- c. Cómo los rasgos funcionales impactan los procesos y funciones ecosistémicas del páramo a lo largo de la recuperación de este ecosistema.

## Selección de rasgos funcionales como indicadores en el monitoreo

Para la selección de los rasgos funcionales como indicadores es importante tener claridad en lo que se plantea dentro del objetivo de monitoreo, lo cual es clave para esclarecer cuáles variables serán medidas u observadas en campo, es decir, si la medición solo incluye el componente vegetal, o si también incluye mediciones en variables del suelo, del clima, el terreno, entre otros. En este sentido, los rasgos funcionales deben guardar relación con el enfoque planteado en el

objetivo del monitoreo, ya sea que se analicen las estrategias de las plantas, la relación con las condiciones ambientales o bien con las funciones del ecosistema. Para entender esta relación y facilitar la selección de rasgos funcionales, en la Tabla 11 se muestran algunos rasgos funcionales y su relación con los procesos ecológicos que representan, las condiciones ambientales que podrían influenciarlos y los posibles procesos ecosistémicos que afectan.

## Selección de especies e individuos para la toma de información

### ¿Qué especies de plantas seleccionar para medir los rasgos funcionales?

La selección de las especies de plantas a las cuales se medirá y observará los rasgos funcionales depende del objetivo del monitoreo, en el cual puede estar definido si las observaciones se realizarán a un conjunto de especies previamente definidas o a la comunidad de plantas registradas en los sitios restaurados.

En el primer escenario, las especies de interés para el monitoreo pueden estar definidas por ser especies de importancia para las comunidades locales, porque son especies que aportan mayormente biomasa, por ser especies endémicas, o especies que han sido utilizadas como parte de estrategias de enriquecimiento vegetal. En este caso, los procesos de restauración enfocarán los esfuerzos a utilizar dichas especies y, por lo tanto, estas mismas especies serán utilizadas para la colecta de rasgos funcionales.

En el segundo caso, si el monitoreo contempla hacer un seguimiento a nivel de comunidad vegetal, se puede seleccionar todos los individuos de plantas que se registren en parcelas o cuadrantes de muestreo o bien seleccionar únicamente las especies más abundantes registradas en estos cuadrantes. Para determinar cuáles especies son las más abundantes es necesario conocer la composición de especies de las parcelas o cuadrantes y estimar cuántos individuos –número, densidad o porcentaje de cobertura– hay por cada especie registrada. La estimación de la cobertura de cada especie registrada representa el porcentaje que ocupa cierta especie dentro de área del cuadrante. También se puede contar manualmente el número de individuos por cada especie reconocida



**Tabla 11.** Relación entre rasgos funcionales de las plantas, los procesos ecológicos que representan, los factores climáticos que los influyen y los posibles efectos en los procesos del ecosistema. La literatura presentada brinda información más detallada sobre los aspectos mencionados en cada componente.

Rasgo funcional	Proceso	Respuesta a condiciones ambientales	Efecto en los procesos del ecosistema	Literatura
<b>Rasgos de historia de vida</b>				
Forma de crecimiento (Categorico)	Acumulación de carbono.	Temperatura, disponibilidad de luz, disturbios.	Fijación de carbono, biomasa.	Cogollo-Calderón et al. 2020; Cabrera et al. 2018; Walker et al. 2015; Vargas 2002; Vargas et al. 2002.
Longevidad (Categorico)	Tasa de crecimiento, acumulación de carbono, biomasa.	Temperatura, radiación solar, disponibilidad de nutrientes.	Fijación de carbono.	Selaya et al. 2008.
<b>Rasgos foliares</b>				
Área foliar específica (Continuo)	Tasa relativa de crecimiento, capacidad fotosintética, acumulación de carbono, biomasa.	Disponibilidad de nutrientes en el suelo, disponibilidad de luz, temperatura, humedad relativa.	Fijación de carbono, producción de biomasa, productividad primaria.	Cabrera y Duivenvoorden 2020; Cogollo-Calderón et al. 2020; Dwyer et al. 2014; Almeida et al. 2013; Schöb et al. 2012; Llambí et al. 2003; Poorter y de Jong 1999; Hunt y Cornelissen 1997.
Contenido foliar de materia seca (Continuo)	Conservación de nutrientes, tasa de descomposición, tasa relativa de crecimiento, asignación de biomasa.	Disponibilidad de nutrientes en el suelo.	Descomposición de materia orgánica, ciclado de nutrientes.	
Concentración de nutrientes foliares –p. ej. nitrógeno, fósforo, carbono– (Continuo)	Conservación de nutrientes, tasa de descomposición, fijación de carbono, tasa relativa de crecimiento.	Disponibilidad de nutrientes en el suelo, descomposición.	Regeneración, acumulación de carbono, ciclado de nutrientes.	
<b>Rasgos estructurales</b>				
Altura vegetativa de la planta (Continuo)	Tasa de crecimiento, acumulación de carbono, biomasa.	Disponibilidad de luz y nutrientes, temperatura.	Fijación de carbono.	Cabrera y Duivenvoorden 2020; Cogollo-Calderón et al. 2020.
<b>Rasgos radiculares</b>				
Longitud radicular específica (Continuo)	Tasa de absorción de nutrientes, tasa de crecimiento, biomasa.	Condiciones físico-químicas del suelo, temperatura del suelo, interacciones a nivel subterráneo.	Fijación de carbono, biomasa subterránea.	De Long et al. 2019; von Haden y Dornsuch 2017.
Longitud/profundidad de la raíz (Continuo)	Tasa de absorción de nutrientes, tasa de crecimiento, biomasa, capacidad de rebrote.	Condiciones físico-químicas del suelo, temperatura del suelo, interacciones a nivel subterráneo.	Fijación de carbono, biomasa subterránea.	
<b>Rasgos reproductivos</b>				
Masa de la semilla (Continuo)	Fecundidad, tasa de dispersión, tasa de regeneración, establecimiento.	Condiciones ambientales, autoecología.	Germinación de plántulas, recambio de especies.	Cogollo-Calderón et al. 2020; Vargas y Pérez 2014; Melcher et al. 2009; Melcher et al. 2004.
Estrategias de polinización y dispersión (Categorico)	Regeneración, fenología.	Conectividad, temperatura, velocidad del viento, precipitación.		
Clonalidad (Categorico)	Regeneración, tasa de colonización, crecimiento.	Condiciones ambientales.	Germinación, regeneración.	

en la parcela. De esta manera se puede establecer cuáles son las especies que corresponden al 80 % de la abundancia y de estas especies se coleccionarán los rasgos funcionales. Trabajar con las especies más abundantes se fundamenta en la teoría de Grime (1998) en la cual se asume que estas especies son las que influyen fundamentalmente los procesos ecosistémicos; sin embargo, muchas especies raras y especies menos abundantes pueden ser especies claves para mantener la diversidad a nivel funcional del páramo (Figura 49).

En cualquiera de los dos casos mencionados anteriormente, es indispensable marcar y asignar un código de campo a los individuos de plantas seleccionados para posteriores mediciones, así como también registrar la abundancia de las especies de plantas seleccionadas, pues uno de los aspectos más importantes durante la sucesión del páramo es la variación de la abundancia relativa de las especies de plantas (Cuadro 7).

**Figura 49.** La vegetación del páramo en distintas etapas de recuperación y sucesión. En las etapas iniciales las plantas se caracterizan por un rápido crecimiento, se presenta una menor diversidad taxonómica y funcional y menor variedad de formas de crecimiento. Mientras que en el páramo conservado las plantas poseen características de crecimiento lento y el ecosistema presenta una mayor diversidad taxonómica, funcional y de formas de crecimiento. Ilustración: Cristian Jiménez.



**Cuadro 7.** Los páramos cuentan con varios estudios sobre los cambios que diferentes tipos de perturbaciones causan en la vegetación y en el suelo de este ecosistema (Vargas, 1997; Jaimes y Sarmiento, 2002; Molinillo y Monasterio, 2002; Vargas, 2002; Vargas et al., 2002; Llambí et al., 2003; Premauer y Vargas, 2004; Beltrán y Lizcarro, 2013). La sucesión en el páramo se caracteriza por una variación en la abundancia relativa de las especies, más que un reemplazo o recambio de especies como sucede en otros ecosistemas (Llambí et al., 2003). Igualmente, a lo largo de la sucesión se presenta un cambio en las estrategias funcionales de las plantas. En etapas tempranas de la sucesión, las plantas tienden a mostrar rasgos funcionales que se relacionan a estrategias adquisitivas –valores altos en área foliar específica, menor contenido foliar de materia seca– mientras que en etapas tardías las especies presentan rasgos funcionales asociados a estrategias conservativas –menor área foliar específica, mayor contenido foliar de materia seca– (Cabrera, 2019; Llambí et al., 2003) (Figura 48). Además, en etapas tempranas de la sucesión hay una mayor variabilidad de los rasgos funcionales a nivel de especie –variabilidad intraespecífica– contrario a lo que ocurre en etapas tardías (Cabrera, 2019).

Etapas de  
recuperación del  
páramo



Etapla inicial



Etapla intermedia



Páramo conservado

### ¿Es mejor seleccionar plantas adultas o plantas jóvenes?

Los estudios de rasgos funcionales se basan principalmente en la medición de rasgos en plantas adultas (Cornelissen et al., 2003). Este es el caso para estudios donde se trata de entender y explicar lo que sucede en poblaciones o comunidades vegetales que ya están establecidas en el ecosistema. Este no sería el caso para el monitoreo a procesos de restauración en el páramo, probablemente las áreas de muestreo tendrán vegetación en etapas tempranas de crecimiento, es decir, habrá un mayor porcentaje de plántulas que de plantas adultas. Por esto, las plántulas y las plantas en crecimiento pueden incluirse en el muestreo. Los procesos de crecimiento y desarrollo de las plantas son importantes para la restauración, pues permiten entender cómo las variaciones estructurales y funcionales se relacionan en el tiempo, o cómo las estrategias de restauración inciden sobre estos aspectos del ecosistema. Sin embargo, durante las distintas etapas de desarrollo, las plantas presentan cambios estructurales que pueden afectar también la composición de los rasgos funcionales (véase Derroire et al., 2018; Messier et al., 2017; Umaña et al., 2015) lo que incrementa la variabilidad del rasgo. Por esta razón, es necesario registrar el estado de desarrollo y crecimiento en el que se encuentren las plantas. De esta manera, al analizar la información se puede distinguir entre la variabilidad que explica el desarrollo de la planta y la variabilidad debido a otros factores como, por ejemplo, factores ambientales. Se sugiere incluir esta información en los registros de campo, anotando la etapa de crecimiento en que se encuentra la vegetación, ya sea al conocer el tiempo de vida de la vegetación en el área –en días, semanas o años– o bien estimando su edad teniendo en cuenta la altura y el diámetro del tallo.

### Colecta y medición de los rasgos funcionales como indicadores para el monitoreo de la restauración ecológica

A continuación, se presenta la metodología utilizada para coleccionar, medir y procesar la información de seis rasgos funcionales que pueden ser importantes indicadores de procesos y dinámicas ecológicas claves para el monitoreo a procesos de restauración del páramo. En el caso de seleccionar otros rasgos funcionales se puede consultar los protocolos publicados por Salgado et al. (2016) y Pérez-Harguindeguy et al. (2013).

### Rasgos foliares

#### Área foliar específica (AFS)

El AFS es la relación entre área foliar dividido por la unidad de masa seca foliar (Lambers y Poorter, 1992). En los páramos los valores de AFE tienden a ser bajos con relación a otros sistemas de alta montaña y a otros sistemas tropicales (Diemer, 1998a, b; Llambi et al., 2003; Cabrera y Duivenvoorden, 2020). Los valores bajos de AFE representan estrategias conservativas de las plantas, cuya prioridad es la captura y retención de carbono presentando a su vez bajas tasas de crecimiento relativo (Körner, 2003).

**Unidades:** mm<sup>2</sup>/mg; cm<sup>2</sup>/g ó m<sup>2</sup>/kg

**Indicador:** la capacidad de adquirir y explotar recursos (Lambers y Poorter, 1992; Poorter y de Jong, 1999; Poorter et al., 2009). La tasa relativa de crecimiento, el potencial fotosintético, la acumulación de carbono foliar, la longevidad (Cornelissen et al., 2003).

**Materiales:** bolsas plásticas herméticas, marcadores permanentes, bolsas de papel, escáner, horno de secado, balanza analítica.

#### Contenido foliar de materia seca (CFMS)

El CFMS es la relación entre el peso seco foliar (mg) dividido entre su peso fresco saturado (g) (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Para la mayoría de especies de páramo, se espera que los valores de CFMS sean altos, ya que las plantas con estrategias conservativas tienden a acumular mayor cantidad de masa foliar.

**Unidades:** mg/g ó mg.g<sup>-1</sup>

**Indicador:** estrategias de las plantas para la adquisición y uso de recursos, tasa de descomposición de materia orgánica (Garnier et al., 2007), crecimiento de la planta, longevidad de la hoja y ciclaje de nutrientes (Pérez-Harguindeguy et al., 2013).

**Materiales:** bolsas plásticas herméticas, marcadores permanentes, bolsas de papel, horno de secado, balanza analítica.

#### Concentración foliar de Nitrógeno o Fósforo (CFN y CFF)

Estos rasgos son una medida de la concentración total de nitrógeno y fósforo en las hojas por unidad de masa foliar seca (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Algunos valores reportados de nitrógeno foliar para



especies de páramo se encuentran en las publicaciones de Diemer (1998a, b).

**Unidades:** mg.g<sup>-1</sup>

**Indicador:** disponibilidad de nutrientes en el suelo, la capacidad de la planta de usar recursos y la palatabilidad de la planta –disposición para ser consumida por herbívoros– (Pérez-Harguindeguy et al., 2013; Garnier et al., 2007). Las plantas fijadoras de nitrógeno tienden a presentar valores de nitrógeno y fósforo foliares más altos que otras especies (Pérez-Harguindeguy et al., 2013).

**Materiales:** bolsas plásticas herméticas, marcadores permanentes, bolsas de papel, balanza analítica, hor-

no de secado, laboratorio especializado para procesar muestras foliares.

**Colecta de rasgos foliares:** la colecta de rasgos foliares implica remover material vegetal de los sitios de muestreo. Con el fin de que este método “destrutivo” tenga el menor impacto tanto en el ecosistema como en el monitoreo a la restauración, en el Cuadro 8 se presentan algunas consideraciones y alternativas para el muestreo.

Para colecta de rasgos foliares, se sugiere utilizar las mismas hojas para la estimación del área foliar específica (AFE) y el contenido foliar de materia seca (CFMS).



**Cuadro 8.** Consideraciones para la colecta de rasgos funcionales que implican métodos destructivos.

La colecta de los rasgos foliares se realiza mediante métodos “destructivos”, es decir, que se remueven cierto número de las hojas de las plantas en el páramo y se trasladan a su lugar de procesamiento en el laboratorio. Por ejemplo, en campo se observa que algunas especies de páramo y las plántulas en general poseen un bajo número de hojas que puede variar entre una y cinco hojas. Si se remueven todas las hojas de una planta esta quedaría sin tejido fotosintético, lo cual puede retardar el crecimiento o marchitar la planta, y puede tener implicaciones negativas tanto para el proceso de recuperación del páramo como para el monitoreo. Es importante tener en cuenta que *nunca se debe dejar a ninguna planta sin hojas*. Para que la colecta de los rasgos foliares en campo tenga el mínimo impacto se presentan, a continuación, algunas alternativas de colecta durante el muestreo.

- **Colecta de muestras de individuos fuera de la parcela.**  
Si en el muestreo está definido el establecimiento de parcelas, una alternativa es coleccionar hojas de individuos que estén alrededor de la parcela, dentro de un radio hasta 1 m. Se puede coleccionar una hoja por individuo hasta completar el número de hojas deseado o el peso fresco de hojas ne-

cesario para cuantificar los rasgos foliares. Esto se puede realizar cuando: a) los individuos dentro de la parcela no tengan muchas hojas; b) no haya suficientes individuos de una especie dentro de la parcela, y c) cuando las plantas dentro de la parcela presenten daños en las hojas.

- **Colecta de muestras aleatorias compuestas.**  
Si el muestreo no se realizara dentro de parcelas, se puede coleccionar las hojas de varios individuos dentro de un área determinada. Se recomienda elegir los individuos de manera aleatoria. Se colecciona una hoja por individuo, hasta alcanzar el número de hojas establecido dentro del muestreo, sin dejar a las plantas sin hojas.

En cualquiera de los casos, se debe tener certeza que los individuos pertenezcan a una misma especie. Se sugiere buscar la asesoría de una persona local o de la academia que sepa identificar las distintas especies, o bien llevar a campo un catálogo de las especies de páramo. Se puede también tomar fotos claras como referencia, y si los individuos están en estado reproductivo se sugiere tomar una foto en detalle de la flor o el fruto.

Asimismo, se sugiere tomar la información de la altura de la planta de la cual se colecciona la hoja y, en lo posible, marcar el individuo –p. ej. cuerdas de nylon por colores alrededor del tallo o en una ramificación sin apretar demasiado– ya que es información importante para el posterior análisis.

Para el contenido foliar de nitrógeno y fósforo (CFN y CFF) se requiere entre 2 gr y 5 gr de masa seca por muestra (Pérez-Harguindeguy et al., 2013), por lo tanto se necesita coleccionar una mayor cantidad de hojas en campo –se pueden incluir las hojas usadas para AFE y CFMS–. Se recomienda coleccionar una muestra compuesta, es decir, varios individuos de la misma especie por sitio de estudio o parcela.

Se recomienda coleccionar hojas totalmente desarrolladas y expandidas y, en lo posible, hojas sin daño por herbivoría y otros daños físicos (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Si las muestras presentan algún tipo de daño, es importante reportarlo ya que, por ejemplo, el contenido foliar de materia seca se ve influenciado negativamente por el daño foliar que la hoja presente. Para el AFE y el CFMS se sugiere al menos coleccionar tres hojas por individuo; en los casos donde la especie tenga una sola hoja, se recomienda buscar otros individuos (Cuadro 8). Las muestras deben ser almacenadas preferiblemente en bolsas de cierre hermético con papel absorbente humedecido para evitar la desecación durante el transporte (Salgado-Negret, 2014; Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Las muestras deben almacenarse en oscuridad y en lo posible ser conservadas a bajas temperaturas en neveras hasta su procesamiento (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Es importante que las bolsas estén debidamente marcadas, teniendo en cuenta localidad, número de parcela y código de campo de las especies vegetales, de manera que se pueda relacionar la información tomada en campo con la procesada en laboratorio.

#### ***Medición de Área Foliar Específica (AFE)***

En el laboratorio o estación biológica, las hojas deben rehidratarse por un periodo entre 4 a 6 horas. Posteriormente, las hojas se escanean en fresco procurando no sobreponer una con otra y extendiéndolas completamente, sin aplastarlas (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Se recomienda realizar este proceso con una resolución mínima de 600 ppp (puntos por pulgada) pues los contornos de las hojas deben estar definidos y, además, las hojas pequeñas con una baja resolución corren el riesgo de producir imágenes con poca definición. Se recomienda usar siempre una escala de referencia para calibrar la imagen en el momento de

procesarla (Glozer, 2008). Las imágenes deben ser guardadas con un código que permita relacionar la información posteriormente.

Para la medición del área foliar se sugiere usar el software libre ImageJ (Schneider et al., 2012), este programa permite la medición de áreas de forma automatizada o manualmente. Para el procedimiento manual, la imagen debe ser calibrada, se convierte a color binario (blanco y negro) y finalmente se mide el área generada por el contorno de la hoja en el contraste generado por el blanco y negro. El programa genera una tabla que puede ser almacenada en formato .xls. Una vez las hojas son escaneadas, se almacenan individualmente en bolsas de papel debidamente marcadas para luego llevarlas a un horno de secado donde se deshidratan a 70 °C por 72 h o a 80 °C por 48 h, hasta que pierdan completamente la humedad (Salgado-Negret, 2014; Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Posteriormente, las hojas se pesan individualmente y se recomienda usar balanzas de precisión ( $\pm 0.0001$ g). Si no es posible registrar el peso seco de las hojas individuales, se recomienda agrupar las hojas de un mismo individuo (3 o 5 hojas) (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Sin embargo, es necesario agrupar también el valor del área de las hojas/individuo de la misma manera.

#### ***Medición de Contenido Foliar de Materia Seca (CFMS)***

Se sugiere utilizar las mismas hojas que se utilizan para calcular el AFS. Las hojas deben ser rehidratadas entre 4 y 6 horas o hasta alcanzar el punto de saturación hídrica (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Las hojas se pesan individualmente para obtener el peso fresco saturado en gramos. Posteriormente, las hojas se secan a 70 °C por 72 h o a 80 °C por 48 h. Las hojas se pesan individualmente en una balanza de precisión –se recomienda usar balanzas de  $\pm 0.0001$  g– y se determina su peso seco en miligramos (Pérez-Harguindeguy et al., 2013).

#### ***Medición de Contenido Foliar de Nitrógeno y Contenido Foliar de Fósforo***

En el laboratorio, las muestras se almacenan en bolsas de papel y se llevan a un horno de secado a 70 °C por 72 horas o a 80 °C por 48 horas (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Posteriormente se muele cada una de las muestras evitando la contaminación; estas

muestras pueden ser almacenadas hasta por un año en condiciones de baja humedad (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). El análisis de N y P foliar se pueden realizar usando métodos de digestión ácida o calcinación. Uno de los métodos más utilizados es Kjeldahl seguido de un análisis colorimétrico, para fósforo foliar se recomienda una digestión húmeda ácida seguida de una formación del complejo de azul de fosfomolibdeno para una mayor precisión (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Se recomienda mencionar el método utilizado en el laboratorio y es necesario que sea una metodología estandarizada y certificada –p. ej. IGAC–.

### *Rasgos de historia de vida*

#### **Altura vegetativa de la planta**

La altura de la planta es la distancia entre el nivel del suelo y el límite superior del tejido fotosintético principal, no incluye estructuras reproductivas (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). En comunidades vegetales ya establecidas se puede utilizar también la altura máxima de la especie, que se estima como el valor máximo de altura vegetativa que alcanza una especie, registrado en una zona determinada (Pérez-Harguindeguy et al., 2013).

**Unidades:** metros

**Indicador:** captura de luz, vigor competitivo, capacidad de establecimiento y longevidad (Pérez-Harguindeguy et al., 2013; Westoby, 1998).

**Materiales:** cinta métrica.

**Medición de altura de la planta:** se mide desde el nivel del suelo hasta la parte vegetativa superior de la planta, sin incluir las estructuras reproductivas. En el caso de las rosetas basales, la altura de la planta es la longitud de las rosetas (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Para las especies de hierbas y arbustos postrados, la altura está representada por la longitud de la planta. Se sugiere medir al menos 5 individuos por parcela o 25 individuos por especie en cada sitio de muestreo.

### *Rasgos reproductivos*

#### **Estado reproductivo**

Este rasgo se observa periódicamente ya sea en los individuos marcados o en la vegetación en general, para el registro se sugiere anotar la fecha de observación. Las categorías tanto de floración como de fructificación

pueden estar acompañadas de información complementaria o más específica; por ejemplo, si la planta presenta inflorescencia, se puede describir el porcentaje de flores abiertas y cerradas, o la posición de las flores abiertas en contraste con las flores cerradas. Lo mismo se aplica para los frutos.

**Unidades categóricas:** floración –botón, parcialmente abierta/desarrollada, totalmente abierta/desarrollada–. Fructificación –fruto inmaduro, parcialmente maduro, totalmente maduro–.

**Indicador:** estado de desarrollo de la planta, vigor de la planta, estado del ecosistema.

**Materiales:** hoja de registro, cámara fotográfica.

#### **Masa de la semilla**

La masa de la semilla hace alusión al peso seco promedio de la semilla de una especie (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Generalmente, las semillas pequeñas se dispersan a mayores distancias que las semillas de mayor tamaño, a menos que las semillas grandes sean dispersadas por vectores.

**Unidades:** miligramos (mg)

**Indicador:** el vigor de la planta, disponibilidad de nutrientes, capacidad de germinación de la planta y con la capacidad de dispersión.

**Materiales:** bolsas plásticas herméticas, papel absorbente, bolsas de papel, marcador permanente, horno de secado, balanza analítica.

**Colecta masa de la semilla:** se sugiere, en lo posible, coleccionar las semillas de los mismos individuos que se han utilizado para la medición de otros rasgos funcionales y que están marcados en campo. Las semillas deben estar maduras y vivas (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). En el páramo, muchas semillas son pequeñas y livianas, por lo que se recomienda coleccionar una muestra grande que permita su pesaje en el laboratorio. Las semillas deben ser almacenadas en bolsas plásticas de cierre hermético que contenga papel absorbente previamente humedecido (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Las muestras deben procesarse lo más rápido posible o en su defecto pueden almacenarse en neveras a bajas temperaturas (3 °C- 5 °C).

**Medición de la masa de la semilla:** si la semilla tiene alguna estructura que la recubre, esta puede medirse en fresco en el laboratorio con un calibrador o ser fotografiada en un estereoscopio o microscopio para

su posterior medición. Se sugiere remover estas estructuras para llevar posteriormente las muestras a un horno de secado a 80 °C por 48 horas (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Las semillas pueden ser pesadas individualmente, cuando es posible; de lo contrario se sugiere pesar las semillas en grupos de 10, 50 o 100 semillas hasta que se registre el peso en la balanza analítica. Es esencial conocer siempre el número de semillas medido por especie.

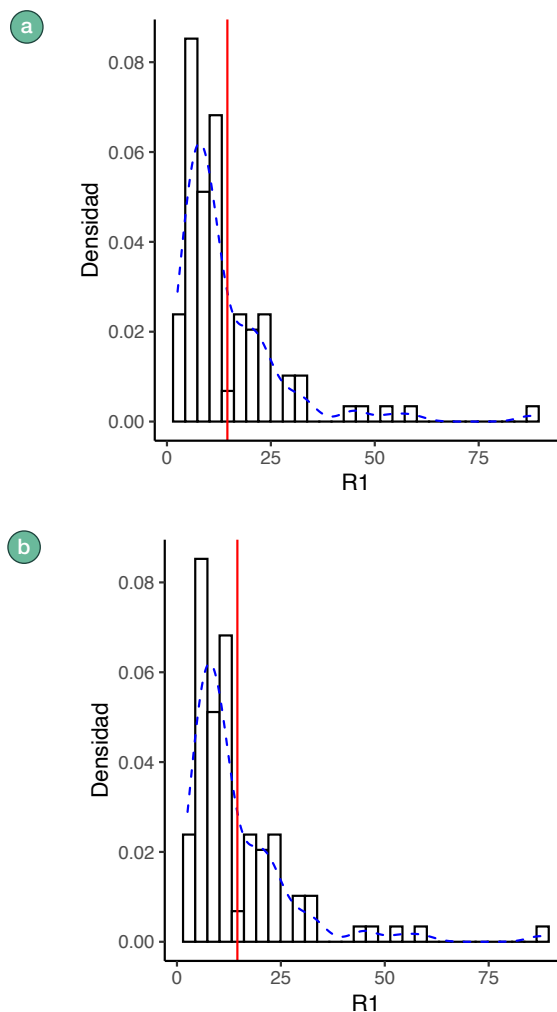
## Análisis de la información

Los objetivos del monitoreo determinan los métodos estadísticos que serán utilizados para el análisis de la información. Existen paquetes estadísticos de libre acceso donde se pueden utilizar directamente las hojas de cálculo (en formato .csv o .txt) para realizar cualquier tipo de análisis, e incluso mapas como es el caso de R-Project.

De manera general, se sugiere realizar primero un diagnóstico de los datos en el cual estos se revisan para identificar posibles errores –por digitación, unidades erradas– y datos con vacíos de información –datos no observados, no digitados, datos incompletos–. Para esto, se pueden utilizar herramientas visuales como histogramas, para observar la distribución de los datos; las gráficas de cajas y bigotes, para observar los valores medios y varianza de los rasgos funcionales; o también se puede calcular valores promedio, desviación estándar y varianza de los datos, de esta forma se identifica tanto los valores extremos como los vacíos de información. Antes de eliminar un dato o de no incluirlo en el análisis, se propone tratar de complementar la información con re-muestreos o, si no es posible, promediar la información colectada de las mismas especies que contribuyan a llenar los vacíos o corregir los errores. De cualquier forma, es imprescindible informar el tipo de tratamiento de datos utilizado en la base de datos.

## Histogramas

Muestran la frecuencia con que ocurre un valor de una variable determinada, representada por barras (negro) o por una curva de densidad (línea azul segmentada) que delimita el contorno de esta distribución. En las dos



**Figura 50.** Representación gráfica de la distribución de los valores del rasgo funcional R1 en una población hipotética. Fuente: Elaboración propia.

representaciones gráficas de la Figura 50 se incluye la media de los valores (línea roja) para tener una mejor percepción de los datos.

La Figura 50 muestra dos histogramas que representan la distribución de los valores del rasgo 1 (R1) en una población hipotética de 100 individuos. La Figura 50a representa los valores observados que se encuentran en un rango de 1 a 80 (eje x) y la densidad o frecuencia de estos valores observados (eje y). La mayor densidad de valores observados está del lado izquierdo de la gráfica (barras más altas). La media de los datos (línea roja) es de 14 y está alineada a la izquierda de la gráfica. Esta acumulación de valores hacia uno de los lados de la gráfica es un indicativo de que los datos están sesgados y que no tienen una distribución normal,

para corroborar esta información se puede realizar un test de normalidad (p. ej. Shapiro-Wilks).

Por su parte, la Figura 50b muestra un histograma con distribución normal. Para ello, se multiplicó los valores observados del rasgo 1 por el logaritmo natural, procedimiento que se realiza para normalizar los datos. Se observa que las barras están mayormente distribuidas a lo largo de la gráfica y la media (línea roja) está en una posición más central que la de la Figura 50a.

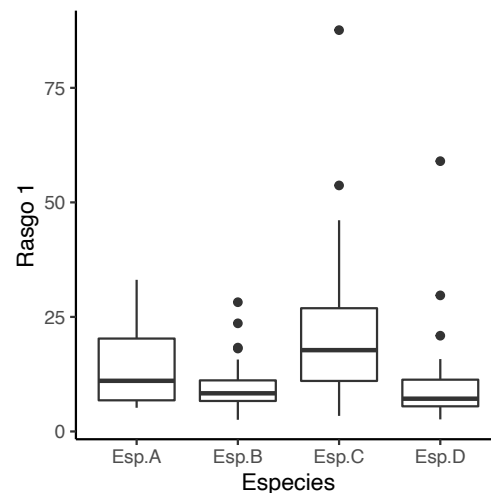
### Cajas y bigotes

Este tipo de grafica evalúa la dispersión y la tendencia central de los datos. Acá se calculan los rangos de distribución de los datos representados por cuartiles. La caja del gráfico representa el 50 % intermedio de los datos. La línea que divide la caja representa la mediana de los datos observados. Los bigotes (líneas hacia afuera de las cajas) representan los rangos del 25 % de la parte superior e inferior de los datos, y los puntos que sobrepasan estas líneas representan valores atípicos (Figura 51).

En la Figura 51 se representa la distribución de los valores del Rasgo 1 de cuatro especies hipotéticas. Las especies A y C muestran un mayor rango de distribución de los datos representado por unas cajas de mayor amplitud en comparación con las especies B y D. Las líneas de las cajas difieren en todas las especies, lo que muestra que los valores medios varían para cada una de las especies. Las especies B, C y D presentan datos atípicos (puntos) que deben ser valorados antes de proseguir al análisis.

### Análisis multivariado de ordenación

Estos análisis tratan de ordenar una variable en relación a los datos observados en campo. Inicialmente, estos análisis se realizaron con el fin de ordenar los sitios de muestreo con base en la composición de especies registrada en cada parcela teniendo en cuenta la similitud en especies (ter Braak, 1987); sin embargo, en las últimas décadas se han utilizado con el fin de ordenar las especies según la similitud de sus rasgos funcionales. Algunos análisis de este tipo son: escalamiento multidimensional, análisis de componentes, análisis de factores y análisis de estructuras latentes (ter Braak, 1987). Muchas de estas técnicas requieren de datos

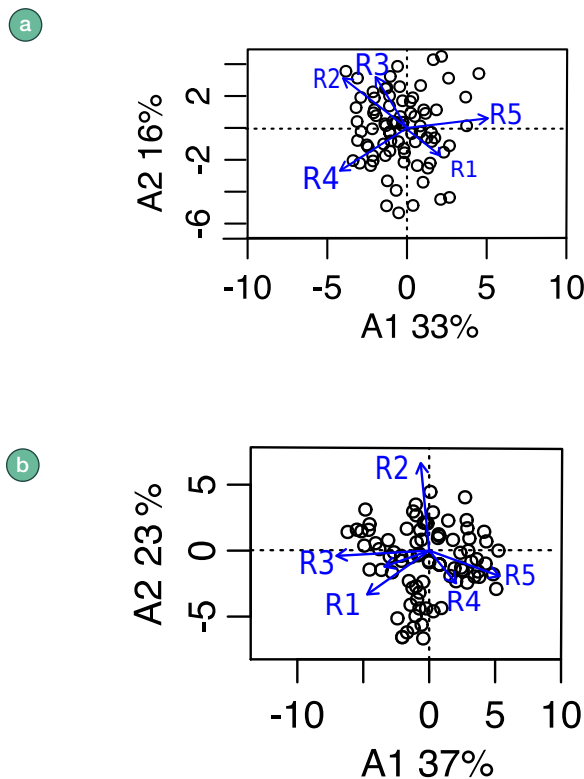


**Figura 51.** Representación gráfica de la distribución de los valores del rasgo funcional 1 (Rasgo 1) en cuatro especies hipotéticas mediante los diagramas de cajas y bigotes. Fuente: Elaboración propia.

continuos, excepto el análisis de factores, y son sensibles al tamaño de la muestra (Figura 52).

El resultado de este tipo de análisis se puede visualizar en la Figura 52 a y b. Esta constituye dos ejes (A1 y A2), como las variables observadas en campo: las flechas en este caso representan 5 rasgos funcionales R1 a R5, y los puntos en este caso representan las especies de las cuales se registraron los rasgos funcionales. El porcentaje que muestra cada uno de los ejes es la variabilidad que explica cada eje en función a los rasgos funcionales. La dirección de las flechas (variables observadas) indica con qué eje se relaciona cada variable y con qué especies (puntos) se relaciona positivamente cuando están cerca de la variable o, por el contrario, una relación negativa cuando están en la dirección opuesta a la variable. La posición de los puntos en el diagrama muestra si hay o no grupos diferentes de especies.

Por ejemplo, en la Figura 52a los puntos que representan las especies de plantas están dispersos en el centro del gráfico –como una gran nube de puntos–, en este caso, las especies analizadas con relación a estos cinco rasgos funcionales (R1 a R5) no muestran diferencias marcadas que permitan ser clasificados como grupos funcionales. Por su parte, en la Figura 52b se observan grupos de especies (puntos) en la parte inferior de la gráfica que están separados del



**Figura 52.** Visualización gráfica de un análisis de correspondencia canónica (CCA) para identificar grupos funcionales de las especies, representadas como puntos, con relación a sus rasgos funcionales (R1 a R5). Fuente: Elaboración propia.

resto de especies y opuesto al rasgo R2. También se observa que hay otro grupo de especies a la izquierda que están agrupados junto a los rasgos R1 y R3. Y otro grupo más grande de especies a la derecha junto a los rasgos R4 y R5. En este caso, se podría pensar que en esta comunidad se diferencian tres grupos funcionales: el primer grupo está determinado (negativamente) por el rasgo R2, el segundo por los rasgos R1 y R3, y el tercero por los rasgos R4 y R5. Se puede analizar la significancia de este análisis realizando un análisis de varianza (ANOVA) al modelo de ordenamiento.

De esta manera, al realizar un análisis de agrupamiento posterior a la toma de datos para diagnosticar si hay grupos de especies que son más similares entre sí según sus rasgos funcionales, se puede clasificar las especies en grupos funcionales. Los grupos funcionales son aquellas agrupaciones de plantas que presentan estrategias ecológicas similares, ya sea porque responden de manera equivalente al ambiente o bien porque producen efectos similares en procesos ecoló-

gicos del ecosistema (Díaz et al., 2002). Otra manera de clasificar a las plantas en grupos funcionales es realizarlo previamente a la ejecución de la investigación (Díaz et al., 2002). Por ejemplo, plantas con asociaciones de micorrizas vs. plantas sin asociaciones, según su vía fotosintética C3 y C4 o agrupaciones según su forma de crecimiento. En el páramo, las formas de crecimiento representan adaptaciones estructurales y fisiológicas de las plantas a las condiciones ambientales (Smith and Young, 1987). Las formas de crecimiento reflejan las distintas estrategias y mecanismos de las plantas en cuanto al desarrollo y los mecanismos de asimilación de carbono (Cáceres et al., 2014; Dorrepaal, 2007). Además, en el páramo, la asignación de biomasa de las plantas varía de manera diferencial según las formas de crecimiento (Cabrera et al., 2018). En la Figura 4 del capítulo Capítulo 1 se muestran las formas de crecimiento más representativas del páramo.

Es importante resaltar que el análisis estadístico de los rasgos funcionales al ir más allá de identificar grupos funcionales, puede analizar los cambios de los valores de los rasgos observados a lo largo del tiempo: comparando sitios, parcelas, o especies (unidad de análisis) o las correlaciones entre rasgos en el tiempo, y realizando, dependiendo del caso, correlaciones, modelos lineales o análisis de varianzas. En estos casos, se pueden considerar dos aspectos distintos de la variabilidad de los valores de los rasgos funcionales. El primero, al analizar el promedio del rasgo de cada especie por parcela o sitio de muestreo (variabilidad interespecifica) y, el segundo, el análisis de la variación o distribución de los valores del rasgo (varianza o coeficiente de variación) de cada especie por parcela o sitio de muestreo (variabilidad intraespecifica). Cada uno de estos aspectos tiene diferentes significados a nivel biológico, el promedio de un rasgo se relaciona con el “óptimo” valor del rasgo en el cual la especie sobrevive, se establece y se desarrolla en un lugar determinado (Albert et al., 2010; Jung et al., 2010). Mientras que la variación del rasgo, dada por la varianza o el coeficiente de variación, representa el potencial rango de diversificación del rasgo en el cual una especie puede sobrevivir, establecerse y desarrollarse bajo ciertas condiciones ambientales (Bolnick et al., 2003; Albert et al., 2011). Durante la recuperación del páramo, estos dos aspectos de los rasgos son relevantes de analizar;

sin embargo, depende del objetivo planteado para analizar una o ambas propiedades de los rasgos.

Para que el análisis de los datos sea robusto, es fundamental contar con un número de muestras suficiente para evitar reportar resultados errados. Algunos tipos de análisis son sensibles al tamaño de la muestra, es decir, que pueden reportar resultados significativos cuando en realidad esa significancia no existe. Por ejemplo, realizar un análisis de regresión con 3 datos o con 10 datos (tamaño de la muestra bajo) tiende a reportar datos significativos ( $r^2$  alto y  $p < 0.05$ ); sin embargo, si se analizan otros parámetros como los residuales, se observa que no cumplen los requisitos mínimos. Obtener unos datos de calidad en campo y en laboratorio es clave para que los esfuerzos del monitoreo tengan un impacto en el conocimiento y manejo de la biodiversidad de nuestro país.

## Conclusiones

Como se ha presentado en este capítulo, incluir los rasgos funcionales en el monitoreo permite entender

una dimensión ecológica en la cual se cuantifican y se observan los procesos ecológicos que suceden en el páramo y que sostienen sus funciones y servicios ecosistémicos. Además, contribuye a entender la relación entre estos procesos a diferentes escalas. Sin embargo, se recomienda trabajar esta aproximación de manera conjunta con otros enfoques que pueden complementar la información a nivel de sistema, por ejemplo: la taxonomía es fundamental para entender el recambio de especies a lo largo de la recuperación; la fisiología brindar información específica que puede ser contrastada con la información de los rasgos funcionales; los saberes locales son clave para entender las dinámicas locales del uso y conservación del territorio.

Las acciones de monitoreo a la restauración del páramo desde el enfoque funcional aportan al conocimiento de aspectos básicos que aún se desconocen en los páramos, por ejemplo, las tasas de recuperación de las especies o las tasas de crecimiento y la producción de biomasa, aspectos que son relevantes para el mantenimiento y provisión de los servicios ecosistémicos del páramo.

# CAPÍTULO 08

---

- ⊕ Antecedentes y contexto de la reconversión productiva en páramos
- ⊕ Relación entre restauración ecológica y reconversión productiva en páramos
- ⊕ Consideraciones sobre el rol del monitoreo en la reconversión productiva o rehabilitación ecológica en páramos
- ⊕ Propuesta de estructura para el diseño del monitoreo al proceso de reconversión
- ⊕ Principio ecológico-productivo: criterios, indicadores y cuantificadores

# Lineamientos para el monitoreo de procesos de reconversión productiva en páramos en el marco de la restauración ecológica





**E**n este capítulo se presenta un marco de referencia para orientar el diseño del monitoreo de los procesos de reconversión productiva de las actividades agropecuarias que se desarrollan en áreas de páramo. Estos procesos de reconversión se susciben, inicialmente, a las disposiciones normativas que reconocen la preexistencia de la actividad agropecuaria al interior de los páramos y, por ende, plantean la necesidad de promover cambios progresivos en las lógicas de producción agropecuaria, para garantizar la sostenibilidad de estos territorios. En segundo lugar, y desde la aproximación conceptual, la reconversión se enmarca en el concepto de rehabilitación ecológica, entendida como uno de los tres objetivos generales de los procesos de restauración ecológica de marco amplio, propuestos por SER (2004) y adoptados por el Plan Nacional de Restauración (MinAmbiente, 2015).

En Colombia, la restauración ecológica de los ecosistemas paramunos es un campo sobre el que se ha generado conocimiento de manera significativa. Sin embargo, la vinculación de la reconversión productiva en el marco de la restauración, y en específico desde la perspectiva de la rehabilitación de ecosistemas, es mucho más reciente y por tanto de menor desarrollo. Actualmente los procesos de reconversión de actividades agropecuarias en páramo vienen ganando espacio en las agendas institucionales y se abren paso para su implementación en el territorio. En consecuencia, hay una creciente necesidad de definir estrategias de monitoreo que permitan la generación de datos reales para comprender el desempeño de estos procesos; planteados fundamentalmente desde una perspectiva de toma, procesamiento y análisis de datos integral, en múltiples escalas y en procesos de largo plazo.

En este contexto, el monitoreo debe articularse a los planteamientos de la Estrategia de Monitoreo Integrado de Ecosistemas de Alta Montaña (EMA) que se diseña actualmente en el país, la propuesta surge de la necesidad de contar con un sistema de monitoreo de carácter integrado y con manejo adaptativo, que genere información útil y pertinente para orientar la toma de decisiones relacionadas con la gestión integral de ecosistemas estratégicos como los páramos (Llambí et al., 2019).

En el desarrollo del capítulo se presentan brevemente antecedentes de la reconversión productiva en pára-

mos, seguido del análisis de la relación entre restauración ecológica y reconversión productiva, la definición de elementos clave a considerar en el monitoreo a la reconversión y, finalmente, la estructura propuesta para el diseño del monitoreo a la reconversión, así como de procesos de restauración ecológica en páramos afectadas por uso agropecuario.

### Antecedentes y contexto de la reconversión productiva en páramos

¿Por qué se habla de la reconversión de actividades agropecuarias en páramo? Los páramos son considerados como ecosistemas de especial protección desde la Constitución Colombiana de 1991. Sin embargo, solo hasta la Ley 1450 de 2011 se estableció una prohibición explícita al desarrollo de actividades agropecuarias en páramos. Dado que esta prohibición produjo tensión entre comunidades paramunas e instituciones gubernamentales, se abrió el debate sobre el reconocimiento de la actividad agropecuaria como medio de vida de las comunidades en los páramos.

Sobre este debate, la Ley 1930 de 2018 referida a la Gestión Integral de Páramos, planteó un importante cambio (Capítulo 11). Dicha ley dio viabilidad a la permanencia de la actividad agropecuaria en páramos bajo dos condiciones fundamentales. En primer lugar, que la actividad agropecuaria preexista en áreas de páramo desde antes del 2011 y, en segundo lugar, que el modelo productivo bajo el cual se desarrollan esas actividades sea considerado de bajo impacto por los estándares que para ello se definan. Bajo este nuevo contexto, resulta fundamental el rediseño de los sistemas agropecuarios y asumir el reto de transitar hacia escenarios de sostenibilidad jamás antes explorados, a través de la reconfiguración de las relaciones agroproductivas en los territorios de la alta montaña colombiana (Andrade y Chaves, 2018, p. 191).

Es un gran desafío alinear los actuales modelos de producción agropecuaria con los principios de producción orientados a la sostenibilidad, particularmente porque en el actual contexto agroproductivo se hace énfasis en la especialización y eficiencia económica de la producción agropecuaria (Nicholls, Altieri y Vázquez, 2015). No obstante, esto representa la oportunidad de poner en balance la conservación del páramo por su

importante oferta de beneficios a la sociedad y la posibilidad de garantizar el reconocimiento de la actividad agropecuaria como medios de vida de las comunidades humanas parameras.

¿Cuál es balance del uso agropecuario en páramos en Colombia? Los 36 complejos de páramos existentes en Colombia ocupan el 70 % de la alta montaña con un total 2 906 137 hectáreas. Esta cifra corresponde al 3 % del área continental colombiana, y representan cerca del 50 % del territorio de páramos del mundo (Sarmiento et al., 2013). Según cifras de la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA, 2019), en el 84 % de los páramos se tiene la condición de preexistencia de la actividad agropecuaria; a 2019 solo 6 complejos de páramos no reportan esta actividad en su interior. Los datos de UPRA determinan una extensión de 383 459 hectáreas con preexistencia de actividades agropecuarias, cifra que corresponde al 13 % del área total de páramos (Tabla 12).

La producción agropecuaria en los páramos de Colombia es considerablemente heterogénea. Predomina la producción de papa alternada con pastos para la ganadería, especializada en leche y doble propósito, cultivos de cebolla junca y de bulbo, hortalizas y algunas frutas. Los patrones de ocupación de estos territorios van desde el mini y microfundio agrícola, hasta el latifundio con dedicación principalmente a la ganadería extensiva. Datos del Censo Nacional Agropecuario (2014) arrojan la existencia de aproximadamente 65 776 Unidades de Producción Agropecuaria (UPA) en páramos.

El modelo agroproductivo que se desarrolla en los páramos está orientado mayoritariamente a la producción que tiene una alta demanda de insumos agrícolas de síntesis química, desarrollado bajo monocultivo, con utilización de labores de labranza excesiva del suelo, y continua expansión de la frontera agrícola a causa de

la degradación de suelos o escasa disponibilidad de pastos. Los paisajes agrícolas resultantes de estas dinámicas combinan áreas naturales en diversos grados de transformación con áreas de uso agropecuario en distintos gradientes de productividad.

La reconversión productiva plantea la posibilidad de reconfigurar la forma en la que se desarrolla actualmente la producción agropecuaria en los páramos, para transitar hacia escenarios de sostenibilidad. Esto implica un cambio en la percepción de la actividad agropecuaria como “disturbio”, o “motor de transformación” de este ecosistema, para resignificarla en el contexto de los páramos como territorios habitados, construidos y apropiados por comunidades campesinas, indígenas y afro que dependen de esta actividad. En este contexto, la actividad agropecuaria tiene un lugar muy importante en las relaciones que se entablan entre los sistemas ecológicos y sociales que constituyen al páramo, y su permanencia está condicionada a que dichas relaciones favorezcan la sinergia y complementariedad entre ellos.

La apuesta de monitorear el cambio en las formas de producción agropecuaria presentes en páramo permite tanto comprender el desempeño de los procesos de reconversión en función de los objetivos trazados en cada una de sus fases, como analizar las relaciones causa-efecto de pérdida o recuperación de funcionalidad del ecosistema en relación con las prácticas de producción implementadas; esto conlleva a una gestión adecuada de los esfuerzos concentrados en la reconfiguración de los medios de vida agropecuarios en páramos.

### Relación entre restauración ecológica y reconversión productiva en páramos

El Plan Nacional de Restauración plantea tres objetivos de la restauración ecológica en un marco amplio: restauración ecológica, rehabilitación y recuperación (Capítulos 1, 2 y 11). La rehabilitación ecológica se orienta a reparar la productividad o los beneficios que

 **Tabla 12.** Distribución de áreas por usos agropecuarios en páramos. Fuente: UPRA (2019).

Usos	Extensión (ha)	Porcentaje sobre el área total de preexistencia
Agricultura	182 237	47,5
Pastoreo (pastos)	198 332	51,7
Forestal de producción	2 889	0,8

el ecosistema ofrece al ser humano, en relación con los atributos funcionales o estructurales del mismo (MinAmbiente, 2015).

Por su parte, la Resolución 0886 de 2018 define a la reconversión de actividades agropecuarias en páramo como una estrategia de gestión progresiva del cambio de los modelos de producción en búsqueda de la máxima expresión de sostenibilidad posible. En tal sentido, para estimular la expresión de escenarios de sostenibilidad, en el marco de un régimen de transición, se promueve la reconstrucción de relaciones entre los procesos productivos y las dinámicas ecológicas de los ecosistemas de páramo.

Dicho de otro modo, la rehabilitación ecológica y la reconversión productiva son dos conceptos que operativamente se traducen en herramientas similares, debido a que conectan dos intereses clave para garantizar sostenibilidad de áreas con preexistencia de actividades agropecuarias en páramo: 1) garantizar que estas áreas efectúen una contribución continua de servicios ecosistémicos para el disfrute de la sociedad, y 2) garantizar que esta contribución también soporte al desarrollo de actividades agroproductivas como medio de vida de comunidades parameras. Estos dos intereses se gestionan mediante la recuperación de rasgos funcionales y estructurales propios del ecosistema, y el restablecimiento de relaciones de sinergia entre los procesos agroproductivos y las dinámicas ecológicas de los ecosistemas de páramo.

El punto de encuentro entre estos dos conceptos es la búsqueda del restablecimiento y construcción de relaciones socioecológicas que promueven escenarios de sostenibilidad de en múltiples escalas: sistema de producción–paisaje–complejo de páramo. Esto se traduce en garantizar funcionalidad mediante la reconfiguración de relaciones a múltiples escalas y entre los distintos usos, incluido el agroproductivo, que se albergan en el paisaje agrícola del páramo (Anexo 3).

### Consideraciones sobre el rol del monitoreo en la reconversión productiva o rehabilitación ecológica en páramos

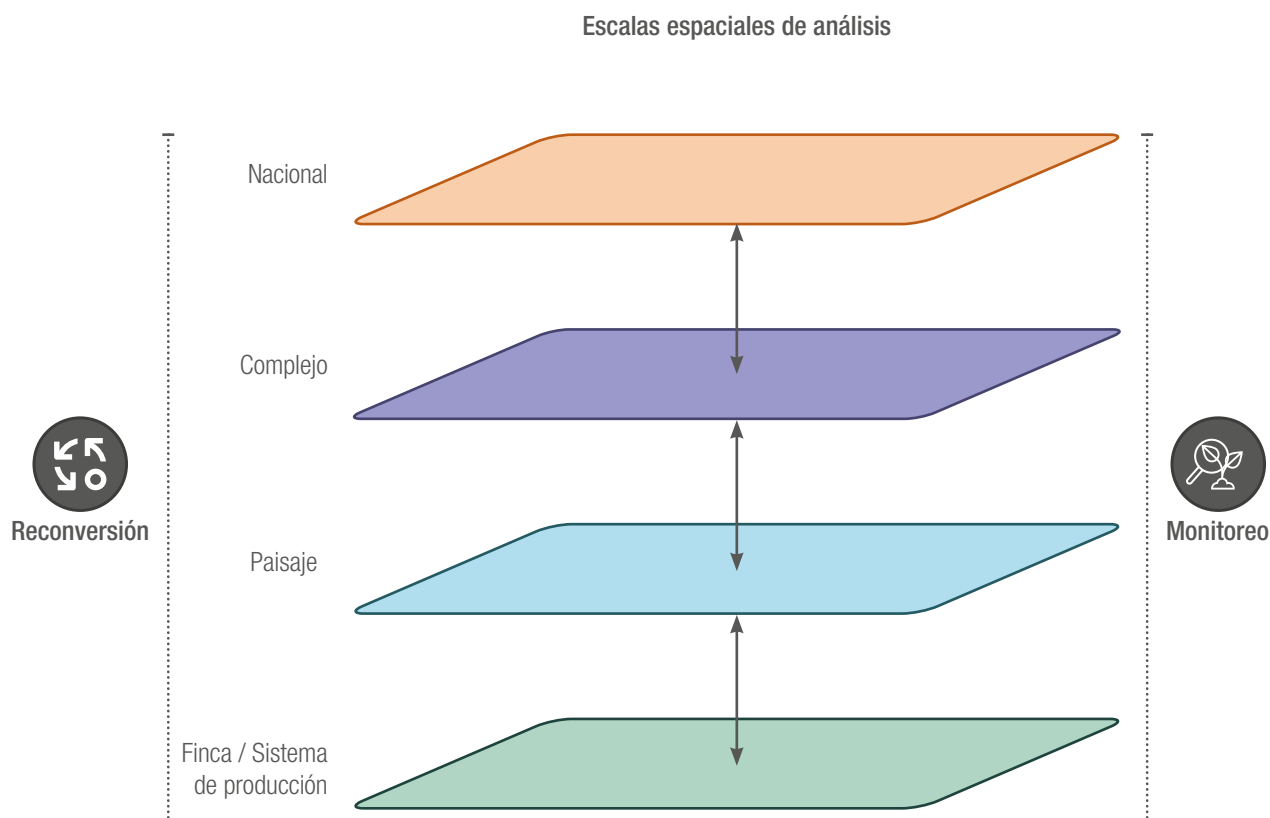
Los procesos de reconversión que se adelanten en páramos deben aplicar una estrategia de monitoreo en términos de proceso y no de proyecto. La información ge-

nerada debe dar soporte a la evaluación de desempeño de la reconversión como estrategia de largo plazo, considerando los términos que plantea la Resolución 0886 de 2018 y su documento técnico anexo (máximo de 10 años). De manera tal que, independientemente de los proyectos que implementen acciones de reconversión y el seguimiento propio que se haga a estos, el monitoreo a la reconversión como proceso debe estar enmarcado en los programas de reconversión que se definan en cada territorio, y se alimenta con la información generada por los proyectos de reconversión de manera acumulativa y progresiva, según la escala de generación de los datos. Dicho de otra forma, el monitoreo es del proceso de reconversión en sus distintas etapas y no solo de las acciones puntuales que parcialmente apoyan la implementación de la reconversión.

Además, es fundamental monitorear la no ampliación del área total sujeta a la reconversión, bien sea a escala predial, de paisaje o de complejo. Esto considerando que la reconversión aplica a las áreas con preexistencia de la actividad agropecuaria, y esta condición pretende evitar el desarrollo de la actividad agroproductiva en áreas para conservación o restauración en páramo. En consecuencia, el monitoreo de la reconversión debe evidenciar que las áreas sujetas de cambio del modelo productivo se mantengan o probablemente disminuyan, pero nunca aumenten.

El ejercicio de monitorear de manera simultánea en diversas escalas espaciales (Figura 53) debe permitir la integración de los datos en acenso y descenso de la escala. Por un lado, los procesos que operan a escalas más amplias (paisaje–complejo) pueden funcionar como determinantes o condiciones de contexto que modifican las respuestas a escalas más locales; por otro lado, los datos de las escalas locales en agregado (sistema de producción–predio) pueden ser determinantes para los contextos a escalas más gruesas (Llambí et al., 2019).

La primera escala espacial objeto del monitoreo es el sistema de producción, este es de alcance predial (finca); le sigue la escala del paisaje, con alcance de unidades ecológicas de paisaje (subcuenca–cuenca); posteriormente, el complejo de páramo y, por último, la escala nacional. Bajo esta lógica, la estructura del monitoreo a la reconversión puede tener diferentes objetivos, metas e indicadores según la escala espacial de



**Figura 53.** Escalas espaciales de análisis. Adaptado de: Llam-  
bí et al. (2019).

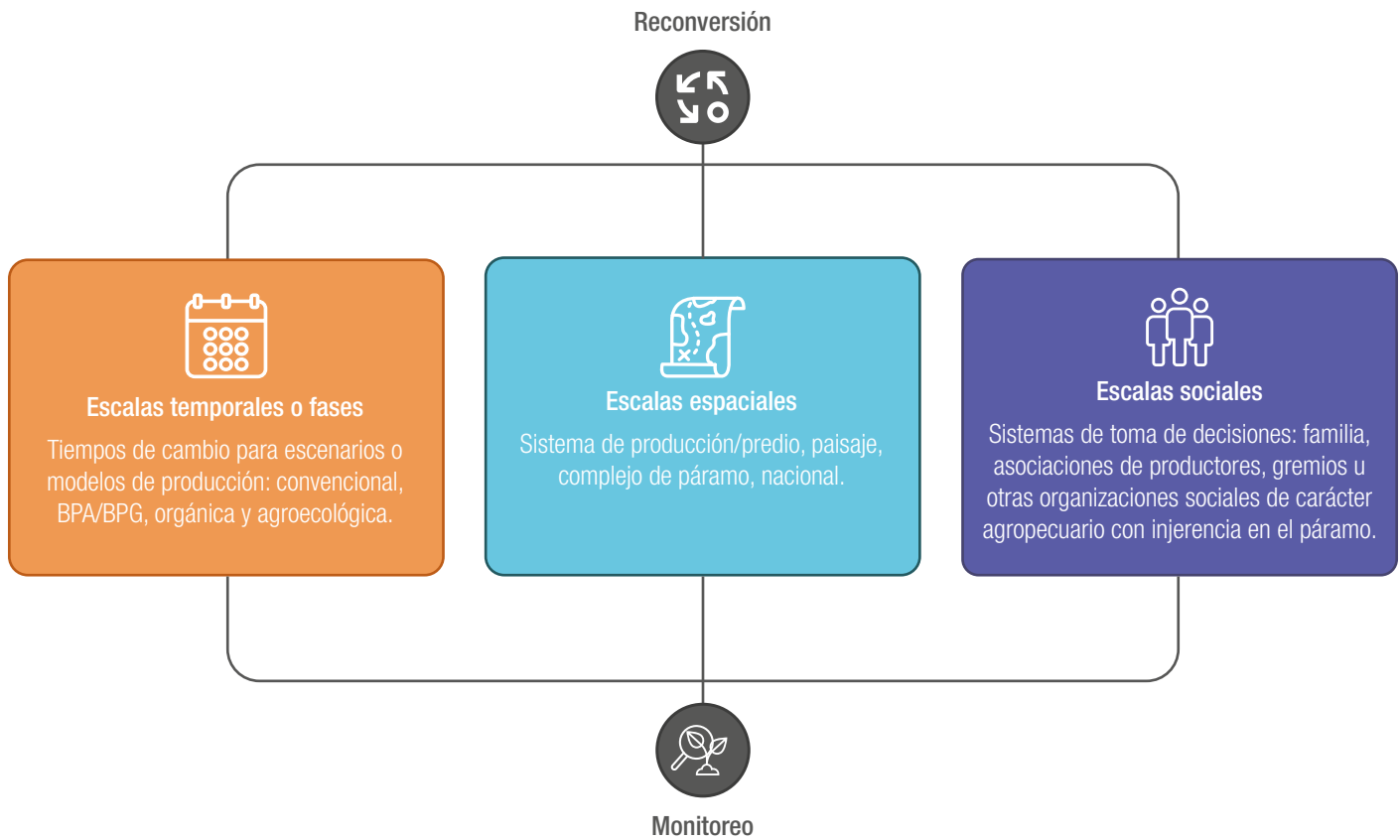
análisis. Adicionalmente, entre cada escala se guardan diferencias en el alcance de sus objetivos, metas e indicadores, según la fase o escenario de reconversión en la que se encuentre el proceso, tal y como está dispuesto por la Resolución 0886 de 2018. En consecuencia, el monitoreo debe considerar la totalidad de las fases del proceso de reconversión – que como tal es un proceso de restauración ecológica– y sus diferentes escalas de análisis espacial, de tal forma que los datos generados permitan ser agregados en la escala temporal y espacial de la reconversión. Como se prevé que la reconversión se adelantará bajo la implementación de proyectos, cada proyecto deberá ubicar el alcance de su implementación, en la escala espacial y temporal del proceso de reconversión, para definir las metas y los indicadores sobre los cuales generará información.

La reconversión productiva como estrategia del cambio tiene además del reto de incidir en distintas escalas temporales y espaciales (Figura 54), hacerlo sobre el

sistema de toma de decisiones que gestiona los modelos de producción y sus escalas correspondientes. Los cambios no solo se promueven a nivel de parcela/finca y paisaje, pues estos deben ser promovidos y correspondientemente monitoreados en los distintos subsistemas de gobernanza que tienen injerencia sobre los modos de producción agropecuaria en páramo –la familia, las asociaciones de productores, las agremiaciones y organizaciones sociales de distintos niveles que toman decisiones sobre cómo y en dónde se produce en el páramo–.

Sin duda alguna, las convergencias de estas escalas de naturaleza distintas dentro del proceso de reconversión representan una enorme complejidad en el diseño del monitoreo de este proceso. Sin embargo, desde la perspectiva integral del monitoreo a la restauración ecológica, su consideración es definitiva al momento de generar y analizar datos que permitan determinar el desempeño de la reconversión y, en caso de que se requiera, definir estrategias de ajuste oportunas y pertinentes al proceso (manejo adaptativo).

El diseño de la estrategia de monitoreo de la reconversión se acoge al orden lógico y jerarquizado (Figura



21, Capítulo 3) para el planteamiento de las metas, principios y criterios en un proceso de monitoreo, que se plantea a lo largo de este libro. Las metas son transversales al proceso, pero dependen de las escalas a las que estén asociadas; los principios son transversales, y las definiciones desde los criterios hasta los verificadores dependen tanto de las escalas a las que estén asociados, como de las actividades agropecuarias, y su posible combinación.

Por lo anterior, la propuesta presentada en este capítulo respecto de los criterios, indicadores y verificadores que hagan parte del monitoreo a la reconversión agropecuaria en páramo debe ser considerada como un instrumento guía, sujeto de contextualización y retroalimentación, en razón a las condiciones específicas de cada proceso de reconversión en los diversos territorios de páramo. Esta especificidad estará dada por la línea base que se construya en la etapa de diagnóstico de los sistemas de producción del páramo y en la que se deben ratificar, ajustar o incluir los atributos de esta índole que sean aplicables a cada caso. Para adelantar este diagnóstico, se sugiere considerar la publicación

**000** **Figura 54.** Tipos de escalas de análisis en el monitoreo a la reconversión. BPA, buenas prácticas agrícolas. BPG, buenas prácticas ganaderas. Fuente: Elaboración propia.

*Sistemas de producción rural (2015)* realizada por el Instituto Humboldt.

Finalmente, se recomienda que el monitoreo a la reconversión contemple desde su diseño la participación de actores locales y comunidades de páramo en la generación, sistematización y análisis de datos del proceso (Capítulo 5). Así mismo, se recomienda que la información generada pueda estar disponible para retroalimentar a los diversos grupos de interés y de tomadores de decisiones interesados en los diversos alcances de los datos.

**Propuesta de estructura para el diseño del monitoreo al proceso de reconversión**

El objetivo último de los procesos de reconversión es el de promover la expresión de sostenibilidad del paisaje (agroecosistema de páramo). La sostenibilidad

del paisaje tiene dos rasgos fundamentales: el uso del suelo y la especialización de este en el contexto de un sistema. La sostenibilidad del paisaje es una propiedad emergente derivada de las interacciones entre los componentes y atributos del mismo (Zamudio et al., 2019), esto quiere decir que la expresión de la sostenibilidad del paisaje tiene múltiples posibilidades que dependen de la gestión que se haga de las dinámicas derivadas de los usos, las relaciones socioculturales, socioeconómicas y biofísicas del socioecosistema del páramo. La sostenibilidad del paisaje busca comprender la relación dinámica entre los servicios del ecosistema y el bienestar humano en situaciones cambiantes de incertidumbre (Zamudio et al. 2019). En tal sentido, los arreglos del conjunto de relaciones que se establecen en un paisaje configuran su estado, así como su posibilidad de transitar hacia escenarios de sostenibilidad. Los cambios en dichos arreglos se dan a través de los procesos de reconver-

sión productiva, como herramienta catalizadora en un régimen de transición.

El objetivo central del monitoreo de los procesos de reconversión de las actividades agropecuarias en páramo, como en cualquier proceso de restauración ecológica, es evidenciar el cambio progresivo, desde la tensión y hacia la sinergia, de las relaciones entre las actividades agropecuarias presentes en el páramo y los servicios ecosistémicos que esta oferta. De manera prioritaria se destacan tres servicios sobre los cuales está centrada la gestión integral de páramos: regulación hídrica, almacenamiento de carbono y provisión de hábitat. Adicionalmente, se deben contemplar como mínimo –y en razón a la presencia de actividades agropecuarias que constituyen medios de vida de comunidades parameras– los servicios de ciclaje de nutrientes, provisión de alimentos y referente identitario o espiritual (Figura 55). En tal sentido, las acciones de reconversión deben estar orientadas a estimular las relaciones sinérgicas para garantizar la prestación de dichos servicios con la menor afectación posible al medio biofísico y garantizando bienestar a las comunidades que las desarrollan. Igualmente,

**Figura 55.** Beneficios del páramo para la humanidad que se consideran en el monitoreo de la reconversión productiva. Fuente: Elaboración propia.



el monitoreo debe arrojar evidencia del desempeño del reajuste propuesto en dichas relaciones.

La reconversión productiva, entendida en el marco amplio de la restauración ecológica, adopta el modelo conceptual basado en tres principios soporte de los procesos de restauración: ecológico, socioeconómico y de gestión (Capítulos 2 a 4). Por ende, el monitoreo de la reconversión también adopta tales principios con los siguientes alcances:

➤ **Principio ecológico-productivo:** este principio aborda las relaciones directas entre la actividad productiva y los atributos de función, estructura y composición del páramo como agroecosistema. Aquí se alojan criterios relacionados con la regulación hídrica, almacenamiento de carbono, provisión de hábitat y ciclado de nutrientes. Su monitoreo pretende evidenciar que las acciones de reconversión implementadas generan cambios progresivos, de carácter positivo, en las relaciones que la actividad productiva entabla con estos servicios ecosistémicos.

Desde el monitoreo de los atributos considerados en el principio ecológico-productivo se quiere evidenciar que la reconversión productiva promueve relaciones que estimulen la multifuncionalidad del paisaje agrícola de páramo; entendida como la capacidad de producir y soportar simultáneamente múltiples y diferentes bienes y servicios que proporcionan beneficios para la sociedad, en una unidad de tiempo (Zamudio et al., 2019). La multifuncionalidad considera interacciones ecológicas, económicas y socioculturales de las cuales se derivan los servicios y beneficios que están proporcionando los paisajes productivos. Bajo el marco conceptual de la restauración ecológica, se consideran fundamentalmente vinculadas a este principio las relaciones entre los procesos productivos y las dinámicas ecológicas del ecosistema páramo.

➤ **Principio socioeconómico:** en este principio prevalece la concepción del páramo como un territorio históricamente habitado por comunidades que desarrollan, entre otras, actividades agropecuarias y que, por ende, dinamizan la constitución de un agroecosistema. Está vinculado al capital humano y al sistema de toma de decisiones en relación a los usos, modelos de desarrollo de estos, localización

espacial y comercialización de productos resultantes. También aborda las relaciones de carácter identitario o espirituales que el ser humano entabla con el páramo. Este principio se relaciona de forma directa con los servicios ecosistémicos de provisión de alimentos y referente identitario o espiritual.

Su monitoreo pretende evidenciar los cambios que el proceso de reconversión estimula en términos de entablar relaciones que favorezcan: la construcción y rescate de conocimientos para la toma de decisiones relacionados con la actividad agropecuaria; el incremento de la participación y confirmación de formas de organización social con injerencia en la actividad agroproductiva; el ajuste de la percepción sobre expresión de sostenibilidad de las actividades agropecuarias. También se ocupa de monitorear el cambio en las relaciones que determinan el bienestar expresado en salud de los agroecosistemas, incluyendo formas de vidas humanas, no humanas y el entorno geofísico (Zamudio et al. 2019). En síntesis, se encarga de monitorear el cambio en las relaciones económicas con injerencia en la productividad de los sistemas de producción.

➤ **Principio de gestión:** el monitoreo de la reconversión debe contar con un sistema de seguimiento al desarrollo de las acciones presupuestadas en las diversas escalas de intervención. Este principio está relacionado con el mecanismo de control a la ejecución de lo planeado y al tiempo de la retroalimentación necesario para garantizar una ejecución eficiente en el uso de los recursos disponibles. El monitoreo a los criterios de gestión pueden ser evaluados en términos de proyecto y no de proceso, de manera que se tenga control de las acciones que deben ser implementadas por un proyecto en particular, en articulación con el proceso de reconversión. Está encargado de garantizar la trazabilidad de la información y agregación de la misma al histórico de monitoreo del proceso.

En la Tabla 13 se presenta el desarrollo de los tres principios, a saber, 1) ecológico-productivo (verde), 2) socioeconómico (azul) y 3) de gestión (naranja). En cada caso se describen los criterios, indicadores y cuantificadores sugeridos a monitorear.

**Tabla 13.** Principios, criterios, indicadores y cuantificadores para procesos de reconversión productiva en el marco amplio de la restauración ecológica.

CRITERIO	INDICADORES	CUANTIFICADORES
<b>Principio ecológico-productivo</b>		
Composición del paisaje agrícola	Diversidad y riqueza de especies/razas en el agroecosistema	N° de especies/razas nativas con función en el sistema productivo.
		N° de especies/razas exóticas con función en el sistema productivo.
	Heterogeneidad en usos del suelo	Área total con coberturas naturales.
		Área total con coberturas de usos agroproductivos.
		Áreas total con cobertura de otros usos no agroproductivos.
	Diversidad de sistemas agroproductivos	N° de actividades agroproductivas.
Área total por actividad agroproductiva.		
Estructura del paisaje agrícola	Diversidad de estratos en el paisaje agrícola	N° de estratos en el paisaje agrícola.
		Área de ocupación por estrato (%).
Especies (animales y vegetales) en riesgo de extinción	Presencia de hábitats de especies (animales y vegetales) en riesgo de extinción	N° de especies (animales y vegetales) en riesgo de extinción presentes en el área de desarrollo de la actividad agropecuaria.
		N° de hábitats de especies en riesgo de extinción presentes en el paisaje agrícola.
Especies endémicas del páramo	Riqueza de especies vegetales endémicas	Proporción de especies endémicas con respecto al total de especies vegetales presentes en el agroecosistema.
		Área total en conflicto por el desarrollo de actividades agropecuarias en zonas de presencia de especies (animales y vegetales) endémicas del páramo.
Principales especies migratorias	Presencia de especies migratorias	N° especies migratorias con hábitat en conflicto por la actividad agropecuaria.
Acciones de recuperación de hábitat de especies endémicas y migratorias	Implementación de acciones de recuperación de hábitats de especies endémicas y migratorias	Áreas con acciones implementadas para recuperación de hábitats de especies endémicas y migratorias.
		Efectividad de las acciones de recuperación de hábitats de especies endémicas y migratorias.
Biodiversidad para la producción agropecuaria	Presencia edafofauna (micro y meso fauna)	N° de grupos funcionales.
	Presencia de polinizadores	N° de especies.
	Presencia de dispersores de semillas	N° de especies.
Oferta de servicios de provisión del agroecosistema	Balance hídrico según usos	Volumen de agua demandado por la actividad productiva.
		Volumen de agua disponible para el desarrollo de la actividad.
		Volumen de agua demandado para uso doméstico.
		Volumen de agua demandado para otros usos en el agroecosistema.
		Volumen de agua residual generada por la actividad productiva.
		Volumen de agua residual de origen agroproductivo con tratamiento previo a vertimiento.
		Condiciones calidad de agua requerida para el desarrollo de la actividad.
		Condiciones de calidad de agua residual generada por la actividad productiva.
		N° de fuentes de agua superficial con posible afectación, en términos de calidad, por el desarrollo de la actividad agropecuaria.
		Probabilidad de contaminación de fuentes de aguas superficiales por el desarrollo de prácticas asociadas a la actividad agropecuaria.



CRITERIO	INDICADORES	CUANTIFICADORES	
	Cantidad y tipo de productos de origen agropecuarios	N° de productos generados de origen agropecuario.	
		Tipo de productos generados de origen agropecuario.	
	Cantidad y tipo de subproductos desechados de origen agropecuario	N° de subproductos desechados de origen agropecuario.	
		Tipo de subproductos desechados de origen agropecuario.	
Cantidad de productos maderables y no maderables generados por el ecosistema y aprovechados por comunidades paramunas	N° de productos maderables y no maderables generados por el ecosistema y aprovechados por comunidades paramunas.		
Oferta de servicios de soporte del agroecosistema	Balance de carbono	Biomasa aérea en zonas con cobertura natural.	
		Biomasa aérea en zonas con usos agroproductivos.	
		Estimación de existencias en suelos con coberturas naturales.	
		Estimación de existencias en suelos con usos agroproductivos.	
		Estimación de GEI generados en el desarrollo de la actividad agroproductiva.	
	Condiciones físico-químicas del suelo	pH del suelo en zonas de muestreo agroproductivas.	
		Capacidad de intercambio catiónico.	
		% de materia orgánica disponible en suelo.	
		Disponibilidad de elementos mayores y menores en zonas de muestreo agroproductivas.	
		Textura	
		Humedad	
		Porosidad	
		Densidad aparente	
	Condiciones biológicas del suelo	Actividad enzimática en suelo.	
		Actividad microbiana en suelo.	
	Estado de degradación del suelo	Tipos de erosión presentes en áreas agroproductivas.	
		N° de zonas destinadas a la actividad agroproductiva (lotes, parcelas, tajos, cortes).	
		Pendiente máxima de las diversas áreas agroproductivas (lotes, parcelas, tajos, cortes).	
	Diversidad en suelo	N° de especies presentes en banco de semillas en el suelo.	
	Fuentes de energía externa para la producción agropecuaria	Autonomía de fuentes de energía externa para la producción agropecuaria	N° de fuentes externas con uso en la actividad agropecuaria.
			Tipo de fuentes.
		Participación de fuentes externas en balance energético	% de participación de la fuente en el balance total de energía requerida para la producción agropecuaria.

CRITERIO	INDICADORES	CUANTIFICADORES	
Prácticas de producción	Nutrición del cultivo	N° de fertilizaciones en un ciclo productivo del cultivo.	
		Cantidad de producto utilizado en un ciclo productivo por hectárea.	
		Tipo de fertilizante usado en nutrición de cultivo (orgánico, mineral, de síntesis química).	
		% de tipo de fertilizante usado en la demanda del cultivo, por ha, en cada ciclo productivo.	
		Correspondencia entre volúmenes de fertilizantes aplicados respecto de resultado de análisis de suelos (si/no).	
	Labranza del suelo	Tipo de herramientas usadas para arado del suelo (mecánica liviana, mecánica pesada, anual).	
		Promedio de profundidad en el arado del suelo.	
	Rotación de áreas y actividades productivas	N° de actividades agrícolas que realizan proceso de rotación de áreas de siembra.	
		Tiempo promedio de rotación de cultivos de ciclo corto.	
		Cuenta con plan de rotación de áreas y cultivos considerando aspectos técnicos (si/no).	
		Tiempo promedio de rotación de potreros.	
		Cuenta con plan de rotación de potreros considerando aspectos técnicos (si/no).	
		Tipo de cercamiento utilizado para orientar la rotación de potreros (cerca viva, muerta, eléctrica).	
	Prevención de la erosión	Kilómetros implementados de cerca muerta y eléctrica en áreas productivas.	
		Kilómetros de cercas vivas implementados en áreas productivas.	
		Kilómetros de cortinas rompe vientos implementadas.	
		N° de especies forrajeras usados en la actividad productiva.	
	Salud de sistemas de producción agrícola y animal	Manejo integrado de plagas y enfermedades	Cuenta con programa de manejo integrado de plagas y enfermedades (si/no).
			N° de plagas y enfermedades presentes en los sistemas de producción.
			Tipo de plagas y enfermedades presentes en los sistemas de producción.
% de infestación en cultivos-hato.			
Tipo de control fitosanitario aplicado (mecánico, químico, biológico, alelopático, manual).			
Uso de agroquímicos y productos veterinarios		Usa agroquímicos (si/no).	
		Categoría toxicológica máxima que usa.	
		Uso de productos químicos con componentes activos presentes en listas mundiales de productos prohibidos.	
		Origen del criterio para determinar dosificaciones (experiencia personal, recomendación vendedor del producto, recomendación asistente técnico, recomendación de otros productos).	
		Cantidad de productos agroquímicos usados en cada ciclo productivo.	
		Uso de productos veterinarios prohibidos (si/no).	
		Origen del criterio para determinar dosificaciones productos veterinarios (experiencia personal, recomendación vendedor del producto, recomendación asistente técnico, recomendación de otros productos).	
		Tiempo de retirada, suspensión o carencia de productos veterinarios.	
		N° de cabezas de ganado con ciclo de vacunación completo.	

CRITERIO	INDICADORES	CUANTIFICADORES
Prácticas de conservación	Conservación de áreas de importancia ambiental	Kilómetros con implementación de cercas de protección de fuentes de agua.
		Kilómetros con implementación de cercas de protección de áreas con cobertura natural y/o en restauración.
	Conservación de especies silvestres	N° de estrategias de conservación de especies silvestres que adelanta en las áreas productivas y no productivas.
	Manejo integrado de residuos	Cuenta con programa de manejo integrado de residuos (si/no).
N° de estrategias de manejo de residuos implementadas.		
<b>Principio socioeconómico</b>		
Condiciones de producción	Factores de productividad	Densidad de siembra de sistemas agrícolas.
		Carga animal por hectárea.
		Tamaño del hato ganadero.
		N° ciclos productivos de cultivos por año.
		Promedio de volumen de producción por ciclo productivo en un año.
		Promedio de volumen de producción animal/día.
		Tiempo de intervalo entre partos.
		Edad promedio de primera monta.
		Edad promedio del hato.
		Promedio de partos por vaca.
Capital social asociado a la producción agropecuaria	Formas de organización social para la producción	Tipos de organizaciones sociales que tienen injerencia en la producción agropecuaria.
	Composición de las formas de organización con injerencia en la producción	Grupos poblacionales que están vinculados y cumplen funciones en la producción agropecuaria.
	Niveles de escolaridad de los grupos poblacionales relacionados con la actividad agroproductiva (productor/a, hijos/as, parejas, otros integrantes de la familia y trabajadores)	Nivel de escolaridad (ninguno, primaria, secundaria, tecnólogo, técnico, profesional).
	Roles de género	Distribución de roles de género por grupo poblacional vinculado a la producción agropecuaria.
	Cooperación en las organización social con injerencia en la producción	Tipo de formas de cooperación presentes.
	Participación en procesos de monitoreo a la reconversión productiva	Tipos de grupos poblacionales con injerencia en la producción agropecuaria que participan del monitoreo a la reconversión.

CRITERIO	INDICADORES	CUANTIFICADORES
Sistemas de conocimiento	Percepción sobre producción agropecuaria sostenible en las organizaciones con injerencia en la producción	Favorabilidad/des favorabilidad hacia la producción sostenible.
	Criterio aplicado para la producción agropecuaria en las organizaciones sociales con injerencia en la producción	Tipo de criterio aplicado a la producción agropecuaria (ancestral, tradicional, técnico local-externo, profesional local-externo).
	Capacidad de adaptabilidad al cambio en factores productivos en las organizaciones sociales con injerencia en la producción	Nivel de adaptabilidad al cambio (alto, medio, bajo, nulo).
	Conocimiento sobre producción agropecuaria sostenible en las organizaciones sociales con injerencia en la producción	Nivel de conocimiento de producción agropecuaria sostenible (alto, medio, bajo, nulo).
	Conocimiento para adaptabilidad y respuesta a eventos meteorológicos extremos en las organizaciones sociales con injerencia en la producción	Nivel de conocimientos para la adaptabilidad (alto, medio, bajo, nulo).
	Conocimiento tradicional relacionado con uso y cuidado de la biodiversidad del páramo	Presencia/ausencia.
Garantías de bienestar de poblaciones humanas relacionadas con la producción agropecuaria	Capacidad de autoabastecimiento de alimento	Volumen de alimentos día que demandan los grupos humanos del agroecosistema.
		N° de fuentes alimento disponibles en el agrosistema.
		% de aporte de alimentos del agroecosistema a la demanda diaria de las poblaciones humanas
	Acceso a servicios públicos (agua potable, energía, saneamiento)	Presencia/ausencia de servicios públicos básicos.
	Acceso a atención médica de la población relacionada con la actividad productiva	% de la población relacionada con la actividad productiva que tiene acceso a servicio médico.
	Acceso a atención de salud laboral de la población relacionada con la actividad productiva	% de la población relacionada con la actividad productiva que tiene acceso a atención de riesgos profesionales.
	Jornada laboral apropiada	Tiempo de jornada laboral.
		Tiempo de descanso permitido por jornada laboral.
Disponibilidad lugares confortables y seguros para los espacios de descanso y toma de alimentos de quienes realizan la actividad productiva	Tipos de infraestructura disponibles para el bienestar de poblaciones relacionadas con la actividad productiva.	
Remuneración justa	Comparativo entre el monto mínimo de salario reconocido vs. monto mínimo acordado en la zona.	

CRITERIO	INDICADORES	CUANTIFICADORES
Garantías bienestar de poblaciones animales	Capacidad de autoabastecimiento de alimento y agua para animales	Volumen de alimentos día que demandan los grupos de animales pertenecientes a la actividad agroproductiva.
		N° de fuentes alimento propias del agrosistema que se usan para la demanda animal.
		% de aporte de alimentos del agroecosistema a la demanda diaria de las poblaciones animales de los sistemas de producción.
		N° de puntos de abastecimiento de agua para animales por área productiva (lote, tajo, parcela, corte).
Acceso a recursos externos de soporte para la producción sostenible	Acceso a servicios técnicos agropecuarios	% de la población relacionada con la actividad productiva que recibe asistencia técnica agropecuaria para la producción sostenible.
	Acceso a servicios bancarios de apoyo a la producción	% de la población relacionada con la actividad productiva que tiene acceso a servicios bancarios para la producción sostenible.
	Participación de procesos de incentivos a la producción sostenible	N° acuerdos de reconversión productiva firmados por la población relacionada con actividades agroproductivas
Apropiación cultural asociada al páramo	Valor espiritual del páramo	Presencia/ausencia de valores espirituales relacionados con el páramo.
		Áreas de interés espiritual.
		% del área de interés espiritual que presenta conflicto con áreas agroproductivas.
		% del área de interés espiritual que presenta conflicto con otros usos
	Valor simbólico y apropiación cultural del páramo	Presencia/ausencia de valores simbólicos relacionados con el páramo.
		Tipos de valores simbólicos que representa el páramo.
Capital financiero	Diversidad de ingresos de carácter agroproductivo	N° de actividades agropecuarias que generan ingresos para el sostenimiento económico.
		Tipo de actividades agropecuarias que generan ingresos para el sostenimiento económico.
	Capacidad de acceso a nuevas áreas por fuera de páramo para el desarrollo de la actividad agropecuaria	Presencia/ausencia de interés de acceder a nuevas áreas por fuera de páramo para el desarrollo de la actividad agropecuaria.
		Nivel de capacidad económica para acceder a nuevas áreas por fuera de páramo para el desarrollo de la actividad agropecuaria (Alto, medio, bajo, nulo).
	Márgenes de rentabilidad de la actividad productiva	Promedios de rentabilidad de las actividades agropecuarias.
	Redes de comercialización de la producción agropecuaria	Alcances de las redes de comercialización de productos agropecuarios (local, regional, nacional).
		Tipo de redes de comercialización (especializada, no especializada).
		Participación equitativa en los eslabones de la cadena productiva.
		Eslabones de la cadena productiva sobre los que tiene injerencia con la producción agropecuaria.
		Valor recibido por concepto de sobre precio por producción sostenible.

CRITERIO	INDICADORES	CUANTIFICADORES
<b>Principio de gestión</b>		
Reconversión productiva	Actores sociales	N° de familias beneficiadas en procesos de reconversión productiva.
		N° de organizaciones sociales de carácter productivo beneficiarias de procesos de reconversión.
		N° de iniciativas agroproductivas apoyadas en procesos de comercialización.
	Áreas en proceso de reconversión	Áreas intervenidas con procesos de reconversión.
		Áreas con actividad productiva preexistentes destinadas a la sustitución.
	Agrobiodiversidad	N° de especies de agrobiodiversidad implementadas en el proceso de reconversión.
Gestión socioambiental	Acuerdos marco	N° de acuerdos socioambientales para la sostenibilidad del territorio establecidos con las comunidades.
		N° de iniciativas de educación ambiental apoyadas.
		N° de acuerdos institucionales firmados.
	Instrumentos de gestión	N° de instrumentos para la gestión y manejo de áreas de páramo elaborados participativamente.
		N° de propuestas e instrumentos de ordenamiento ambiental del territorio construidas participativamente (planes de vida, planes veredales, planes regionales, planes de áreas protegidas).
	Actividades comunitarias	N° de actividades comunitarias desarrolladas en el marco del proceso de reconversión (recorridos, reuniones comunitarias, talleres, intercambios experiencias, conversatorios, encuentros, seminarios, socialización, visita técnica).
	Tiempo del proceso	Tiempo en años que el predio lleva implementando acciones de reconversión productiva.
		Tiempo en años en el que se llevan registros de las actividades agroproductivas que el predio adelanta.
	Línea base	Escenario productivo en el que arranca el proceso de reconversión productiva (convencional, BPA/BPG, sustitución de agroquímicos, agroecológico).
	Reconversión productiva	Actores sociales
N° de organizaciones sociales de carácter productivo beneficiarias de procesos de reconversión.		
N° de iniciativas agroproductivas apoyadas en procesos de comercialización.		
Áreas en proceso de reconversión		Áreas intervenidas con procesos de reconversión.
		Áreas con actividad productiva preexistentes destinadas a la sustitución.
Agrobiodiversidad		N° de especies de agrobiodiversidad implementadas en el proceso de reconversión.

CRITERIO	INDICADORES	CUANTIFICADORES
Gestión socioambiental	Acuerdos marco	N° de acuerdos socioambientales para la sostenibilidad del territorio establecidos con las comunidades.
		N° de iniciativas de educación ambiental apoyadas.
		N° de acuerdos institucionales firmados.
	Instrumentos de gestión	N° de instrumentos para la gestión y manejo de áreas de páramo elaborados participativamente.
		N° de propuestas e instrumentos de ordenamiento ambiental del territorio construidas participativamente (planes de vida, planes veredales, planes regionales, planes de áreas protegidas).
	Actividades comunitarias	N° de actividades comunitarias desarrolladas en el marco del proceso de reconversión (recorridos, reuniones comunitarias, talleres, intercambios experiencias, conversatorios, encuentros, seminarios, socialización, visita técnica).
	Tiempo del proceso	Tiempo en años que el predio lleva implementando acciones de reconversión productiva.
		Tiempo en años en el que se llevan registros de las actividades agroproductivas que el predio adelanta.
	Línea base	Escenario productivo en el que arranca el proceso de reconversión productiva (convencional, BPA/BPG, sustitución de agroquímicos, agroecológico).

# CAPÍTULO 09

---

- ⊕ Plan de cierre y abandono minero y su relación con la rehabilitación y recuperación ecológica
- ⊕ Escenarios para el desarrollo de programas de restauración y rehabilitación ecológica en áreas afectadas por actividades mineras
- ⊕ Estabilidad física de las zonas alteradas
- ⊕ Recuperación del suelo
- ⊕ Aguas contaminadas por actividades mineras
- ⊕ Plataformas, criterios, indicadores y cuantificadores de monitoreo
- ⊕ Conclusiones

# Plataformas e indicadores de monitoreo en proyectos de restauración ecológica de áreas afectadas por minería y actividades extractivas





Los páramos afectados por actividades mineras suelen resultar altamente degradados en cada uno de sus compartimentos naturales –flora, fauna, suelo y geformas–; por eso, en estos casos no se podría hablar de restauración ecológica estricta, sino de rehabilitación y de recuperación ecológica.

En Colombia las actividades mineras en páramos ocupan aproximadamente un 0.0002 % de la superficie (Cabrera y Ramírez, 2014); no obstante, según Garay Salamanca (2013), la alteración de un fragmento de páramo podría significar la desaparición de un ecosistema único. Actualmente en los páramos colombianos se explotan diversos minerales, como carbón, esmeralda, materiales de construcción, níquel, oro y metales preciosos, entre otros. El carbón, el oro y los materiales de construcción son los más explotados en los páramos del país y, por ende, los que presentan una mayor cantidad de títulos mineros otorgados.

Como se ha destacado a lo largo del libro, es claro que los ecosistemas de los páramos son sumamente importantes como reguladores del agua en el país, de hecho, las actividades mineras deberían realizarse por fuera de las zonas de páramo dando prioridad a los beneficios que los ecosistemas naturales representan para las comunidades humanas. La velocidad de recuperación de los ecosistemas paramunos es mucho más lenta que en otros ecosistemas del trópico siendo esta otra de las razones para evitar actividades extractivas en los páramos colombianos.

En teoría, la minería debería llevarse a cabo de una manera responsable, que incluya en su planeación los procesos de rehabilitación y recuperación ecológica de los ecosistemas que se verán afectados, esto implica un cambio radical en la metodología de planeación minera –proyección de extracción de minerales– pues se deben tener en cuenta no solamente los beneficios económicos de las empresas sino también los beneficios sociales que aporta el medio natural a la sociedad y la necesidad de preservarlo. Es igual de importante estudiar con mayor profundidad la velocidad de recuperación de dichos beneficios.

Las etapas de explotación y cierre minero, en especial esta última, deberían incluir la rehabilitación ecológica como base y guía para su ejecución. Está demostrado que cuando se implementa paralelamente la etapa de cierre minero a la explotación –cerrando

los frentes de mina que se consideran improductivos o terminados– es mucho más rentable para la empresa minera y brinda mejores posibilidades para la recuperación ambiental del área; ahora bien, si dicha recuperación ambiental se enfocase en metodologías y procesos de restauración ecológica sería sin duda una ganancia no solamente para el proyecto minero sino también para la sociedad y la naturaleza.

En este capítulo se mencionan algunas de las afectaciones ambientales asociadas a las actividades mineras, los posibles escenarios para proyectos de rehabilitación ecológica que se pueden presentar en explotaciones mineras de páramo inactivas o cerradas, así como los programas y plataformas de monitoreo de proyectos de restauración en zonas afectadas por minería superficial y subterránea.

### Plan de cierre y abandono minero y su relación con la rehabilitación y recuperación ecológica

Las explotaciones mineras cuentan con varias etapas: exploración, construcción, comisionamiento, explotación y cierre, estas dos últimas deberían llevarse a cabo de forma paralela idealmente. La definición de plan de cierre según el Ministerio de Minas y Energía (2003) es:

(...) la terminación de actividades mineras o desmantelamiento del proyecto originado en renuncia total, caducidad o extinción de los derechos del titular minero. Es la última etapa del desarrollo de una mina y se presenta cuando los márgenes de rentabilidad no son los adecuados por los bajos tenores o agotamiento de las reservas que no la hacen competitiva con otras minas.

Cada plan de cierre minero es único, puesto que está diseñado con base en las características de la operación, de la zona y recursos afectados, así como en el uso futuro que se pretende dar a las áreas rehabilitadas. Si dicho plan se articula con procesos de restauración ecológica depende de la propuesta realizada por la empresa extractiva al momento de solicitar la licencia ambiental y de la entidad ambiental competente que la emite; cabe resaltar que se aseguraría su inclusión si las normas y los términos de referencia entregados por las

autoridades ambientales contemplaran específicamente la inclusión de la restauración ecológica.

Los planes de cierre de mina en Colombia se regulan en el Código de Minas, Ley 685 de agosto 15 de 2001, desafortunadamente las medidas técnicas y ambientales reguladas no siempre se han aplicado exitosamente. Existen numerosos proyectos mineros que se han abandonado sin implementar las medidas de cierre correspondientes, todo esto se debe a múltiples factores como la falta de seguimiento y control por parte de la autoridad y la minería ilegal (Arango, 2012).

En Colombia se requiere con urgencia un proceso de concientización y control de las autoridades ambientales encargadas de velar por la implementación de los planes de cierre, al igual que de las empresas dedicadas al rubro minero. Como antecedente principal se encuentra la necesidad de contar como mínimo con un plan de cierre minero tradicional para tener una plataforma de trabajo que permita implementar planes y procesos de restauración ecológica (Anexo 4).

En algunos casos severos –p. ej. minas abandonadas sin haber llevado a cabo la implementación de un plan de cierre con bases técnicas y operativas adecuadas o peor aún la minería ilegal– los impactos ambientales más frecuentes son Worrall et al. (2009):

- + Paisajes físicamente alterados.
- + Pilas de desechos o estériles.
- + Subsistencia.
- + Combustión espontánea de desechos de carbón (minas de carbón).
- + Contaminación del agua superficial y subterránea por el aporte de aguas ácidas y concentraciones altas de metales, al igual que de sedimentos.
- + Infraestructura y maquinaria abandonadas.
- + Pérdida de la vegetación.
- + Pozos abiertos (*open pits*).

### Escenarios para el desarrollo de programas de restauración y rehabilitación ecológica en áreas afectadas por actividades mineras

Los proyectos de rehabilitación y recuperación (Cuadro 9) ecológica en zonas mineras pueden encontrarse en diferentes escenarios que dependen del nivel de de-



**Cuadro 9.** Objetivos de la rehabilitación y la recuperación ecológica (Cabrera y Ramírez, 2014).

**Rehabilitación ecológica (rehabilitation):** llevar al sistema degradado a un sistema similar o no al sistema predisturbio, este debe ser autosostenible, preservar algunas especies y prestar algunos servicios ecosistémicos.

**Recuperación ecológica (reclamation):** recuperar algunos servicios ecosistémicos de interés social. Generalmente los ecosistemas resultantes no son autosostenibles y no se parecen al sistema predisturbio.

gradación de los sistemas naturales, de los recursos económicos, técnicos y humanos que se posean y, no menos importante, de la ubicación y tipo de ecosistema afectado. En este apartado se abordan tres posibles escenarios tanto para minería subterránea como para minería de superficie, con el fin de identificar los objetivos de restauración que tengan lugar en cada uno de ellos: 1) proyecto minero con plan de cierre y abandono ejecutado totalmente; 2) proyecto minero con plan de cierre y abandono ejecutado parcialmente, y 3) proyecto minero o actividad minera sin plan de cierre y abandono.

La rehabilitación ecológica sería entonces el principal objetivo por alcanzar en una zona afectada por actividades extractivas, sin embargo, se debe ser coherente con el grado de disturbio en que se encuentran los compartimentos del ecosistema objeto de trabajo y por ende definir si es un candidato para la rehabilitación o en su defecto para la recuperación ecológica.

- + **Proyecto minero con plan de cierre y abandono ejecutado exitosamente:** en este caso se habla de un proyecto minero que cuenta con un plan de cierre aprobado a través de una licencia ambiental e implementado a cabalidad, es decir, que se han invertido recursos para poder proceder a la cesación de derechos por parte de la compañía minera. Existe un grupo de profesionales encargados de la ejecución del cierre y, por tanto, se cuenta con el

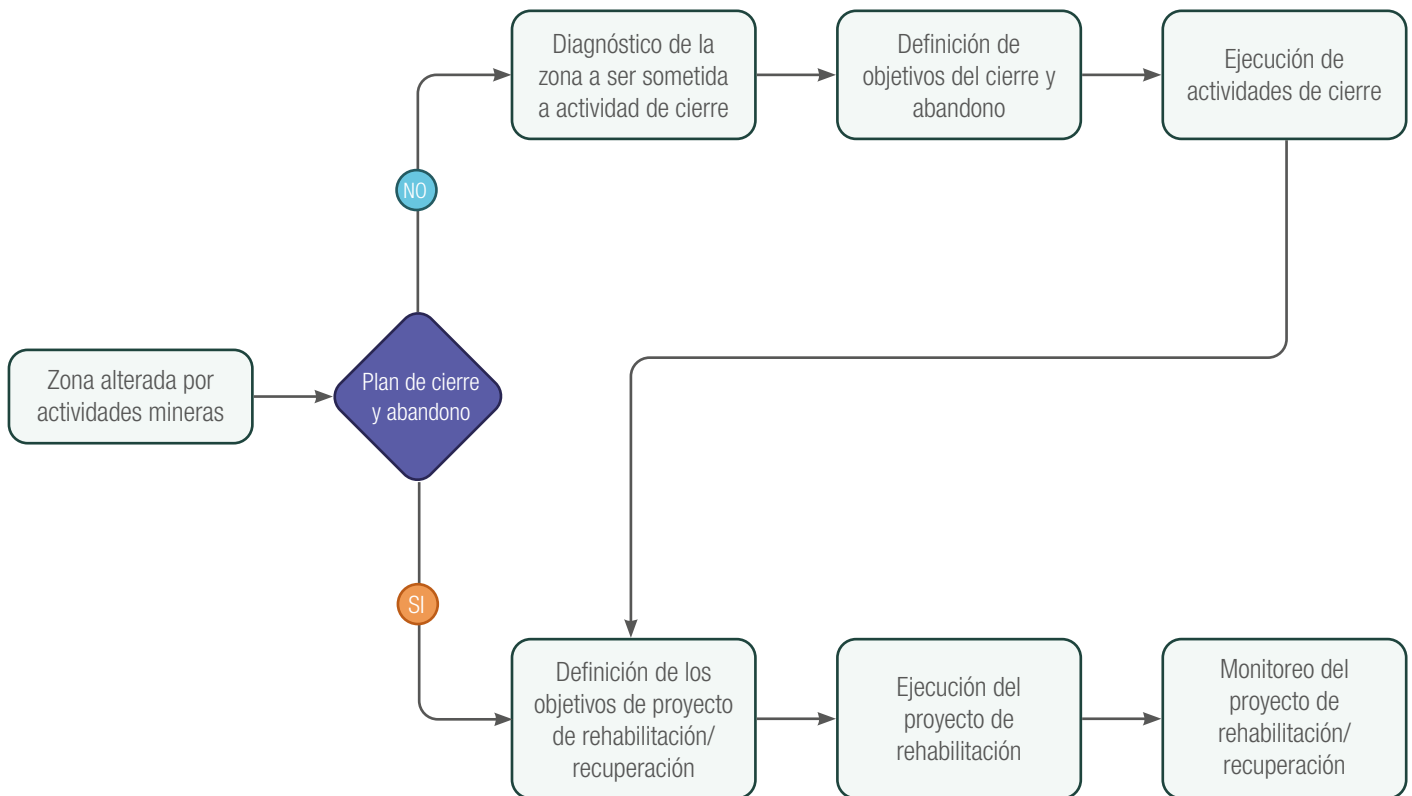
soporte técnico documentado de las acciones llevadas a cabo. El área se encuentra adecuada para proceder a darle otro uso.

- + **Proyecto minero con plan de cierre y abandono parcialmente ejecutado:** en este caso, se trata de un proyecto minero que cuenta con una licencia ambiental aprobada que contempla medidas para el cierre de la mina; sin embargo, no todas las medidas planteadas se han llevado a cabo y posiblemente no se tiene toda la información referente a dichas actuaciones.
- + **Proyecto minero sin plan de cierre y abandono:** este es el escenario más negativo que se puede encontrar en zonas con actividades mineras, ya sea porque la compañía minera abandonó el proyecto sin ejecutar acciones para el cierre o porque se tra-

ta de minería ilegal en donde no existen responsables, por lo tanto todas las actividades que se han realizado están exentas de cualquier tipo de medida preventiva o de protección para el medio ambiente y las personas. En la Figura 56 se presenta un gráfico para la toma de decisiones teniendo en cuenta el tipo de área minera a rehabilitar.

Para elaborar y llevar a cabo la fase de monitoreo en un proyecto de rehabilitación y recuperación ecológica, se deben tener muy claros los objetivos que se pretenden alcanzar con dicho proyecto a través del tiempo –corto, mediano y largo plazo–. El punto de partida es contar con un objetivo claro en el proyecto de restauración, para este caso sería: rehabilitar o recuperar las zonas afectadas por un proyecto minero, restableciendo algunos beneficios ecosistémicos que puedan aprovecharse por las comunidades presentes en el área de influencia.

**Figura 56.** Toma de decisiones para proyectos de rehabilitación/recuperación en áreas afectadas por actividades mineras. Fuente: Elaboración propia.



Teniendo en cuenta el origen de los disturbios y la amplia bibliografía existente para algunas de las plataformas de monitoreo, a continuación, se presentan tres plataformas en particular: 1) estabilidad física de las zonas alteradas, 2) recuperación del suelo y 3) aguas contaminadas por actividades mineras.

### Estabilidad física de las zonas alteradas

En los proyectos extractivos es común encontrar frentes de explotación y finales de corta en minería a cielo abierto, túneles y galerías en minería subterránea y escombreras en ambos escenarios.

Es importante que el plan de cierre contemple el remodelado de las formas del relieve y la revegetación, asegurando en la medida de lo posible estabilidad física de todas las áreas afectadas por el movimiento de tierras. Se debe tener en cuenta el tipo de material, el paisaje circundante, los recursos existentes y la topografía de la zona antes de someterla a rehabilitación. En las zonas de explotación –huecos, frentes y taludes finales de corta– según Aramburu et al. (1990): “las actuaciones son más limitadas debido, por un lado, a que el emplazamiento es un factor geológico fijo e inamovible y, por otro, a que por las características de los materiales el modelado en general es más difícil”.

Las formas finales no solamente deben diseñarse de tal manera que se garantice su estabilidad sino que se adapten al paisaje circundante. Por otro lado, deben llevarse a cabo obras de protección y estabilización como cunetas, muros de retención, trinchos, entre otros, que prevengan la pérdida de suelos y que promuevan el incremento en la estabilidad de las diferentes áreas rehabilitadas.

Según Suarez (2001), el monitoreo y el mantenimiento de las obras es esencial para garantizar una vida útil eficiente, la falta de mantenimiento puede generar grandes fallas y, por ende, mayores gastos e inconvenientes. El monitoreo permite detectar la necesidad de una reparación o mantenimiento y provee las bases para el diseño de estas reparaciones si se requieren, además mide los cambios en las condiciones topográficas, hidráulicas o ambientales con el tiempo. El monitoreo debe realizarse en forma regular y especialmente en los periodos de intensas precipitaciones o largas sequías (Anexo 5. Ficha de monitoreo de la estabilidad física).

Los elementos a monitorear (Suarez, J. 2001) son los siguientes:

- ⊕ Inspección del sitio en forma regular.
- ⊕ Topografía del sitio a intervalos determinados de tiempo.
- ⊕ Observaciones geomorfológicas.
- ⊕ Recolección de nueva información hidrológica e hidráulica.

Los procesos de remoción en masa y la erosión del suelo son indicadores al momento de evaluar la estabilidad física de las áreas a rehabilitar, de igual manera es importante monitorear posibles subsidencias del terreno en las zonas sometidas a minería subterránea en especial aquellas en donde las galerías y túneles no fueron rellenados y sellados al finalizar la explotación.

En las áreas con subsidencia lo ideal es rellenar la cavidad, de ser posible con materiales compactos – como cemento–; esto, sin duda, representa un alto costo económico y posiblemente poco realista en caso de que la restauración se lleve a cabo en lugares abandonados o sin cierre, por tanto, se recomienda delimitar y señalar el área de riesgo, evitando el ingreso y permitiendo la estabilización natural del terreno.

### Recuperación del suelo

Con respecto a la recuperación del suelo, Paradelo (2013) afirma que:

Durante las actividades mineras, los perfiles originales del suelo son destruidos hasta una profundidad de al menos un metro, y a veces parcial o completamente sustituidos por materiales de profundidades mayores. Estos están normalmente menos alterados que el suelo original y la exposición a las condiciones de la superficie produce una meteorización acelerada que da lugar a suelos con propiedades muy distintas a las de los originales. Estos no presentan las características físicas, químicas ni biológicas necesarias para el soporte y desarrollo de la vegetación natural (colonización del área por las especies del entorno) o de las nuevas especies a instalar durante la restauración. Por ello, el acondicionamiento de los materiales para hacerlos más aptos para la revegetación es una

etapa crucial en una restauración. La corrección de las limitaciones de los residuos mineros y suelos de mina y su conversión en un sustrato apropiado para la restauración implica la actuación simultánea sobre sus propiedades físicas, químicas y biológicas. El mecanismo fundamental de la rehabilitación es el de acelerar los procesos naturales de colonización y sucesión vegetal, superando los factores que limitan el establecimiento de la vegetación.

El horizonte orgánico de suelo descapotado al momento de preparar los frentes de explotación y otras áreas intervenidas debe almacenarse, monitorearse y preservarse para su uso posterior en la etapa de cierre del proyecto, con el fin de garantizar éxito en el establecimiento del material vegetal de las áreas a rehabilitar. Sin embargo, es altamente probable que en las áreas afectadas por actividades extractivas de los páramos de Colombia no se cuente con suficiente material para recubrir todas las áreas que se pretenden rehabilitar o que dicha capa orgánica no se haya almacenado en lo absoluto, puesto que el manejo ambiental de gran parte de las explotaciones mineras en los páramos del país es deficiente o mal planificado. Sumado a esto, cuando el escenario involucra minería ilegal el suelo descapotado posiblemente se ha perdido en su totalidad o se encuentra altamente contaminado. Lo anterior implica la búsqueda de alternativas para asegurar el establecimiento del material vegetal y la recuperación de los sustratos, por lo que se recomienda evaluar el uso de enmiendas orgánicas con la finalidad de iniciar la recuperación en la fertilidad del sustrato por la influencia de la materia orgánica en las condiciones físicas del sustrato, puesto que promueve la aparición de una estructura estable, reduce la densidad aparente e incrementa la capacidad de retención de agua. Así mismo, aporta nutrientes esenciales, como el nitrógeno, e incrementa la capacidad de cambio catiónico, facilitando la retención de los nutrientes incorporados. Al introducir poblaciones microbianas, las enmiendas orgánicas incrementan la actividad biológica directa o indirectamente (Paradelo, 2013).

Existen algunos indicadores que permiten el seguimiento a los procesos de recuperación de los suelos, como: cambios en el pH del suelo, aumento del contenido de nutrientes, ganancia de materia orgánica, bio-

masa microbiana, respiración del suelo, productividad vegetal, disminución en la acidificación, disminución en la conductividad eléctrica, aumento en la capacidad de retención de humedad, disminución en la vulnerabilidad a la erosión, estabilidad de la estructura, entre otros. Estos ayudan a determinar la fertilidad del suelo que está presente en las áreas a rehabilitar, esta es entendida como la capacidad del suelo de hacer disponible a la planta los nutrientes necesarios para su desarrollo (Raudes y Sagastume, 2009).

Es importante resaltar que en los sustratos mineros la estructura del suelo es nula o prácticamente inexistente, puesto que son materiales removidos. Por esto, un objetivo a largo plazo puede ser el que aparezca una estructura laminar débil (Paradelo, 2013), mientras que los suelos arcillosos son más propensos a acelerar el surgimiento de estructura, por tanto, se podría recomendar que las arcillas hagan parte de las enmiendas a aplicar a los sustratos objeto de rehabilitación.

En las zonas afectadas por minería metálica es posible encontrar concentraciones anormalmente altas en el suelo de elementos potencialmente tóxicos (Cu, Ni, Zn, Pb, As), suficientes para crear un ambiente adverso para el desarrollo vegetal. Con frecuencia los efectos negativos de estos elementos se encuentran combinados con valores muy bajos de pH, asociados a problemas de drenajes ácidos, y a la oxidación de los sulfuros en los que se encuentran habitualmente estos elementos; aunque las concentraciones totales de estos elementos son de interés, son más relevantes su movilidad y biodisponibilidad que dependen de las formas químicas en las que se encuentren (Paradelo, 2013).

Existen diferentes tecnologías para llevar a cabo la remediación del suelo en los casos de las zonas afectadas por minería metálica: destrucción o modificación de contaminantes, extracción o separación de contaminantes y aislamiento o inmovilización de contaminante. Los tratamientos se pueden realizar *in situ* o también *ex situ*, este último implica la excavación y remoción del material a ser tratado. Para esto, se pueden emplear tratamientos biológicos (remediación), fisicoquímicos y térmicos (Valles, 2008).

Al comparar los tres tipos de tratamientos, cabe señalar que los biológicos son efectivos en cuanto a costos y también a su impacto ambiental; sin embargo,

requieren mayor tiempo de aplicación, monitoreo de la toxicidad de los productos y no pueden emplearse en suelos que no favorezcan el crecimiento microbiano (Valles, 2008). Esto último crea inconvenientes para los sustratos de zonas mineras y, por lo tanto, es necesario garantizar que dichos sustratos cuenten con una cantidad mínima de materia orgánica que permita la aplicación de tratamientos basados en la biorremediación, de forma que “aprovecha la diversidad y versatilidad genética de los organismos para producir rupturas o cambios moleculares en los contaminantes generando compuestos de menor o nulo impacto ambiental” (Valle, 2008). En caso de incluir la biorremediación de suelos en el proyecto de rehabilitación es preciso estudiar a profundidad los posibles organismos a utilizar para este tipo de tratamiento.

### Aguas contaminadas por actividades mineras

Uno de los impactos ambientales más preocupantes originado por las actividades mineras es la generación de aguas ácidas. El Drenaje Ácido de Mina (DAM) es el agua contaminada proveniente de las áreas minadas, ya sea superficial o subterránea su composición se caracteriza por tener alta acidez, rica en sulfato y con niveles elevados de metales pesados, principalmente hierro, manganeso y aluminio. Su coloración por lo general es rojiza debido al hierro oxidado presente en la reacción química.

El DAM se genera cuando los minerales de sulfuro reaccionan con el oxígeno del aire y el agua o medio húmedo presente, condiciones favorables para su oxidación química o a la oxidación rápida por bacterias tales como *Thiobacillus ferrooxidans*. Algunos autótrofos de hierros oxidados como *Leptospirillum ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans* y *Sulfolobus brierleyii* se pueden asociar también a la oxidación mineral biológica (Díaz, 2013). Como producto de la oxidación se genera el ácido sulfúrico que acidifica los efluentes mineros, lo anterior ocurre con frecuencia en minas de carbón y metálicas; “el drenaje ácido de minas de metal presenta un problema más severo que la mayoría de los drenajes de mina de carbón porque los agentes prioritarios de contaminación tal como As, Cd, Pb, Hg, Cu y Zn pueden estar presentes en peligrosas concentraciones”. Bajo estas condiciones

se incrementa la disolución de los metales y, como consecuencia, aumenta significativamente su movilidad y la concentración de sólidos disueltos en el agua (Wildeman y Laudon, 1989).

Es importante resaltar que cuando los DAM se producen luego del cierre de las operaciones mineras, constituyen un problema mayor debido a que (Sánchez y Ferreira, 2016):

- ⊕ Comienzan a producirse, o a advertirse, luego de un largo período de inactividad de la mina y se han diluido todas las responsabilidades.
- ⊕ A veces el período de inactividad es tan largo que ni siquiera se tiene registro de las faenas mineras cerradas.
- ⊕ La acidez no constituye el único problema, puesto que numerosos metales migran disueltos en los drenajes.
- ⊕ Afectan aguas superficiales y subterráneas de toda la cuenca de diversos modos. En algunos casos, es una mera disminución del pH general, pero en muchos otros la carga de metales precipita una parte, y la otra parte llega a plantas de potabilización o de adecuación de agua a otros usos.
- ⊕ El problema excede límites jurisdiccionales y las responsabilidades y alternativas de acción se diluyen burocráticamente.
- ⊕ Los presupuestos para la solución son insuficientes o las soluciones son solo paliativos momentáneos.
- ⊕ Los métodos activos para eliminar el problema que se aplican durante la operación de la mina superan los presupuestos de los gobiernos locales que tienen que atenderlos luego de que la operación minera ha terminado.
- ⊕ Los métodos pasivos cuyos costos son manejables son a la vez muy variados. Además, existen opiniones contradictorias respecto a su utilización.

En este contexto, se han desarrollado algunos tratamientos pasivos de los DAM que pueden tenerse en cuenta al momento de plantear un proyecto de rehabilitación en áreas minadas. Dichos tratamientos imitan algunos de los procesos químicos, físicos y biológicos que se presentan en la naturaleza, y son llamativos porque no requieren el aporte de sustancias químicas ni tampoco elementos mecánicos durante el tratamiento,

salvo los mecanismos de control y monitoreo pertinentes (Sánchez y Ferreira, 2016).

A continuación, se mencionan algunos procesos o tratamientos pasivos de los DAM que pueden combinarse, si es del caso, con la finalidad de garantizar efluentes de calidad aceptable con base en la normatividad ambiental. Los siguientes puntos se adaptan de Sánchez y Ferreira (2016).

- ⊕ Los humedales artificiales (aeróbicos y anaeróbicos): se caracterizan por suelos saturados en agua o sedimentos de lagunas someras con vegetación adaptada a condiciones reductoras en la zona de sus rizomas.
- ⊕ Los drenajes anóxicos en calizas (en inglés, Anóxic Limestone Drains): consisten en una trinchera rellena con material calcáreo con una cubierta de suelo y un cobertor plástico, el agua entra en contacto con la caliza en condiciones anóxicas de manera que esta aumenta el pH y agrega alcalinidad.
- ⊕ Los productores continuos de alcalinidad (en inglés, Successive Alkalinity Producing Systems): son una combinación de los Drenajes Anóxicos en Caliza (DAC) con un sustrato orgánico.
- ⊕ Piletas de caliza: se fundamentan en un estanque excavado como para contener un espesor no mayor de un (1) metro de caliza sobre la que se vierte el DAM que al escurrir a través de esta se neutraliza y discurre por los drenajes de fondo a las piletas de decantación y precipitación.
- ⊕ Los canales de caliza (en inglés Open Limestone Channels): consisten canales que no superan el metro de ancho y no más de 30 cm de profundidad de manera que paredes y fondo se encuentran cubiertos con roca carbonatada, el proceso de alcalinización se logra por la circulación del DAM por el canal y la disolución de la caliza.
- ⊕ Barreras reactivas permeables (en inglés, Permeable Reactive Barriers): consta de material permeable ubicado en la dirección de la corriente subterránea de material no deseable (DAM) interpuesta antes de que este llegue al sistema hídrico natural existente en el área.
- ⊕ Tratamiento de arena calcárea: consiste una cierta cantidad de carbonato molido a malla (arena gruesa entre 1mm y 2 mm) se vierte sobre los arroyos que

reciben el DAM de forma que este agregado carbonato alcalinice la corriente a lo largo de su curso.

Como puede apreciarse, hay múltiples opciones para el tratamiento pasivo de las DAM, por ende, al plantear el proyecto de rehabilitación se deben tener presente la cantidad y calidad de aguas a tratar con el fin de presupuestar las medidas pertinentes de tratamiento.

### Plataformas, criterios, indicadores y cuantificadores de monitoreo

En este apartado se plantean las plataformas, criterios, indicadores y cuantificadores definidos en León (2019) a tener presente dentro de la planeación del monitoreo de un proyecto de rehabilitación/recuperación en zonas afectadas por actividades mineras. De igual manera, se presenta la escala temporal y geográfica del monitoreo (Tabla 14).

Es importante tener en cuenta que los criterios “representan aspectos generales del ecosistema, por ejemplo, la estructura, la composición, los factores de degradación, las interacciones entre organismos”; los indicadores “son variables de proyecto que se utilizan para evaluar la condición de un criterio específico. Los indicadores solo deben transmitir información, y no debe confundirse con las condiciones con las que cumplen los criterios”, y las métricas o cuantificadores “son los métodos para verificar, medir o evaluar un indicador” (León, 2019).


**Tabla 14.** Plataformas, criterios, indicadores y cuantificadores. Modificada de: León (2019).

Principio	Plataforma	Objetivos	Metas	
			Corto plazo	Mediano plazo
			(0-2 años)	(2-10 años)
Ecológico	Estabilidad física	Adecuar o remodelar en lo posible la topografía final teniendo en cuenta la existente en la zona antes de la actuación minera, e intentar reproducir las formas características del paisaje circundante.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remodelar en lo posible la topografía y utilizar cuando si es del caso los estériles para rellenar huecos y adaptarse a las sinuosidades del relieve.</li> <li>• Llevar a cabo la ejecución de obras de protección y estabilización en las áreas identificadas como susceptibles a procesos erosivos o aquellas por donde transcurren corrientes superficiales y de escorrentía.</li> <li>• Delimitar y señalar las áreas riesgosas, tales como bocaminas, taludes y laderas inestables, al igual que las zonas propensas a la subsidencia ocasionada por el colapso de túneles.</li> <li>• En zonas afectadas por subsidencias permitir la estabilización natural del terreno.</li> <li>• En caso de almacenamiento de colas acuosas en presas de relaves, delimitar y señalar dicha estructura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remodelar en lo posible la topografía y utilizar, cuando es del caso, los estériles para rellenar huecos y adaptarse a las sinuosidades del relieve.</li> <li>• Llevar a cabo el mantenimiento de las obras de protección y estabilización.</li> <li>• Mantener la delimitación y señalización de las áreas riesgosas, tales como bocaminas, taludes y laderas inestables, al igual que las zonas propensas a la subsidencia ocasionada por el colapso de túneles.</li> <li>• En zonas afectadas por subsidencias permitir la estabilización natural del terreno.</li> <li>• En caso de almacenamiento de colas acuosas en presas de relaves, delimitar y señalar dicha estructura.</li> </ul>
	Suelo	Mejorar las características fisicoquímicas y biológicas de los sustratos, recuperando la capa orgánica del suelo y su evolución.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realizar enmiendas edáficas que permitan mejorar las características de los materiales superficiales, encaminadas a proporcionar materia orgánica y elementos nutritivos en las zonas a rehabilitar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recuperar parte de la cobertura vegetal y la biomasa de organismos del suelo.</li> <li>• Recuperar toda la cobertura vegetal y la biomasa total de organismos del suelo.</li> </ul>



	Largo plazo (>10 años)	Indicador	Cuantificador	Escala temporal			Escala geográfica		
				Corto plazo	Mediano plazo	Largo plazo	Parcela	Local	Regional
				(0-2 años)	(2-10 años)	(>10 años)	Parcela	Local	Regional
<ul style="list-style-type: none"> <li>Llevar a cabo el mantenimiento de las obras de protección y estabilización.</li> <li>Mantener la delimitación y señalización de las áreas riesgosas, tales como bocaminas, taludes y laderas inestables, al igual que las zonas propensas a la subsidencia ocasionada por el colapso de túneles.</li> <li>En zonas afectadas por subsidencias permitir la estabilización natural del terreno.</li> <li>En caso de almacenamiento de colas acuosas en presas de relaves, delimitar y señalar dicha estructura.</li> </ul>	1. Evidencias de erosión	Descripción y porcentaje de área afectada	Trimestral	Trimestral	Semestral				
	2. Grado de erosión	Escala de severidad	Trimestral	Trimestral	Semestral				
	3. Frecuencia de procesos de remoción en masa	Porcentaje del área	Trimestral	Trimestral	Semestral				
	4. Clase de procesos de remoción en masa	Descripción y cuantificación	Trimestral	Trimestral	Semestral				
	5. Evidencias de subsidencia	Descripción, hundimientos	Trimestral	Trimestral	Semestral				
<ul style="list-style-type: none"> <li>Recuperar parte de la cobertura vegetal y la biomasa de organismos del suelo.</li> <li>Recuperar toda la cobertura vegetal y la biomasa total de organismos del suelo.</li> </ul>	1. pH	pH (0 a 14)	Semestral	Semestral	Bianual				
	2. Capacidad de intercambio catiónico	meq/100g o cmol (+)/kg (centimoles / kg de suelo)	Semestral	Semestral	Bianual				
	3. Materia orgánica	Porcentaje	Semestral	Semestral	Bianual				
	4. Nutrientes (N, P, K, Fe, Ca, B, S)	meq/100g	Semestral	Semestral	Bianual				
	5. Densidad Aparente	g/cm <sup>3</sup>	Semestral	Semestral	Bianual				
	6. Porosidad	Porcentaje	Semestral	Semestral	Bianual				
	7. Capacidad de infiltración	mm/h	Semestral	Semestral	Bianual				
	8. Humedad	Porcentaje en relación con volumen del suelo	Semestral	Semestral	Bianual				
	9. Textura	% de arena, limo y arcilla	Semestral	Semestral	Bianual				
	10. Estructura comunidad edafofauna	Número de familias	Semestral	Semestral	Bianual				
	11. Grupos funcionales	Número de grupos funcionales	Semestral	Semestral	Bianual				

Principio	Plataforma	Objetivos	Metas		
			Corto plazo	Mediano plazo	
			(0-2 años)	(2-10 años)	
	Agua	Asegurar la regulación de los flujos hídricos superficiales y subterráneos de las zonas afectadas por actividades mineras, como también la calidad de sus aguas, en especial si hay presencia de DAM, asegurar su tratamiento.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Construir estructuras para el control de la erosión y colección de sedimentos.</li> <li>• Caracterizar la calidad y cantidad de drenajes y cuerpos de agua y asegurar su tratamiento en caso de requerirse.</li> </ul>	Monitorear la calidad de las aguas y hacer ajustes en los tratamientos proporcionados en caso de requerirse.	

	Largo plazo (>10 años)	Indicador	Cuantificador	Escala temporal			Escala geográfica		
				Corto plazo	Mediano plazo	Largo plazo	Parcela	Local	Regional
				(0-2 años)	(2-10 años)	(>10 años)	Parcela	Local	Regional
Monitorear la calidad de las aguas y hacer ajustes en los tratamientos proporcionados en caso de requerirse.	1. Tipo de cuerpo de agua	Descripción							
	2. pH	pH (0 a 14)	Trimestral	Trimestral	Semestral				
	3. Temperatura	Grados centígrados (°C)	Trimestral	Trimestral	Semestral				
	4. Oxígeno disuelto	mg/l O <sub>2</sub>	Trimestral	Trimestral	Semestral				
	5. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	Miligramos de oxígeno diatómico por litro (mg O <sub>2</sub> /l)	Trimestral	Trimestral	Semestral				
	6. Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Miligramos de oxígeno diatómico por litro (mg O <sub>2</sub> /l)	Trimestral	Trimestral	Semestral				
	7. Nutrientes (Nitritos, amonios, fosfatos)	mg/l NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , PO <sub>4</sub> , NH <sub>4</sub>	Trimestral	Trimestral	Semestral				
	8. Metales pesados (mercurio, níquel, cobre, plomo y cromo)	mg/l	Trimestral	Trimestral	Semestral				
	9. Conductividad eléctrica	µS/cm	Trimestral	Trimestral	Semestral				
	10. Sólidos suspendidos	mg/l	Trimestral	Trimestral	Semestral				
	11. Composición y diversidad de comunidad de macroinvertebrados	Número de familias Número de individuos/familia-Orden- Género Presencia/ausencia Coliformes totales Presencia/ausencia Coliformes fecales Presencia/ausencia <i>E. Coli</i>	Trimestral	Trimestral	Semestral				
	12. Estado microbiológico	Presencia/ausencia Coliformes totales Presencia/ausencia Coliformes fecales Presencia/ausencia <i>E. Coli</i>	Trimestral	Trimestral	Semestral				
	13. Precipitación	mm/mes-año	Mensual	Mensual	Mensual				

Principio	Plataforma	Objetivos	Metas		
			Corto plazo	Mediano plazo	
			(0-2 años)	(2-10 años)	
	Vegetación	Recuperar la cobertura vegetal de las zonas alteradas por actividades mineras mediante el uso de especies locales que se adapten a la naturaleza del sustrato, garantizando el proceso de sucesión vegetal basado en las especies de los ecosistemas de referencia.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asegurar la revegetación del área a recuperar con gramíneas de rápido crecimiento y propias de la zona. Iniciar introducción de especies arbustivas locales de bajo peso en las áreas revegetadas (preferiblemente leguminosas), se recomienda hacerlo en forma de matrices o núcleos de vegetación.</li> <li>• Remoción de especies invasoras.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Continuar la revegetación con especies arbustivas locales de bajo peso (preferiblemente leguminosas), se recomienda hacerlo en forma de matrices o núcleos de vegetación. De ser posible emplear productoras de alimento para la fauna local.</li> <li>• Lograr un 60-70 % de cobertura de las áreas destinadas para la revegetación</li> <li>• Remoción de especies invasoras.</li> </ul>	

	Largo plazo (>10 años)	Indicador	Cuantificador	Escala temporal			Escala geográfica		
				Corto plazo	Mediano plazo	Largo plazo	Parcela	Local	Regional
				(0-2 años)	(2-10 años)	(>10 años)	Parcela	Local	Regional
		14. Caudales	l/sg	Mensual	Mensual	Mensual			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lograr un 100 % de cobertura de las áreas destinadas para la revegetación.</li> <li>• Mantener la remoción de especies invasoras y el mantenimiento de los individuos plantados si se requiere.</li> </ul>		1. Diversidad y riqueza de especies (Alfa y Beta)	Una o más variables. Ver detalle de los cuantificadores y métodos de monitoreo en León et al. 2019 Convenio 19-016 (MinAmbiente209-2019)	Trimestral	Anual	Bianual			
		2. Abundancia y dominancia		Trimestral	Anual	Bianual			
		3. Invasiones biológicas		Trimestral	Semestral	Anual			
		4. Formas de vida presente		Semestral	Anual	Bianual			
		5. Estructura vertical		Anual	Anual	Bianual			
		6. Estructura horizontal		Anual	Anual	Bianual			
		7. Fenología		Semestral	Anual	Anual			
		8. Grupos funcionales		Semestral	Anual	Bianual			
		9. Cobertura de especies invasoras		Trimestral	Semestral	Anual			
		10. Enriquecimiento		Inicio					
		11. Crecimiento de la vegetación plantada		Trimestral	Semestral	Anual			
		12. Supervivencia		Trimestral	Semestral	Anual			
		13. Daño fitosanitario		Trimestral	Semestral	Anual			
		14. Coberturas vegetales presentes		Anual	Bianual	Bianual			

Principio	Plataforma	Objetivos	Metas		
			Corto plazo	Mediano plazo	
			(0-2 años)	(2-10 años)	
	Fauna	Asegurar la oferta de espacios en donde la fauna local pueda encontrar alimento, refugio, agua y lugares aptos para la reproducción.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cambio en la abundancia y presencia de especies o grupos de especies de hormigas indicadoras asociadas a áreas disturbadas y su reemplazo por las asociadas a zonas con vegetación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presencia de hormigas asociadas a zonas de bosque o con vegetación.</li> <li>• Presencia especies de anfibios y herpetofauna.</li> <li>• Presencia de especies o grupos de avifauna, esperados y existentes en la zona.</li> </ul>	
Socioeconómico	Participación	Los objetivos y metas de la plataforma socioeconómica dependen enteramente del tipo de proyecto y de su emplazamiento.			
	Impacto				
	Sostenibilidad				
	Fortalecimiento de capacidades				
	Vinculación de conocimiento				

	Largo plazo	Indicador	Cuantificador	Escala temporal			Escala geográfica		
				Corto plazo	Mediano plazo	Largo plazo	Parcela	Local	Regional
				(0-2 años)	(2-10 años)	(>10 años)	Parcela	Local	Regional
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento en la diversidad y abundancia de especies de anfibios y herpetofauna.</li> <li>• Aumento en la presencia de especies o grupos de avifauna, esperados y existentes en la zona.</li> </ul>	(>10 años)	1. Diversidad y riqueza de especies	Una o más variables. Ver detalle de los cuantificadores y métodos de monitoreo en Aguilar-Garavito, M. y Ramírez, W. (2015).	Semestral	Anual	Anual			
		2. Abundancia y dominancia		Semestral	Anual	Anual			
		3. Ensamblaje de especies		Semestral	Anual	Anual			
		4. Especies indicadoras		Semestral	Anual	Anual			
		6. Grupos funcionales		Semestral	Anual	Anual			
		1. Participación de personas y grupos involucrados en el diseño, implementación, monitoreo y mantenimiento de las acciones de restauración	Ver detalle de los cuantificadores y métodos de monitoreo en León et al. 2019 Convenio 19-016 (MinAmbiente209-2019)	Anual	Anual	Anual			
		2. Generación de renta económica por acciones de restauración		Anual	Anual	Anual			
		3. Implementación de incentivos a la restauración		Anual	Anual	Anual			
		4. Mantenimiento de acciones		Anual	Anual	Anual			
		5. Compromisos de la comunidad		Anual	Anual	Anual			
		6. Actividades de entrenamiento y formación		Anual	Anual	Anual			
		7. Incorporación de conocimiento e intereses de comunidades en el diseño e implementación de procesos de restauración		Anual	Anual	Anual			
		8. Transferencia de conocimiento		Anual	Anual	Anual			

Principio	Plataforma	Objetivos	Metas		
			Corto plazo	Mediano plazo	
			(0-2 años)	(2-10 años)	
Gestión	Financiación	Los objetivos y metas de la plataforma de gestión dependen enteramente del tipo de proyecto y de su emplazamiento.			
	Planeación y ejecución				
	Articulación y Armonización				
	Control y vigilancia				



Largo plazo (>10 años)		Indicador	Cuantificador	Escala temporal			Escala geográfica		
				Corto plazo	Mediano plazo	Largo plazo	Parcela	Local	Regional
				(0-2 años)	(2-10 años)	(>10 años)	Parcela	Local	Regional
		1. Disponibilidad de recursos	Ver detalle de los cuantificadores y métodos de monitoreo en León et al. 2019 Convenio 19-016 (MinAmbiente209-2019)	Anual	Anual	Anual			
		2. Sostenibilidad financiera		Semestral	Anual	Anual			
		3. Diseño		Semestral	Anual	Anual			
		4. Acciones		Semestral	Semestral	Semestral			
		5. Actores involucrados		Anual	Anual	Anual			
		6. Instrumentos, planes y programas		Anual	Anual	Anual			
		7. Personal		Semestral	Semestral	Semestral			
		8. Recorridos de vigilancia y seguimiento		Semestral	Semestral	Semestral			

## Conclusiones

Las áreas afectadas por minería presentan un reto significativamente mayor al momento de ser sometidas a procesos de rehabilitación puesto que todos los componentes ambientales han sido altamente impactados y alterados. Por esta razón, la restauración ecológica debe ser uno de los pilares sobre los cuales se diseñen los planes de cierre mineros, incluyendo actuaciones que se lleven a cabo de forma paralela a la fase de explotación y no solamente al final de la vida de los proyectos mineros.

La fase de cierre y abandono debe tomarse como una oportunidad para la implementación de procesos de rehabilitación ecológica y es necesario que dicha visión sea asimilada e interiorizada no solamente por la industria sino también por las autoridades encargadas de fiscalizar su ejecución, lo anterior puede fortalecerse si la norma respalda la obligación en la implementación de dichos procesos.

Este capítulo ratifica la necesidad de llevar a cabo el monitoreo de los procesos de restauración y rehabilitación ecológica en las áreas afectadas por actividades

extractivas sujetas al cierre y abandono, ya sea paralelo a la fase de explotación o posterior a ella. Se resalta nuevamente la necesidad de contar con un plan de cierre y abandono ejecutado que permita el desarrollo de procesos de restauración o rehabilitación ecológica. En este contexto, la estabilidad física de las áreas a rehabilitar y la fertilidad de los suelos son especialmente relevantes al momento de llevar a cabo la rehabilitación puesto que son la base de su éxito.

Otro componente crucial, y no menos importante, es el agua. En especial aquella que se encuentra expuesta a la oxidación de minerales de sulfuros puesto que se potencia la formación de los drenajes ácidos de mina, estos requieren no solamente de un mayor seguimiento y monitoreo sino también de un tratamiento que garantice su calidad final. Dentro de la literatura revisada se encuentra que la inclusión de prácticas de biorremediación en suelos y aguas contaminadas puede ser una excelente alternativa al momento de ejecutar el proyecto de rehabilitación ecológica, en especial en aquellas zonas contaminadas por metales pesados y en las presas de relaves mineros.

# CAPÍTULO 10

---

## Manejo y procesamiento de datos de monitoreo a la restauración ecológica en páramos

- ⊕ Digitalización de datos
- ⊕ Análisis de datos
- ⊕ Conclusiones



Un proyecto de restauración ecológica en cualquier ecosistema implica el desarrollo de tres fases fundamentales: 1) diagnóstico y planeación, 2) implementación, y 3) monitoreo (Machmer y Steeger, 2002; SER, 2004). Esta última fase es esencial para medir en el tiempo el éxito o fracaso de la fase de implementación, de acuerdo con los objetivos de restauración (Cabrera y Ramírez, 2014; Aguilar-Garavito y Ramírez, 2015).

Lastimosamente, en Colombia se ha observado como tendencia general la falta de esquemas de monitoreo adecuados, prefiriendo indicadores de ejecución y metas a corto plazo, los cuales no permiten evaluar la recuperación de los ecosistemas (Murcia y Guariguata, 2014; Aguilar-Garavito y Ramírez, 2015). De ahí la importancia de un buen esquema de monitoreo a mediano y largo plazo, y de reportar los resultados obtenidos con la comunidad científica y el público en general.

El propósito de este capítulo es brindar algunas herramientas útiles para manejar y procesar los datos tomados en campo durante la fase de monitoreo de un proyecto de restauración ecológica del páramo andino (Figura 57 en la pág. 146). Entre estas herramientas se encuentran algunos consejos sobre la planeación del protocolo de colecta, específicamente cómo organizar los formatos de campo, y la digitalización posterior de los datos. Se describen también algunas de las herramientas estadísticas e indicadores ecológicos más comúnmente usados y útiles para este tipo de datos, así como algunos gráficos para visualizar los resultados.

A lo largo del capítulo se utilizan, para ilustrar los diferentes ejemplos, una base de datos de la vegetación arbustiva preexistente y reclutada en áreas con diez años de restauración activa y pasiva en páramos del departamento de Risaralda. Esta base de datos, junto con un código del programa R (R Core Team, 2019), se pueden encontrar en el Anexo 6 y en el enlace: [https://github.com/ahernandezpalma/Monitoreo\\_Paramos\\_Andinos](https://github.com/ahernandezpalma/Monitoreo_Paramos_Andinos).

A lo largo del capítulo se hace referencia al código ejemplo, es importante que el lector tenga este código a la mano para que pueda comprender los ejemplos más fácilmente. El objetivo es que utilizando el código adjunto y bases de datos similares, el lector pueda procesar, analizar, visualizar y reportar sus propios datos de una forma fácil y rápida.

## Digitalización de datos

El primer paso en el análisis de datos es la preparación de los mismos, en donde el objetivo es convertir los datos recolectados en campo en algo significativo y legible por el programa de análisis a utilizar. Esta sección está enfocada en cuatro consideraciones importantes a tener en cuenta en la digitalización de los datos: 1) la estructura general de la base de datos; 2) formato consistente para nombrar las diferentes variables; 3) formato consistente de las variables numéricas, y 4) manejo de celdas vacías y NAs. Estas consideraciones están dirigidas fundamentalmente a ahorrar tiempo en la siguiente fase, a saber, el análisis de los datos.

Como primera medida es importante tener en cuenta el formato en el que se van a ingresar los datos; este está dado por la organización de las columnas y filas. Un formato ancho corresponde a una base de datos en la que cada variable está en una columna y cada observación en una fila, mientras que un formato largo tiene una columna para las diferentes variables y otra columna para los valores de esas variables. En algunas ocasiones resulta más fácil realizar ciertos análisis si los datos están en el formato requerido por ciertas funciones de R, por suerte, paquetes como *tidyr* (Wickham y Henry, 2019) y *reshape2* (Wickham, 2007) en R permiten realizar el cambio de formato –de ancho a largo, o viceversa– de una manera rápida y eficaz (Cuadro 10).

Una vez decidido el formato para almacenar los datos, se puede iniciar la digitalización de los mismos. Es importante tener en cuenta que los nombres de las columnas (variables) sean: nombres cortos y sencillos, sin mayúsculas, tildes, números, espacios o guiones. En R, nombres de variables que comienzan con números o que contengan caracteres especiales no son válidos, por lo que es necesario considerar nombres sencillos. Ejemplos de nombres de variables sencillos son: fecha (en lugar de “Fecha”), altura (en vez de “Altura (m.s.n.m.)”, perc\_cob (en lugar de “% Cobertura”).

En el momento de digitalizar los datos es importante mantener un mismo formato en toda la base de datos, ya que en algunos programas estadísticos como R, los datos que contienen letras son discriminados según contengan mayúsculas, minúsculas –p. ej. *Pinus* es diferente de *pinus*–, o espacios de más. De la misma manera, los números deben mantenerse en un mismo



**Cuadro 10. Proceso para el cambio de formato de ancho a largo para facilitar algunos análisis estadísticos que requieran de un formato diferente al usual (formato ancho).**

Algunas veces resulta necesario cambiar el formato de los datos de una manera diferente a como se digitalizaron inicialmente, con el fin de analizar los datos de forma más eficiente. Los paquetes tidy y reshape2 del programa R ayudan a realizar esta conversión rápidamente.

Por ejemplo, de la base de datos ejemplo, seleccionamos cuatro columnas: tipo de cobertura, especie, CAP, y altura. En la base de datos original, cada individuo está en una fila con la correspondiente cobertura en la que fue encontrada, su identidad taxonómica, y los valores de circunferencia y altura (Tabla 1).

Usando una línea de código, cambiamos el formato de los datos, dejando cada individuo en una fila con el valor de cada variable (CAP o altura; Tabla 2). De esta manera, se pueden analizar de forma más efectiva, como por ejemplo calcular promedios por cobertura para cada variable (Tabla 3).

**Tabla 1.** Datos originales en formato ancho con 131 filas y cuatro columnas.

Cobertura	Especie	CAP	Altura
Pastos limpios	<i>Acaena elongata</i>	3,77	80,0
Frailejonal-pajonal	<i>Baccharis rupicola</i>	3,14	91,0
Arbustal-pajonal	<i>Baccharis tricuneata</i>	3,14	67,0
Arbustal-pajonal	<i>Baccharis tricuneata</i>	3,14	76,0
Arbustal-pajonal	<i>Baccharis tricuneata</i>	3,14	95,0
Frailejonal-pajonal	<i>Baccharis tricuneata</i>	3,14	75,0
Pajonal	<i>Baccharis tricuneata</i>	3,14	56,0
Pajonal	<i>Baccharis tricuneata</i>	3,14	67,0
Pajonal	<i>Baccharis tricuneata</i>	3,14	60,0
Pastos arbolados	<i>Baccharis tricuneata</i>	3,14	41,0

**#ejemplo para cambiar de formato ancho a largo**

```
datos_ancho <- datos[c(16,19,20,22)]
datos_largo <- melt(datos_ancho,id=c("cobertura","especie"))
#promedio por cobertura
cob_avg <- cast(datos3, cobertura~variable, mean)
```

Código en R para cambiar el formato de los datos

**Tabla 2.** Datos transformados en formato largo con 262 filas y 4 columnas.

Cobertura	Especie	Variable	Value
Especie	<i>Acaena elongata</i>	CAP	3,77
Variable	<i>Acaena elongate</i>	Altura	80,00
Value	<i>Baccharis rupicola</i>	CAP	3,14
Arbustal-pajonal	<i>Baccharis rupicola</i>	Altura	91,00
Arbustal-pajonal	<i>Baccharis tricuneata</i>	CAP	3,46
Frailejonal-pajonal	<i>Baccharis tricuneata</i>	CAP	3,77
Pajonal	<i>Baccharis tricuneata</i>	CAP	4,08
Pajonal	<i>Baccharis tricuneata</i>	CAP	5,97
Pajonal	<i>Baccharis tricuneata</i>	CAP	3,14
Pastos arbolados	<i>Baccharis tricuneata</i>	CAP	3,14

**Tabla 3.** Promedio de cada variable por cobertura.

Cobertura	CAP	Altura
Arbustal-pajonal	14,64	86,43
Frailejonal-pajonal	18,62	118,89
Pajonal	17,04	67,50
Pastos arbolados	24,33	74,17
Pastos limpios	6,02	86,98



formato ya sea utilizando puntos o comas para designar los miles y las unidades decimales.

Finalmente, es importante tener presente cuando se cuenten con vacíos de información (celdas en blanco), ya que en los programas estadísticos algunas funciones no trabajan correctamente con este tipo de datos. Para esto es necesario convertir estos espacios en blanco en otro tipo de dato (NA, not available en inglés). En R, la forma más fácil de realizar este cambio de espacios en blanco a NAs es cuando se importan los datos. Además, es recomendable guardar las bases de datos para usar en R en formato delimitado por comas (.csv), en lugar de Excel (.xls) o texto (.txt), ya que la importación de los datos se hace más fácil en este formato.

## Análisis de datos

Esta sección se enfoca en la fase del análisis de la información ya recolectada y digitalizada, especialmente en: 1) la limpieza y verificación de los datos, y 2) el análisis estadístico de los mismos.

Una vez finalizada la digitalización de los datos, es necesario realizar su validación, con el fin de comprobar

**Figura 57.** Pasos para la toma, manejo, y procesamiento de datos de un proyecto de restauración ecológica del páramo andino. Fuente: Elaboración propia.

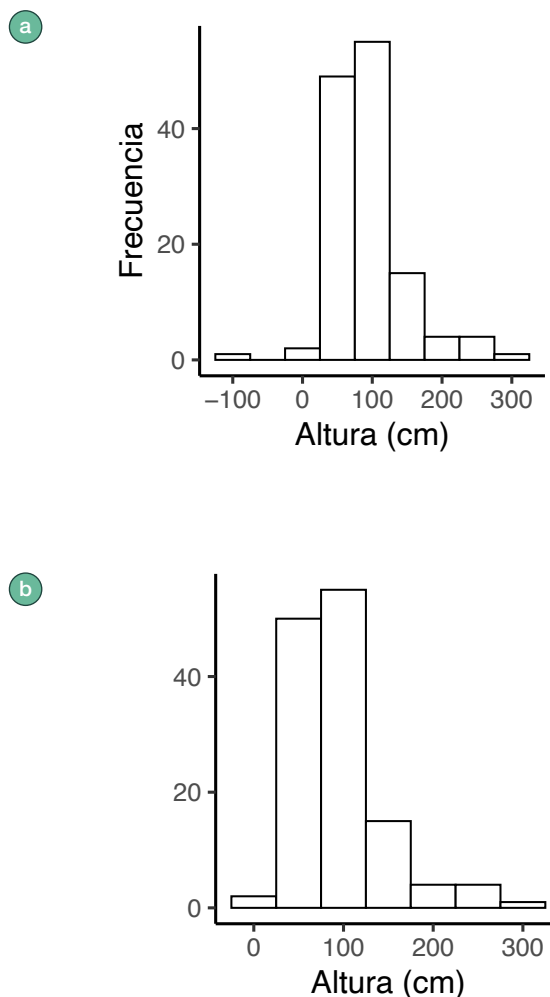
que no existan errores. Para esto se deben verificar que no existan duplicados en los nombres como sitios de muestreo o especies debido al uso incorrecto de mayúsculas, espacios de más o caracteres especiales. La función “summary” en R nos muestra el tipo de datos que tenemos en cada variable (numérica o texto), y los niveles o factores que componen dicha variable (líneas 81-92 en el código ejemplo). Si usando esta función se encuentran niveles repetidos –p. ej. una misma especie repetida–, es necesario verificar que todas las entradas de esa especie se hayan hecho de la misma manera en la base de datos original, corregir el error e importar los datos en R nuevamente, verificando que se hayan corregido los duplicados.

También se debe realizar una búsqueda de valores atípicos en las columnas que contengan valores numéricos, debido a que durante la digitalización se cometen errores comunes como insertar números de más o colocar comas o puntos en los lugares equivocados.

Para esto es necesario evaluar la estructura de cada columna de la base de datos, y visualizar las columnas numéricas con el fin de hallar dichos valores atípicos. Las líneas 60-103 del código de R ilustran algunas de las herramientas que se pueden utilizar para verificar la estructura de los datos y si existen errores de colecta o digitación. La Figura 58 muestra un histograma de los datos de altura de las plantas en centímetros. Un histograma es un tipo de gráfico usado para representar la distribución de los datos utilizando barras de diferentes alturas. Cada barra en un histograma agrupa los datos en rangos y las barras más altas representan los rangos donde se agrupan más datos. En la Figura 58a se evidencian valores atípicos dentro de la muestra, los cuales se identifican por la presencia de valores negativos (-100) dentro del histograma. Como regla general, las alturas de las plantas siempre son positivas, por lo tanto la presencia de valores negativos en el histograma se debe a errores en la digitalización de los datos. La Figura 58b muestra el histograma con datos positivos únicamente, en el cual es evidente que se ha corregido el problema.

Una vez se tenga certeza de la limpieza y correcta estructura de los datos, se puede proceder a analizarlos. Los dos métodos de análisis de datos cuantitativos más utilizados son la estadística descriptiva y la estadística inferencial. La estadística descriptiva es el primer paso en el análisis; su objetivo es resumir la información de los datos y buscar patrones generales. Entre los métodos descriptivos más comunes se encuentran el promedio, la media, la moda, las frecuencias, los rangos, y los percentiles. La estadística descriptiva proporciona números absolutos pero no explica lo que hay detrás de esos números, y es solo útil cuando la investigación se limita a la muestra y no es necesario generalizar a un contexto más amplio. En el código ejemplo de R, una forma rápida de describir los datos numéricos se presenta en las líneas 81-103.

La estadística inferencial, por otro lado, busca encontrar las relaciones que existen entre múltiples variables, con el fin de generalizar los resultados y hacer predicciones. Algunos ejemplos de este tipo de análisis son correlaciones, regresiones, y análisis de varianza. Este tipo de análisis requiere de preguntas de investigación e hipótesis concretas, las cuales se estructuran según el proyecto y el tipo de datos con los que se cuente. Este capítulo se



**Figura 58.** Histogramas de altura donde se muestra la distribución y el rango de los datos de altura. a) Histograma con datos atípicos, y b) histograma con datos dentro de los parámetros normales. Fuente: Elaboración propia.

enfoca en los análisis de tipo descriptivos, con los cuales se consigue reportar resultados de monitoreo de proyectos de restauración de forma fácil y sencilla.

La forma de evaluar el éxito de la restauración depende de los objetivos iniciales de cada proyecto; sin embargo, por lo general se busca mejorar la composición, estructura, y función de los ecosistemas intervenidos. En cuanto a la composición, es importante reportar datos de abundancia, riqueza, y diversidad con el fin de entender cómo se están recuperando las comunidades de los grupos focales (flora, fauna) en el tiempo. Utilizando la base de datos y el código ejemplo de R, en las líneas 105-125 se calculan la riqueza de especies, la abundancia de individuos, y los índices de diversidad de Shannon y de dominancia de Simpson

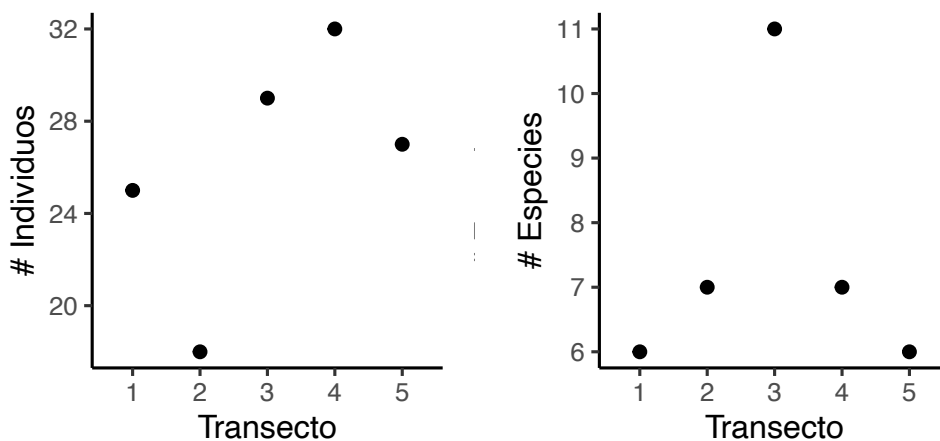
por cada transecto muestreado, utilizando algunas funciones del paquete *vegan* (Oksanen et al., 2019). La Figura 59 muestra una manera de visualizar estos resultados; el código para crear las figuras se muestra en las líneas 128-141 del código ejemplo. Visualizar los datos de esta manera permite evidenciar rápidamente las diferencias entre los diferentes sitios de muestreo; por ejemplo, se puede ver que el transecto 3 es el más diverso ya que tiene un número alto de individuos (29 individuos) y especies (11 especies), lo cual se evidencia en los valores más altos de los índices de diversidad (2.1) y dominancia (0.85). Por el contrario, el transecto 4 tiene un número alto de individuos (32 individuos)

pero con una riqueza de especies baja (siete especies), lo cual resulta en una diversidad y dominancia bajas (1.5 y 0.70, respectivamente).

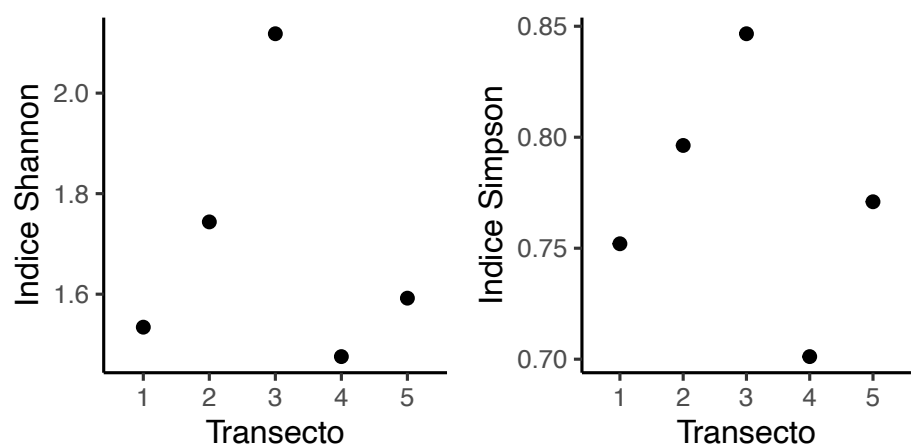
Otro componente importante a reportar en un proceso de monitoreo de restauración del páramo andino es la estructura de la vegetación. En la base de datos ejemplo se colectaron datos de circunferencia/diámetro a la altura del pecho (CAP/DAP), altura, y cobertura total de cada individuo vegetal. La información sobre la estructura vegetal se puede resumir por unidad de muestreo (transecto), por especie, por localidad, entre otros. Un ejemplo de cómo resumir esta información por transecto y especie se muestra en las líneas de código 144-160. Esta información se puede visualizar utilizando gráficos similares a las figuras 1a y 1b del Cuadro 11, o se puede presentar en tablas como se presenta aquí (Tabla 15).

**Figura 59.** Ejemplo de visualización de datos de composición de la comunidad de plantas por transecto. Fuente: Elaboración propia.

a



b





**Tabla 15.** Ejemplo de presentación de resumen de datos de estructura por especie y transecto.

Especie	CAP (cm)	DAP (cm)	Altura (cm)	Cobertura total (cm <sup>2</sup> )
<i>Acaena elongata</i>	3,8	1,2	80	11.845
<i>Baccharis rupicola</i>	3,1	1,0	91	2.025
<i>Baccharis tricuneata</i>	6,9	1,3	63	1.830
<i>Clethra revoluta</i>	7,1	2,2	150	10.174
<i>Diplostephium schultzii</i>	4,7	1,5	43	667
<i>Escallonia myrtilloides</i>	21,1	1,6	77	9.828
<i>Espeletia hartwegiana</i>	32,5	10,4	176	4.443
<i>Gaiadendron punctatum</i>	4,4	1,4	39	260
<i>Gynoxys tolimensis</i>	5,0	1,6	80	627
<i>Hesperomeles obtusifolia</i>	5,6	1,8	89	10.814
<i>Hypericum laricifolium</i>	6,4	1,4	87	3.666
<i>Hypericum strictum</i>	3,1	1,0	80	2.021
<i>Lupinus bogotensis</i>	4,7	1,5	116	3.672
<i>Pentacalia vaccinioides</i>	19,1	3,4	118	7.598
<i>Pernettya prostrata</i>	3,8	1,2	86	1.440

Transecto	CAP (cm)	DAP (cm)	Altura (cm)	Cobertura total (cm <sup>2</sup> )
1	13,8	1,9	78	4.335
2	15,7	4,2	91	3.860
3	9,3	2,1	78	5.361
4	14,1	3,5	111	8.412
5	18,6	3,0	108	5.659

Finalmente, si se requiere trabajar con datos espaciales, o con fechas y horas es necesario transformar dichos datos para que el programa los reconozca como tales. Un ejemplo de cómo convertir una variable de fechas guardada como un factor, a una columna de fechas reconocida por R se muestra en las líneas 162-174 del código ejemplo.

El tipo de estructura que se utilice para reportar los datos (tablas o figuras) depende del objetivo que se tenga. Los gráficos son formas poderosas de entregar un mensaje de forma efectiva y concreta, por lo que se deben usar en reportes y divulgaciones. Sin embargo, las tablas también son útiles para entender la estructura de los datos o resultados, y son una excelente herramienta para resumir grandes cantidades de información. Es recomendable iniciar con un resumen de la información en tablas, y de ahí decidir qué resultados

son importantes de resaltar, los cuales se pueden presentar en gráficos, teniendo el cuidado de no caer en el error de repetir información. Como se discute en el cuadro 11, el tipo de gráfico a utilizar depende del tipo de datos con los que se cuenta y del mensaje que se quiera entregar. Una buena herramienta para decidir el tipo de gráfico según los datos es “*from data to viz*”, un sitio web ([www.data-to-viz.com](http://www.data-to-viz.com)) para obtener información sobre los tipos de gráficos comunes, su uso, desventajas, así como código en R para crearlos.

## Conclusiones

Una cuidadosa planeación al momento de diseñar el programa de monitoreo de un proyecto de restauración ecológica es importante ya que permite: 1) recolectar los datos necesarios para evaluar el



**Cuadro 11.** Consideraciones importantes para visualizar resultados según el tipo de datos con los que se cuente. Fuente: Elaboración propia.

Un gráfico puede ser una herramienta valiosa para representar resultados de manera rápida y eficaz, explorando la relación entre las variables o mostrando patrones y tendencias. Sin embargo, con frecuencia se cae en errores comunes que pueden disminuir la eficacia de un gráfico.

Como regla general, un gráfico debe ser fácil de interpretar y debe poderse leer por sí solo, con poca o ninguna referencia del texto.

Además, es necesario realizar un proceso de planeación cuidadoso para comprender qué se quiere mostrar en un gráfico y de acuerdo al tipo de datos que se tengan (numéricos, categóricos, una o más variables; Figura 1a).

A continuación algunas reglas de oro para lograr una buena representación gráfica:

- Orden de los ejes (x – variable independiente, y – variable dependiente).
- Clave, leyenda o etiquetas que permitan interpretar el gráfico.
- Títulos y unidades de los ejes.

Las figuras 1b y 1c muestran dos gráficos diferentes para los mismos datos. En la figura 1b se muestra la distribución de todos los datos de cada especie, incluyendo los valores extremos y atípicos (outliers). La figura 1c muestra sólo el valor promedio de cada especie, y las barras de error dan una aproximación a la variación dentro de cada grupo.

**Figura 1.** a) algunos tipos de gráficos según los datos a representar. b) gráfico de caja y bigotes mostrando la distribución de la altura (en cm) por especie. c) gráfico de barras mostrando la distribución de la altura (en cm) por especie y su desviación estándar, ordenado de mayor a menor.

#### a) Histograma (o diagrama de densidad)

Entre una y dos variables numéricas  
Una variable categórica y una numérica (con varias observaciones por grupo)

#### Diagrama de cajas y bigotes

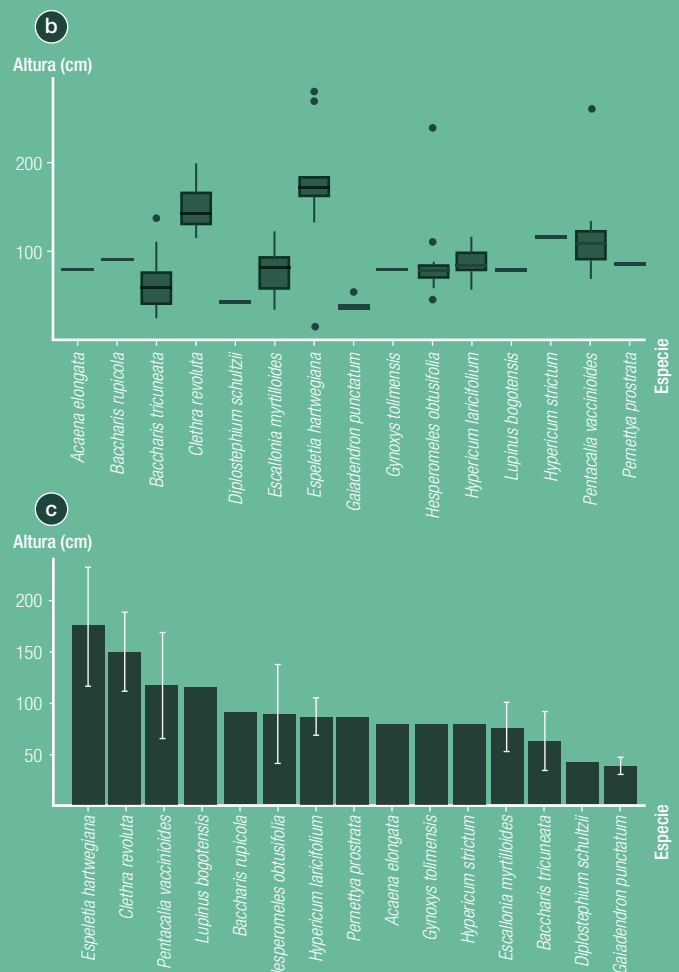
Dos o más variables numéricas  
Una variable categórica y una (o más) variables numéricas (con una o más observaciones por grupo)

#### Gráfico de dispersión

Dos variables numéricas (no ordenadas)  
Una variable categórica y una numérica (no ordenadas)

#### Gráfico de barras

Una o más variables categóricas  
Una variable categórica y varias numéricas



cumplimiento de los objetivos del proyecto, y 2) minimizar gastos innecesarios de personal y tiempo al hacer una cuidadosa planeación del tipo y volumen de datos a coleccionar.

Además de la planeación y la toma de datos en campo, también es importante analizar y, sobre todo, reportar los resultados obtenidos, ya que solo así se puede comprender el estado del proceso de recuperación del ecosistema que se ha logrado con las estrategias implementadas, al mismo tiempo que se puede saber si, a nivel de país, se están logrando las metas de restauración propuestas. El análisis y reporte de resultados no debería ser un proceso complicado si se realiza una planeación adecuada. Importantes consideraciones para hacer este proceso sencillo y replicable están directamente relacionadas con la forma de almacenar los datos –formatos de campo y digitales–, así como con la claridad en los resultados que se quieran repor-

tar, los cuales están directamente relacionados con los objetivos de cada proyecto.

Entre los componentes más comúnmente evaluados en los proyectos de restauración están la composición, estructura, y función de los ecosistemas intervenidos. En este capítulo se proporcionan herramientas básicas para obtener resultados de estos componentes utilizando la información recolectada en campo, así como de manipulación de las bases de datos para optimizar el análisis. El programa estadístico R, por ser de libre acceso y estar en constante renovación, brinda una gran cantidad de herramientas para sintetizar, analizar y visualizar los resultados de manera sencilla. Es importante aclarar que aunque solo se proporciona un ejemplo para cada tipo de análisis, datos de diferentes grupos de fauna, suelos, entre otros, se pueden analizar de la misma manera utilizando las herramientas y funciones proporcionadas en el código ejemplo.

## CAPÍTULO

## 11

# Normativa de la restauración ecológica y del monitoreo a la restauración del páramo colombiano

⊕ Instrumentos normativos para la restauración y el monitoreo de páramos

⊕ Conclusiones



María Alejandra  
Franco Morales

La conservación y restauración de la biodiversidad en Colombia se ha ido desarrollando con el pasar del tiempo gracias a la categoría de norma constitucional que le otorgo la Carta de 1991 (PNGIBSE, 2012), pero también conforme van surgiendo las necesidades sociales a las que se les ha intentado dar respuesta mediante estudios científicos y legislación ambiental.

La Constitución Política de Colombia de 1991 marca un cambio profundo al establecer que se deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados a la naturaleza, contemplando el ambiente como un derecho humano, cuya obligación, tanto del Estado y de los particulares, es propender por su protección en todos los ámbitos (Artículo 8, 79, 80, 334, Constitución Política de Colombia).

Pese a la existencia de normatividad constitucional, y de legislación que se ha ido especializando en la protección de los ecosistemas de páramo en el país, según la evaluación normativa, social y ambiental de los páramos en Colombia realizado por la Procuraduría General de la Nación (2018), se identifica que:

A la fecha, se encuentra en estos ecosistemas la presencia de grupos sociales y actividades de origen antrópico que continúan impactando de manera negativa dichos ecosistemas, con lo cual generan múltiples alteraciones en la función biológica y ecológica de estos y de su homeostasis. Como es sabido, la explotación de la frontera agrícola, la ganadería, y la minería son las tres (3) clásicas actividades que por más de 50 años han impactado el páramo colombiano, y en el periodo de los años 2007-2015, se suma la exploración de hidrocarburos.

Esto genera la siguiente duda: si existe una delimitación de los páramos y una vasta normatividad constitucional, legal y jurisprudencial que deja clara la importancia de este ecosistema, ¿por qué no hay una fuerte incidencia y se siguen presentando altos niveles de transformación de este bioma?, la respuesta a esta pregunta lleva a deducir que en la mayoría de ocasiones existe desarticulación entre el campo técnico, científico, social y normativo, ya que no es suficiente que exista legislación que proteja el páramo si los actores sociales no se ven reflejados en la

norma y si a la hora de su aplicación no está avalada por los instrumentos que da la ecología de la restauración y la restauración ecológica (SER, 2016; MinAmbiente, 2015). Sumado a lo anterior, no hay un real seguimiento en campo de los lineamientos jurídicos ya existentes, por este motivo es indispensable que la ciencia, su aplicación y el derecho avancen de la mano, teniendo en cuenta a las comunidades que desde tiempos ancestrales han usado el territorio de la alta montaña, que hoy y siempre han sido objeto de múltiples intereses y tienen sus propios intereses.

En este contexto, para poder valorar el éxito de los procesos de restauración de páramos no solo debe haber monitoreo en el ecosistema sino que la norma debe ir acompañada de evaluación y seguimiento continuo, para que sea un determinante real a la hora de tomar decisiones y aplicarlas.

Así las cosas, este capítulo presenta un recorrido histórico (Figura 60) por normas de diferente jerarquía, y pese a que algunas de ellas ya no se encuentran vigentes sí muestran el desarrollo que ha tenido la norma para llegar a los instrumentos actuales que protegen el páramo, además las diferentes normas vinculan los métodos otorgados por el Plan Nacional de Restauración, y dejan claro que hacer monitoreo a la restauración ecológica en el páramo no es una opción sino una disposición respaldada jurídicamente.

### Instrumentos normativos para la restauración y el monitoreo de páramos

El conocimiento de la norma es indispensable para saber si el Estado y los particulares han cumplido con lo estipulado en el ordenamiento jurídico colombiano y para poder hacer exigible la protección del ambiente. La Constitución Política al ser el supremo cuerpo normativo de un país (Artículo 4, Constitución Política de Colombia), sienta bases, funda principios y eleva a rango constitucional disposiciones ambientales, que deben ser reforzadas con estrategias institucionales, organización, interdisciplinariedad y transversalidad jurídica y administrativa (Bulla, 2012); es decir, la Constitución es un marco general, una guía, que se va desarrollando con normas posteriores y específicas. A continuación, se presenta un breve desarrollo histórico de los instrumentos normativos para la restauración ecológica y su monitoreo en los páramos colombianos (Figura 60).



**Figura 60.** Línea histórica de la normativa de la restauración ecológica y el monitoreo a la restauración de páramos colombianos. En letra negra las disposiciones normativas vigentes, en letra gris claro disposiciones normativas no vigentes, en letra azul planes de desarrollo que han culminado su periodo de ejecución. Fuente: Elaboración propia.

### 1993 a 2003. El inicio del desarrollo de preceptos constitucionales

El páramo como ecosistema estratégico, en especial por su importancia en la regulación del recurso hídrico para consumo humano, ha motivado un especial interés para su conservación y manejo sostenible (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018), de allí que como desarrollo de los mandatos constitucionales nace la Ley 99 de 1993 indicando en sus principios generales que se debe dar protección especial a las zonas de páramos, subpáramos, los nacimientos de agua y las zonas de recarga de acuíferos, e indica que el Estado debe fomentar la incorporación de los costos ambientales y el uso de instrumentos económicos para la prevención, corrección y restauración del deterioro ambiental y para la conservación de los recursos naturales renovables. Además, establece como función del Ministerio de Ambiente la regulación de las condiciones generales para restaurar los recursos naturales; sin embargo, la Ley 99 de 1993 no define qué es restauración ni cómo se debe restaurar, pero pretende desarrollar los postulados constitucionales y, gracias a dicha ley, se incorpora una nueva categoría específica: “el pára-

mo como objeto de protección especial” (Contraloría General de la Republica, 2018).

Nueve años después, en febrero de 2002, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible expide el Programa para el “Manejo Sostenible y Restauración de Ecosistemas de la Alta Montaña Colombiana” (MinAmbiente, 2002), un importante avance para acciones concretas relacionadas con la restauración, monitoreo y el desarrollo sostenible de este ecosistema. En la actualidad este programa ya se no se encuentra vigente; sin embargo, es un hito en la norma de restauración y monitoreo del páramo.

Seguidamente, se formula la Resolución 769 de 2002, la cual se convierte en la única norma existente de aquel momento en la legislación colombiana que identifica vacíos y requerimientos legales relacionados con el bioma páramo (Ponce de León, 2002). Esta resolución indicó que como medidas de protección, conservación, manejo sostenible y restauración de los páramos se debe implementar, por parte de las corporaciones autónomas regionales y autoridades ambientales, un estudio sobre el estado actual de este ecosistema y el respectivo plan de manejo ambiental. Esta disposición fue respaldada por medio de la Resolución 839 de 2003, donde se establecen los términos de referencia para su elaboración, y se indica que el Plan de Manejo Ambiental de los Páramos (PMA) tiene como objetivo instaurar un sistema de seguimiento y monitoreo que permita retroalimentar y ajustar los niveles de información y las medidas de manejo para estos ecosistemas. En la actualidad estos actos administrativos se encuentran derogados.



### 2010 a 2016. Concretando acciones

Es con la Ley 1382 de 2010 (esta norma no se encuentra vigente) donde por primera vez se establece que el páramo sea una zona excluible de minería y se pide una delimitación geográfica al Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, para poder hacer efectiva esta disposición. Teniendo en cuenta lo anterior, el Decreto 2372 de 2010 refuerza que las zonas de páramos y subpáramos son ecosistemas estratégicos que gozan de protección especial, pero además por primera vez la norma define qué es restauración, entendiéndola como: “el proceso de restablecer parcial o totalmente la composición, estructura y función de la biodiversidad, que hayan sido alterados o degradados” (Artículo 2, literal E, Decreto 2372 de 2010); sin embargo, no hay hasta este momento una definición normativa para monitoreo a la restauración.

El Plan Nacional de Desarrollo 2010- 2014 (Ley 1450 de 2011) tuvo una fuerte incidencia sobre este tema, pues con el propósito de fortalecer la protección y restauración de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos, a través de su Artículo 202, solicita a la autoridad ambiental competente nuevamente una delimitación del páramo para determinar el régimen de usos de este ecosistema. Dicha delimitación se adopta mediante acto administrativo, indicando también que en el páramo no se pueden adelantar actividades agropecuarias, ni de exploración o explotación de hidrocarburos y minerales, ni construcción de refinerías de hidrocarburos, teniendo la norma en ese momento una limitación total a estas actividades. Pese a ello, no

se tuvo en cuenta que la delimitación jurídica es una de los eslabones en la cadena de valor y en sí misma no puede ser considerada como una protección real y efectiva, pues se deben articular y sistematizar los esfuerzos de todos los actores involucrados, así como la asignación de recursos financieros suficientes (Contraloría General de la Republica, 2018).

Paralelamente, el Decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible (Decreto 1076, 2015), dispone en el Artículo 2.2.2.1.3.8. que el páramo por ser estratégico goza de protección especial, respaldado también por el Plan de Desarrollo 2014- 2018 (Ley 1753 de 2015) que, a pesar de ser muy cuestionado en el momento, también dedicó el Artículo 173 para definir y establecer su protección y delimitación.

El año 2015 marca un importante precedente, pues el MinAmbiente presenta un gran instrumento, que es el Plan Nacional de Restauración (Plan Nacional de Restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de áreas disturbadas, 2015), cuyo objetivo es orientar y dar una línea clara de qué hacer, cómo hacer y dónde hacer restauración. Es un documento muy importante dado que presenta todas las fases para restaurar y monitorear la restauración del páramo colombiano.

### 2018. El año esperado

En 2018 MinAmbiente expide la Resolución 0886 en la cual se adoptan los lineamientos para “la zonificación, determinación del régimen de usos y la elaboración del plan de manejo ambiental aplicable a los páramos delimitados a través de acto administrativo, por parte

de este Ministerio; así como las directrices para diseñar, capacitar y poner en marcha programas de sustitución y reconversión de las actividades agropecuarias en dichos ecosistemas”. Este acto administrativo tiene un ámbito de aplicación especial, ya que estima un tratamiento específico para las actividades agropecuarias que se venían desarrollando al interior de las áreas de páramo delimitadas con anterioridad al 16 de junio de 2011, y deja en cabeza del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural –a través de la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), la Agencia Nacional de Desarrollo Rural (ADR) y la Agencia Nacional de Tierras (ANT) y demás entidades adscritas y vinculadas del sector, así como de las entidades territoriales, en coordinación con las autoridades ambientales regionales con jurisdicción en el área de páramo delimitado– el diseño, la capacitación y la puesta en marcha de los programas de sustitución y reconversión.

Esta resolución es sumamente importante toda vez que tiene en cuenta a las comunidades que habitan los páramos y que han basado su sustento económico de lo que puedan producir sus tierras, además de dejar claridad adoptando las definiciones de sustitución y reconversión, y de estructurar en el plan de manejo la disposición de un sistema de monitoreo socioecosistémico basado en indicadores que den cuenta de los componentes socioeconómicos y biofísicos. En este contexto, dicha resolución dispone la norma para realizar monitoreo hidrológico, con el fin de aumentar el conocimiento sobre la disponibilidad de agua y los efectos ocasionados por distintas acciones tales como deforestación, cambio climático, restauración, entre otras. También establece la importancia de incorporar la medición y monitoreo de carbono en ecosistemas de alta montaña, como un instrumento que ayuda a conocer y mejorar la cuantificación de sumideros y flujos de carbono en este ecosistema (Artículo 10 literal 7 Resolución 886 de 2018).

Aunado a ello, el 27 de julio nace la llamada y esperada “primera Ley de páramos” o Ley 1930 de 2018, encargada de dictar disposiciones para la gestión integral de los páramos en Colombia. Esta enmarca su pretensión en fijar directrices no solo para preservar este bioma, sino también para realizar procesos de restauración soportados por el Plan Nacional de Restauración, dándole una posición clara y evidente

a dicho plan pues le brinda un estatus de principio y lo convierte en una guía, un indicador y un orientador de todo el contenido de la ley (Artículos 1 y 2, Ley 1930 de 2018). Esto eleva el Plan a una gran categoría legal, es decir la norma en mención acepta el plan nacional de restauración y lo vincula a su articulado y específicamente en los principios. Por lo tanto, se acepta la definición del plan, las fases propuestas y la disposición de que el monitoreo es parte integral de la restauración

Así las cosas, la Ley 1930 de 2018 orienta que los planes de manejo de páramos adoptados por las autoridades ambientales incluyan un sistema de seguimiento para evaluar, supervisar y monitorear el estado y las tendencias de las zonas de páramo y las correspondientes actividades de manejo, los cuales deben ser desarrollados con acompañamiento de institutos de investigación, y la academia. Además, según los resultados obtenidos del monitoreo se deben actualizar dichos planes cada cinco (5) años según sea el caso (Artículo 6, Ley 1930 de 2018), la ley también indica que los sistemas de monitoreo para realizar el seguimiento a la biodiversidad, los servicios ecosistémicos derivados y la gestión realizada se deben implementar a más tardar para el 28 de julio de 2020 (Artículo 29, Ley 1930 de 2018).

Una oportunidad novedosa que trae la mencionada normativa es la creación de la figura “gestores de páramos”, la cual vincula a los habitantes tradicionales de este ecosistema a las actividades de restauración, monitoreo y control (Artículo 13, 16, Ley 1930 de 2018). Esto representa un gran avance, pues en dicha ley se reconoce al habitante tradicional y su saber, dando un enfoque intercultural a la gestión de páramos y propendiendo a generar procesos de restauración duraderos, que son aquellos que promueven cambios al interior del individuo y de la familia (Rojas et al., 2014).

Con respecto a la financiación y destinación de recursos es importante mencionar que la Ley 1930 especifica de manera clara cómo es posible materializar la conservación, restauración y monitoreo a la restauración de páramos y sus fuentes hídricas (Capítulo IV, Ley 1830 de 2018). De esta forma, la destinación de estos recursos para restauración y monitoreo brindan un respaldo a la Ley, ya que el éxito de los procesos radica en que se puedan mantener en el tiempo, que involucren



a los diversos actores sociales e institucionales y que tengan un respaldo económico establecido y exigible.

## Conclusiones

La restauración y el monitoreo a la restauración en el páramo son actividades que están dentro del marco legal colombiano, la norma reconoce tanto sus definiciones como la forma de llevar a cabo dichos procesos. Por tanto, en el recorrido histórico y normativo descrito en este capítulo se pueden observar los cambios particulares de cada momento, pasando por fases donde la norma era totalmente restrictiva de ciertas actividades, y solo mencionaba la protección y conservación del páramo, para llegar a nuevos reconocimientos que traen inmersos los procesos de restauración y monitoreo a la restauración, la ley también avanza y brinda cambios de paradigma al reconocer a los habitantes tradicionales de los páramos, integrar el enfoque participativo y contemplar las diversas alternativas en el desarrollo del programa de reconversión y sustitución de actividades prohibidas, mostrando que cada avance genera efectos sociales y económicos, pero como lo afirma Lozano (2013) esos efectos no sobrepasan los que traería consigo permitir actividades de alto impacto.

El debate en torno a las limitaciones de actividades que trae la Ley 1930 de 2018, debe tener presente que en Colombia los páramos inciden en la regulación de cuencas hídricas que nutren gran parte del país, aportando los servicios de abastecimiento de agua para el 70 % de la población (Instituto Humboldt, 2011). Este punto es clave pues, pese a este importante dato, el reporte contemplado en el Estudio Nacional del Agua para 2018 afirma que en el periodo 2016-2017 se extinguió el 6.4 % del área glaciaria colombiana, correspondiente a 2.5 Km<sup>2</sup> (Ideam, 2018). En este contexto, se puede concluir que la ley debe ir acompañada de políticas públicas coherentes, de avanzados mecanismos de educación ambiental y de estricto monitoreo de los procesos de restauración que permitan valorar tanto la efectividad del marco jurídico, como del trabajo de campo. Sumado a lo anterior, el país debe adquirir compromisos que tenga la capacidad de cumplir para que las normas no se queden en papel muerto y que el tema ambiental no continúe tratándose de forma aislada con los otros sectores con los que interactúa, teniendo en cuenta que el legislador no lo sabe todo, es decir, cuenta con información limitada, por lo que siempre debe estar asesorado por la ciencia y la ciencia debe estar siempre al servicio de la sociedad.

# CONCLUSIONES

Los procesos de restauración ecológica en páramo y su correspondiente monitoreo tienen una estrecha relación con otros procesos impulsados en el marco de la gestión de los páramos, como son: la educación ambiental, los procesos de reconversión y sustitución de actividades productivas, la creación de negocios verdes, la implementación de pago por servicios ambientales, el manejo de áreas protegidas, el monitoreo de la biodiversidad, la investigación y la participación comunitaria en esquemas amplios de gobernanza para el manejo de los complejos de páramos, por esta razón los involucrados en la planeación, implementación, evaluación y seguimiento de los procesos de restauración deben generar estrategias de articulación entre los distintos planes, programas y proyectos de gestión territorial del páramo para aprovechar los recursos disponibles maximizando los beneficios.

En ese sentido, en el escenario de conservación actual del páramo, este libro representa un aporte metodológico y técnico y, al mismo tiempo, una invitación a vincular dentro del proceso de restauración el monitoreo como un escenario de articulación y verificación de voluntades, recursos, información, gestión del conocimiento y de la biodiversidad.

En todo proceso de restauración ecológica se puede asumir un programa de monitoreo sin disponer necesariamente de recursos onerosos; siempre y cuando

el monitoreo tenga objetivos, metas, indicadores y métricas claros y coherentes. Esto incide directamente en una correcta planeación y uso de los recursos disponibles, permitiendo encontrar sinergias en otros procesos de gestión del territorio.

Una gran oportunidad de articulación, como lo recuerdan los autores, es la generación de esquemas de pago por servicios ambientales, los cuales son una de las metas del gobierno en Colombia, impulsada por el Decreto-Ley 870, y en Ecuador por el Programa Sociopáramo. Para estas medidas el monitoreo a la restauración aporta una fuente confiable de datos que permite conocer su impacto real en el territorio.

Por esto la difusión de los resultados de monitoreo puede ayudar a que las comunidades de los páramos, tomadores de decisión y la sociedad en general pueda apropiarse tanto del páramo como del proceso de restauración. Siguiendo el espíritu de la Ley 1930 de 2018, el monitoreo es una oportunidad de vincular a los habitantes tradicionales de los páramos, generar apropiación social del conocimiento y el empoderamiento de las comunidades en el manejo de sus territorios; así mismo, también pueden vincularse a estas iniciativas los habitantes de las ciudades que se benefician de los páramos, las universidades y la comunidad educativa en general.

Este libro es una propuesta de guía para monitorear procesos de restauración ecológica en los páramos andinos. Los autores y editores reconocemos

las falencias en investigación que aún existen en este ecosistema donde cabe la aparición de posibles nuevos criterios de evaluación, indicadores y métricas que pueden fortalecer el monitoreo del páramo; consideramos que, a lo largo de los capítulos, se presentan herramientas fundamentales que se pueden usar hoy con facilidad.

Sabemos también que la restauración ecológica y el monitoreo tienen aún limitaciones importantes que parten de la comprensión detallada del páramo y sus disturbios; sin embargo, esto no debe ser un obstáculo para que se aplique el monitoreo en los proyectos de restauración ecológica. Al contrario, el monitoreo debe empezar a considerarse como una herramienta fundamentada para llenar estos vacíos. Con esta publicación recomendamos la aplicación de distintas plataformas indicadores y métricas que se pueden escoger de acuerdo con el proyecto particular y con el balance entre la calidad de la información que arrojan versus los costos del seguimiento. Reiteramos que no se puede hablar de un proceso de restauración ecológica si este no incluye un programa de monitoreo que lo acompañe desde su inicio, como la normatividad colombiana para el páramo lo considera.

Tanto la restauración ecológica como el monitoreo han estado recientemente en la agenda de la toma de decisiones políticas tanto a escala internacional como nacional. Por lo anterior es muy relevante asumir el

programa de monitoreo en la planificación y ejecución de los proyectos, contemplando el tiempo y los recursos necesarios. Este es un aspecto que se debe mejorar tanto desde los entes de planeación presupuestal como desde quienes redactan las propuestas de proyectos, los financian, los ejecutan y quienes supervisan y auditan.

Finalmente, es importante considerar que los reportes nacionales de los procesos de restauración ecológica en páramos deben estar fundamentados en los datos de los programas de monitoreo, y a partir de estos es desde donde se deben nutrir los informes de avance de los diversos compromisos que se han asumido tanto en lo nacional como en lo internacional. Una reflexión importante, que ha sido considerada por múltiples autores, es la necesidad de la interdisciplinariedad y transdisciplinariedad al momento de asumir tanto el proyecto mismo de restauración como su posterior monitoreo. En esta publicación nos aproximamos a algunos disturbios, criterios, indicadores y métricas para medir el éxito de la restauración en el páramo; no obstante, somos conscientes que se requiere ampliar este espectro, proyectándolos a diversas disciplinas donde lo social y lo económico son tan protagonistas como lo biofísico. No debemos olvidar que el objetivo final de la restauración es el de mejorar la calidad de vida humana y su relación con la naturaleza.

# REFERENCIAS CITADAS

- Abella S. y Covington, W. (2004). Monitoring an Arizona Ponderosa Pine Restoration: Sampling Efficiency and Multivariate Analysis of Understory Vegetation. *Restoration Ecology*, 12(3), 359-367.
- Acosta-Galvis A. (2000). Ranas, Salamandras y Caecilianas (Tetrápoda: Amphibia) de Colombia. *Biota Colombiana*, 1(3), 289-319.
- Aguilar-Garavito M. y Ramírez, W. (Eds.). (2015). *Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Aguilar-Garavito M., Ramírez, W. y Cabrera, M. (2015). Definición de objetivos, metas, indicadores y cuantificadores para el monitoreo a procesos de restauración ecológica. En: Aguilar-Garavito M. y Ramírez, W. (Eds.) *Monitoreo a procesos de restauración ecológica aplicado a ecosistemas terrestres*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Aguilar-Garavito M., Ramírez, W., Rondón, D. y Barrera-Cataño, J.I. (2016). Aspectos sociales en el monitoreo de la restauración ecológica: una propuesta integral para la evaluación y seguimiento. En: Ceccon, E. y Pérez, D. *Más allá de la ecología de la restauración: perspectivas sociales en América Latina y el Caribe*. Vázquez Mazzini Editores.
- Aguilar-Garavito M. y Ramírez, W. (2016). Fundamentos y consideraciones generales sobre restauración ecológica para Colombia. *Biodiversidad en la práctica*, 1(1), 147-176. <http://revistas.humboldt.org.co/index.php/BEP/article/view/50>
- Aguilar-Garavito, M., Estupiñán, L., Rojas, S., Isaacs, P., Jurado, R., Londoño, M., y Silva, L.M. (2017). *Guía para la restauración ecológica de la región subandina. Caso: Distrito de conservación de suelos Barbabambas-Bremen*. Instituto de Investigación de Recursos biológicos Alexander von Humboldt.
- Aguilar-Garavito M. (2019). Aportes técnicos para la construcción de lineamientos y el diseño de paisajes agropecuarios sostenibles: reconversión, sustitución, herramientas de manejo del paisaje y restauración ecológica. Convenio IAvH-MinAmbiente 19-016 (MinAmbiente 209-2019). Instituto de Investigación de Recursos biológicos Alexander von Humboldt; Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Aguirre, N. y Torres, J. (2013). *Diseño conceptual y técnico de estrategias para la restauración ecológica del páramo degradado de la Unidad Hidrográfica Jatunhuayco*. Fondo para la Protección del Agua.
- Aguirre, N., Torres, J. y Velasco, P. (2014). Guía para la Restauración Ecológica en los Páramos del Antisana. Fondo para la Protección del Agua.
- Albert, C.H., Grassein, F., Schurr, F. M., Vieilledent, G. y Violle, C. (2011). When and how should intraspecific variability be considered in trait-based plant ecology? *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 13, 217-225. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2011.04.003>
- Albert, C. H., Thuiller, W., Yoccoz, N. G., Soudant, A., Boucher, F., Saccone, P. y Lavorel, S. (2010). Intraspecific functional variability: Extent, structure and sources of variation. *Journal of Ecology*, 98, 604-613. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01651.x>
- Alianza sobre indicadores de biodiversidad (2011). *Guía para el desarrollo y uso de indicadores de biodiversidad nacional*. PNUMA World Conservation Monitoring Center.
- Almeida. J. P., Montúfar, R. y Anthelme, F. (2013). Patterns and origin of intraspecific functional variability in a tropical alpine species along an altitudinal gradient. *Plant Ecology & Diversity*, 6, 423-433. <https://doi.org/10.1080/17550874.2012.702137>
- Anderson, E. P., Marengo, J., Villalba, R., Halloy, S., Young, B., Cordero, D. y Ruiz, D. (2011). Consequences of Climate Change for Ecosystems and Ecosystem Services in the Tropical Andes. En: Herzog, S. K., Martínez, R., Jørgensen, P. M., y Tiessen, H. (Eds.). *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes* (pp. 1-18). Inter-American Institute for Global Change Research (IAI), Scientific Committee on Problems of the Environment (Scope), MacArthur Foundation.

- Andrade, G. y Castro, L.G. (2012). Degradación, pérdida y transformación de la biodiversidad continental en Colombia, invitación a una interpretación socioecológica. *Ambiente y Desarrollo*, XVI(30), 53-71.
- Andrade, G. y Chaves, M. (2018). *Transiciones socioecológicas hacia la sostenibilidad. Gestión de la biodiversidad en los procesos de cambio en el territorio continental colombiano*. Primera aproximación. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Andrés, P. y Mateos, E. (2006). Soil mesofaunal responses to post-mining restoration treatments. *Applied soil ecology*, 33, 67-78. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.08.007>
- Aramburu, M., Escribano, M. y de Frutos, M. (1990). Restauración de zonas naturales alteradas por actividades mineras a cielo abierto. *Informes de la Construcción*, 42(407), 23-31. <https://doi.org/10.3989/ic.1990.v42.i407.1437>
- Arango, M. y Olaya, Y. (2012). Problemática de los pasivos ambientales mineros en Colombia. *Gestión y Ambiente*, 15(3), 125-133.
- Aronson, J., Clewell, A. F., Blignaut, J. N. y Milton, S. J. (2006). Ecological restoration: A new frontier for nature conservation and economics. *Journal of Nature Conservation*, 14, 135-139. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2006.05.005>
- Asociación Internacional de Derecho Ambiental. (2013). La Protección de los páramos en Colombia: algo más que normas. AIDA. [https://aida-americas.org/es/blog/la-protecci%C3%B3n-de-los-p%C3%A1ramos-en-colombia-algo-m%C3%A1s-que-normas#\\_ftn1](https://aida-americas.org/es/blog/la-protecci%C3%B3n-de-los-p%C3%A1ramos-en-colombia-algo-m%C3%A1s-que-normas#_ftn1)
- Ávila-R, L. (2014). *Control de gramíneas exóticas en zonas de páramo alterado a través de matrices de leguminosas arbustivas y herbáceas para la conformación de núcleos de regeneración*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia].
- Azócar, A. y Rada, F. (2006). *Ecofisiología de plantas de páramo*. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas ICAE, Facultad de Ciencias Universidad de los Andes.
- Balaguer, L., Escudero, A., Martín-Duque, J. F., Mola, I. y Aronson, J. (2014). The historical references in restoration ecology: Re-defining a cornerstone concept. *Biological Conservation*, 176, 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.05.007>
- Badía D., Ortiz, O. y Martí, C. (2016). *Experimentos con el suelo para la educación pre-universitaria*. Escuela politécnica superior Huesca, Universidad de Zaragoza.
- Barrera-Cataño, J.I., Rovere, A.E., Aguirre Mendoza, N., Balensiefer, M., Chisacá Hurtado, L., Cortina, J., Martínez-Garza, C., Smith-Ramírez, C., Aguilar-Garavito, M., Aronson, J., Campanello, P.I., Ceccon, E., Dalmasso, A., Echeverría, C., Pérez, D.R., Rubio, J. y Zuleta, G.A. (2015). Realidades y perspectivas de la restauración ecológica en los países de SIA-CRE. En: Zuleta, G., Rovere, A. y Mollard, F. (Eds.). *Aportes y Conclusiones. Tomando decisiones para revertir la degradación ambiental* (pp. 25-32). Vázquez Mazzini Editores.
- Basto, S., Moreno-Cárdenas, A.C. y Barrera-Cataño, J.I. (Eds.). (2018). *Restauración ecológica en áreas post-tala de especies exóticas en el Parque Forestal Embalse del Neusa*. Editorial Pontificia Universidad Javeriana, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
- Báez, S., Cuesta, F., Cáceres, Y., Arnillas, C.A. y Vásquez, R. (2011). *Síntesis del conocimiento de los efectos del Cambio Climático en la biodiversidad de los Andes Tropicales*. Serie Panorama Andino sobre Cambio Climático, Condesan, SGCAN.
- Bechara, F.C., Campos, E.M., Duarte, K., Vagner de Araujo, G., Zamorano, A. y Reis, A. (2007). Unidades Demonstrativas de Restauração Ecológica através de Técnicas Nucleadoras de Biodiversidade. *Revista Brasileira de Biociências*, 5, 9-11.
- Becker, C. D., Agreda, A., Astudillo, E., Costantino, M. y Torres, P. (2005). Community-based monitoring of fog capture and biodiversity at Loma Alta, Ecuador enhance social capital and institutional cooperation. *Biodiversity and Conservation*, 14, 2695-2707. <https://doi.org/10.1007/s10531-005-8402-1>.

- Beltrán Pineda, M. E. y Lizarazo-Forero, L. M. (2014). Grupos Funcionales de Microorganismos en Suelos de Páramo Perturbados por Incendios Forestales. *Revista de Ciencias*, 17, 121-136. <https://doi.org/10.25100/rc.v17i2.490>.
- Benayas, J., Barral, P. y Meli, P. (2017). Lecciones de cuatro meta-análisis globales sobre la restauración de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. *Ecología Austral*, 25(2). <https://doi.org/10.25260/EA.17.27.1.1.252>
- Bernal, R., Gradstein, S.R. y Celis, M. (Eds.). (2019). *Catálogo de plantas y líquenes de Colombia*. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. <http://catalogoplantasdecolombia.unal.edu.co>
- Block, W. M., Franklin, A. B., Ward, J. P., Ganey, Jr., J. L. y White, G. C. (2001). Design and implementation of monitoring studies to evaluate the success of ecological restoration on wildlife. *Restoration Ecology*, 9 (3), 293-303. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100x.2001.009003293.x>
- Bolnick, D. I., Amarasekare, P., Araújo, M. S., Bürger, R., Levine, J. M., Novak, M., y Vasseur, D. A. (2011). Why intraspecific trait variation matters in community ecology. *Trends in Ecology and Evolution*, 26, 183-192. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.01.009>
- Borja, P. (2012). Los suelos del páramo. En: Llambí, L. D., Soto-W, A., Céleri, R., De Bievre, B., Ochoa, B. y Borja, P. *Ecología, hidrología y suelos de páramos: páramos andinos* (pp.173-256). Proyecto Páramo Andino, Condesan, GEF-UNEP.
- Boitia, A., Oliveros, A., Avella, C., Sarmiento, C., Rey, C., Ruales, D. y Cortéz, V. (2018). *Documento de lineamientos para la elaboración del plan de manejo ambiental y la zonificación y régimen de usos aplicable a páramos delimitados*. <https://www.minambiente.gov.co/index.php/normativa/resoluciones>
- Bulla, J. (2012). *Derecho ambiental y estatuto sancionatorio*. Ediciones Nueva Jurídica.
- Buytaert, W., Celleri, R., de Bievre, B., Hofstede, R., Cisneros, F., Wyseure, G. y Deckers, S. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramo. *Earth Science Reviews*, 79, 53-72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, W., Sevink, J. y Cuesta, F. (2013). Cambio climático: la nueva amenaza para los páramos. En: Cuesta, F., Sevink, J., Llambí, L. D., De Bievre, B. y Posner, J. (Eds.). *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos* (pp. 505-525). Condesan.
- Cabrera, M., Samboni-Guerrero, V. y Duivenvoorden, J. F. (2018). Non-destructive allometric estimates of above-ground and below-ground biomass of high-mountain vegetation in the Andes. *Applied Vegetation Science*, 21, 477-487. <https://doi.org/10.1111/avsc.12381>
- Cabrera, M. y Duivenvoorden, J. F. (2020). Drivers of aboveground biomass of high mountain vegetation in the Andes. *Acta Oecologica*, 102. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2019.103504>
- Cabrera, M. y Ramírez, W. (Eds.). (2014). *Restauración ecológica de los páramos de Colombia. Transformación y herramientas para su conservación*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Cáceres, Y., Llambí, L.D. y Rada, F. (2014). Shrubs as foundation species in a high tropical alpine ecosystem: a multi-scale analysis of plant spatial interactions. *Plant Ecology & Diversity*, 874, 1-15. <https://doi.org/10.1080/17550874.2014.960173>
- Calle, Z., Carvajal, M. y Giraldo, A. (2015). En: Aguilar-Garavito M. y Ramírez, W. (Eds.) *Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Cárdenas-Arévalo, G. y Vargas Ríos, O. (2008). Rasgos de historia de vida de especies en una comunidad vegetal alterada principalmente por pastoreo en un páramo húmedo (Parque Nacional Natural Chingaza, Colombia). *Caldasia*, 30(2), 245-264.
- Cárdenas, F. y Tobón, C. (2017). Recuperación del funcionamiento hidrológico de ecosistemas de páramo en Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 20(2), 403-412. <https://doi.org/10.31910/rudca.v20.n2.2017.381>
- Claudio- García, L.E. (2008). Propuesta metodológica para evaluaciones fitosanitarias de árboles. Avances en la investigación científica en Cuba. [Tesis de Doctorado en Ciencias Forestales, Universidad de Pinar del Rio, Cuba].
- Carter, J. (1996). *Recent approaches to participatory forest resource assessment*. Overseas Development Institute.

- Castaño, C. (2002). *Páramos y ecosistemas altoandinos de Colombia en condición hotspot & global climatic tensor*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Castiblanco, F. (2012). *Control de pastos exóticos mediante sombreado artificial y reubicación de especies nativas como estrategias para la restauración ecológica del páramo andino* (PNN Chingaza-Colombia). Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia.
- Ceccon, E. (2013). *Restauración en bosques tropicales: fundamentos ecológicos, prácticos y sociales*. Díaz de Santos Editorial, CRIM, UNAM.
- Ceccon, E. y Roberto-Pérez, D. (Coord.). (2016). *Más allá de la ecología de la Restauración: Perspectivas sociales en América Latina y el Caribe*. Vazquez Mazzini Editorial. <https://doi.org/10.1787/9789264259027-4-es>
- Chaverri, A. y Herrera, B. (1996). *Criterios e indicadores para el manejo forestal sostenible de los bosques de altura en Centroamérica*. FAO, CCAD, CCB-AP.FAO.
- Cleef, A.M. (1981). The vegetation of the paramos of the Colombian Cordillera Oriental. *Dissertationes Botanicae*, 61, 321.
- Cleef, A.M. (2013). Origen, evolución, estructura y diversidad biológica de la alta montaña colombiana. En: J. Cortés-Duque y C. Sarmiento (Eds.). *Visión socioecosistémica de los páramos y la alta montaña colombiana: memorias del proceso de definición de criterios para la delimitación de páramos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Clewell, A. F. y Aronson, J. (2013). *Ecological restoration: Principles, values and structure of an emerging profession*. Second edition. Island Press.
- Clewell, A., Rieger, J. y Munro, J. (2000). *A Society for Ecological Restoration Publication: Guidelines for developing and managing ecological restoration projects*. SER. [http://www.ser.org/content/guidelines\\_ecological\\_restoration.asp](http://www.ser.org/content/guidelines_ecological_restoration.asp)
- Cogollo Calderón, A. M., Velasco Linares, P. y Manosalva, L. (2020). Caracterización funcional de plantas y su utilidad en la selección de especies para la restauración ecológica de ecosistemas altoandinos. *Biota Colombiana*, 21(1), 1-15. <https://doi.org/10.21068/c2020.v21n01a01>
- Contraloría General de la Republica. (2018). Una mirada a las políticas públicas. Colombia 2014-2018. Bogotá, Colombia.
- Constitución Política de Colombia. 1991. [http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/constitucion\\_politica\\_1991.html](http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/constitucion_politica_1991.html)
- Congreso de la República de Colombia. 2018. Ley 1930 del 27 de julio de 2018 “Por medio de la cual se dictan disposiciones para la gestión integral de los páramos en Colombia”.
- Corpochivor. (2018). *Restauración activa y pasiva en el páramo de Rabanal*. Proyecto Páramos: Biodiversidad y Recursos Hídricos en los Andes del Norte. Corpochivor, Garagoa.
- Corte Constitucional. Sentencia C -035 de 2016, Expediente D-10864. Magistrada ponente: Gloria Stella Ortiz Delgado. Bogotá, Colombia.
- Corte Constitucional. Sentencia T- 361 de 2017, Expediente T-5.315.942. Magistrado ponente: Alberto Rojas Ríos. Bogotá, Colombia.
- Cornelissen, J. H. C. , Lavorel, S., Garnier E. , Díaz, S. , Buchmann, N., Gurvich, D. E., Reich, P. B., Steege, H. ter, Morgan, H. D., Heijden, M. G. A. van der, Pausas, J. G. y Poorter, H. (2003). A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 51, 335-380. <https://doi.org/10.1071/BT02124>
- Crawford, P. y Bryce, P. (2003). Project monitoring and evaluation: a method for enhancing the efficiency and effectiveness of aid project implementation. *International Journal of Project Management*, 21(5), 363-373. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(02\)00060-1](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(02)00060-1)
- Crespo P. (2012). *Puentes en las alturas. La sistematización del Proyecto Páramo Andino en Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú*. Condesan.
- Crespo, P., Céleri, R., Buytaert, W., Ochoa, B., Cárdenas, I., Iñiguez, V., Borja, P. y De Bièvre, B. (2014). Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos. En: Cuesta, F., Sevink, J., Llambí, L. D., De Bièvre, B., Posner, J. (Eds.) *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos*. Agregar páginas. Condesan.
- Cuellar A. y Cano A. (2017). *Evaluación de los procesos de restauración ecológica en la reserva biológica En-*

- cenillo. [Trabajo de grado en modalidad de pasantía como requisito para optar al título de Ingeniero forestal, Universidad Distrital Francisco José de Caldas].
- Cuesta F. y Becerra, M.T. (2012). Biodiversidad y Cambio climático en los Andes: Importancia del monitoreo y el trabajo regional. *Revista Virtual REDESMA*, 6 (1), 19-27.
- Cuesta, F., Muriel, P., Beck, S., Meneses, R. I., Halloy, S., Salgado, S., Ortiz, E. y Becerra, M.T. (Eds.). (2012). *Biodiversidad y cambio climático en los Andes tropicales. Conformación de una red de investigación para monitorear sus impactos y delinear acciones de adaptación*. Red Gloria-Andes.
- Danielsen, F., Balete, D.S., Poussen, M.K., Enghoff, M., Nozawsa, C.M., y Jensen, A.E. (2000). A simple system for monitoring biodiversity in protected areas of a developing country. *Biodiversity and Conservation*, 9, 1671-1705. <https://doi.org/10.1023/A:1026505324342>
- Danielsen, F., Burgess, N.D., y Balmford, D. (2005). Monitoring matters: Examining the potential of locally-based approaches. *Biodiversity and Conservation*, 14, 2507-2542. <https://doi.org/10.1007/s10531-005-8375-0>
- Danielsen, F., Jensen, A.E., Alviola, P.A., Balete, D.S., Mendoza, M., Tagtag, A., Custodio, C., y Enghoff, M. (2005). Does monitoring matter? A quantitative assessment of management decisions from locally-based monitoring of protected areas. *Biodiversity and Conservation*, 14, 2633-2652. <https://doi.org/10.1007/s10531-005-8392-z>
- Davy A.J. (2002). Establishment and manipulation of plant populations and communities in terrestrial ecosystems. En: Perrow, M. R. y Davy, A. J. (Eds.). *Handbook of Ecological Restoration. Vol. 1, Principles of restoration* (pp. 223-241). Cambridge University Press.
- Daza, M.C., Hernández, F. y Triana, F.A.. (2014). Efecto del uso del suelo en la capacidad de almacenamiento hídrico en el páramo de Sumapaz - Colombia. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín*, 67(1), 7189-7200. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642>
- De Campos, D. y Finegan, B. (2002). Principios, criterios e indicadores para la evaluación de corredores biológicos y su aplicación. Caso Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana*, 38, 9-13.
- Decreto 2372 de 2010 (julio 1). Por el cual se reglamenta el Decreto Ley 2811 de 1974, la Ley 99 de 1993, la Ley 165 de 1994 y el Decreto Ley 216 de 2003, en relación con el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, las categorías de manejo que lo conforman y se dictan otras disposiciones.
- Decreto 2820 de 2010 por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales.
- Decreto 1076 de 2015 (mayo 26). Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- De Long, J. R., Jackson, B. G., Wilkinson, A., Pritchard, W. J., Oakley, S., Mason, K. E., y Bardgett, R. D. (2019). Relationships between plant traits, soil properties and carbon fluxes differ between monocultures and mixed communities in temperate grassland. *Journal of Ecology*, 107(4), 1704-1719. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13160>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2014). Tercer Censo Nacional Agropecuario, 2014. Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Gobierno Nacional de Colombia. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/censo-nacional-agropecuario-2014>
- Departamento Nacional de Planeación. 2017. Conpes 3886.
- Derroire G., Powers J. S., Hulshof C. M., Cárdenas Varela L. E. y Healey J. R. (2018). Contrasting patterns of leaf trait variation among and within species during tropical dry forest succession in Costa Rica. *Scientific Reports*, 8, 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18525-1>
- Díaz, S., Gurvich, D. E., Pérez, N. y Cabido, M. (2002). ¿Quién Necesita Tipos Funcionales de Plantas? *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 37, 135-140.
- Díaz, J. (2013). *Tratamiento biológico como alternativa para disminuir el impacto ambiental ocasionado por el drenaje ácido, generado por la actividad minera en el municipio de Marmato-Caldas*. [Tesis de maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Universidad de Manizales, Colombia].
- Díaz, J., Amat, G. y Vargas-Ríos, O. (2007). Variación estacional de la antropofauna epigea y su implicación para el monitoreo en proyectos de restauración



- ecológica del bosque altoandino. En: Vargas, O. y Grupo de Restauración Ecológica (Eds.). *Restauración Ecológica del Bosque Altoandino. Estudios diagnósticos y experimentales en los alrededores del embalse de Chisacá, Localidad de Usme, Bogotá D.C.* Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Biología.
- Díaz, S., Pascual, U., Stenseke, M., Martín-López, B., Watson, R. T., Molnár, Z. Y Polasky, S. (2018). Assessing nature's contributions to people. *Science*, 359(6373), 270-272. <https://doi.org/10.1126/science.aap8826>
- Diemer, M. (1998a). Leaf Lifespans of high-elevation, aseasonal Andean shrub species in relation to leaf traits and leaf habit. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 7 (6), 457-465. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822x.1998.00318.x>
- Diemer, M. (1998b). Life span and dynamics of leaves of herbaceous perennials in high-elevation environments: 'news from the elephant's leg'. *Functional Ecology*, 12(3), 413-425. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.1998.00207.x>
- Dorrepaal E. (2007). Are plant growth-form-based classifications useful in predicting northern ecosystem carbon cycling feedbacks to climate change? *Journal of Ecology*, 95(6), 1167-1180. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2007.01294.x>
- Dotz B. y García, N. (2011). Informe final proyecto Implementación técnica y participativa del plan de restauración de las áreas afectadas por incendios forestales en el páramo de Rabanal, municipio de Samacá. Fundación Servir.
- Duarte, N., Cuesta, F., Terán, A., Pinto, E., Arcos, I., Solano, A. y Torres, O. (2017). *Protocolo para monitoreo de áreas de restauración ecológica en los bosques montanos de la Cordillera Occidental del Ecuador*. Condesan, Fundación Imaymana.
- Durán, P. (2010). *Transferencia de metales de suelo a planta en áreas mineras: Ejemplos de los Andes peruanos y de la Cordillera Prelitoral Catalana*. [Tesis doctoral, departamento de Biología Vegetal de la Universidad de Barcelona].
- Dwyer, J. M., Hobbs, R. J. y Mayfield, M. M. (2014). Specific leaf area responses to environmental gradients through space and time. *Ecology*, 95, 399-410. <https://doi.org/10.1890/13-0412.1>
- Etter, A., McAlpine, C. y Possingham, H. (2008). Historical Patterns and Drivers of Landscape Change in Colombia Since 1500: A Regionalized Spatial Approach. *Annals of the Association of American Geographers*, 98(1), 2-23. <https://doi.org/10.1080/00045600701733911>
- Evans, K. y Guariguata, M. (2016). *Éxito desde la base: monitoreo participativo y la restauración de bosques*. CIFOR Occasional Paper No. 167. Center for International Forestry Research (CIFOR).
- Evans, K. y Guariguata, M. (2017). *Éxito desde la base: monitoreo participativo y la restauración de bosques*. Centro para la Investigación Forestal Internacional (CIFOR).
- Flórez, A. (2003). *Colombia: evolución de sus relieves y modelados*. Universidad Nacional de Colombia.
- Franco, A.M. y Bravo, G. (2005). Áreas importantes para la conservación de las aves en Colombia. En: BirdLife International y Conservation International. *Áreas Importantes para la Conservación de las Aves en los Andes Tropicales: sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad* (pp. 117-282). BirdLife International (Serie de Conservación de BirdLife No. 14).
- Galabuzi, C., Eilu, G., Mulugo, L., Kakudidi, E, Tabuti, J. y Sibelet, N. (2014). Strategies for empowering the local people to participate in forest restoration. *Agroforestry Systems*, 88(4), 719-34.
- Galvis, M. (Ed.) (2021). *Claves para la gestión local del páramo*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Garay Salamanca, J. (2013). *Minería en Colombia. Fundamentos para superar el modelo extractivista*. Contraloría General de la República de Colombia.
- García, M. (2018). *Protocolo de monitoreo hidrológico en páramos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Garnier, E., Lavorel, S., Ansquer, P., Castro, H., Cruz, P., Dolezal, J., Eriksson, O., Fortunel, C., Freitas, H., Golodets, C., Grigulis, K., Jouany, C., Kazakou, E., Kigel, J., Kleyer, M., Lehsten, V., Leps, J., Meier, T., Pakeman, R., Papadimitriou, M., Papanastasis, V.P., Quested H, Quétier F, Robson M, Roumet C, Rusch G, Skarpe C, Sternberg M, Theau JP, Thébault, A., Vile, D. y Zarovali, M.P. (2007). Assessing the effects of land-use change on plant traits, communities and

- ecosystem functioning in grasslands: A standardized methodology and lessons from an application to 11 European Sites. *Annals of Botany*, 99, 967-985. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl215>
- Gaston, K. J., Blackburn, T. M. y Lawton, J. H. (1997). Interspecific Abundance-Range Size Relationships: An Appraisal of Mechanisms. *The Journal of Animal Ecology*, 66(4), 579-601. <https://doi.org/10.2307/5951>
- Glozer, K. (2008). *Protocol for leaf Image analysis—surface area*. University of California.
- Godínez-Álvarez, H., Herrick, J., Mattocks, M., Toledo, D. y Van Zee, J. (2009). Comparison of three vegetation monitoring methods: their relative utility for ecological assessment and monitoring. *Ecological Indicators*, 9(5), 1001-1008. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2008.11.011>
- Godoy, L. (2017). *Elaboración de principios, criterios e indicadores para el monitoreo y evaluación del desarrollo de sinergias entre adaptación y mitigación del cambio climático en territorios*. [Tesis Magister Scientiae, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza].
- González, R., Avella, A. y Díaz-Triana, J. (2015). Plataformas de monitoreo para vegetación: toma y análisis de datos. En: Aguilar-Garavito M. y W. Ramírez (Eds.). *Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Grime, J. P., Thompson, K., Hunt, R., Hodgson, J. G., Cornelissen, J. H. C., Hendry, G. A. F., Ashenden, T. W., Askew, A. P., Band, S. R., Booth, R. E., Bossard, C. C., Campbell, B. D., Cooper, J. E. L., Davison, A. W., Gupta, P. L., Hall, W., Hand, D. W., Hannah, M. A., Hillier, S. H., ... Reiling, K. (1997). Integrated Screening Validates Primary Axes of Specialisation in Plants. *Oikos*, 79(2), 259-281. <https://doi.org/10.2307/3546011>
- Gross, M. (2006). Beyond expertise: Ecological science and the making of socially robust restoration strategies. *Journal for Nature Conservation*, 14(3-4), 172-179. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2006.05.004>
- Harden, C. (2006). Human impacts on head water fluvial systems in the northern and central Andes. *Geomorphology*, 79(3-4), 249-263. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.021>
- Hedberg, O. (1964). *Features of afroalpine plant ecology*. Sv. växtgeografiska sällsk.
- Hedberg, I. y Hedberg, O. (1979). Tropical alpine life forms of vascular plants. *Oikos*, 33, 297-307.
- Hernández-C, J. (1997). *Comentarios preliminares sobre la paramización en los Andes de Colombia*. Premio a la vida y obra 1997. Fondo Fen Colombia.
- Herrick, J.E., Garcia Moya, W., Bestelmeyer, B.M., Sundt, P. y Barnes, W.S. (2006a). Arid and semiarid rangeland monitoring in North America. *Sécheresse*, 17(1-2), 235-41.
- Herrick, J.E., Schumann, G. y Rango, A. (2006b). Monitoring ecological processes for restoration projects. *Journal for Nature Conservation*, 14(3-4), 161-171. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2006.05.001>
- Herrick, J.E., Van Zee, J.W., Havstad, K.M., Burkett, L.M. y Whitford, W.G. (2005). *Monitoring manual for grassland, shrubland and savanna ecosystems*. Vol. II: Design, supplementary methods and interpretation. USDA-ARS Jornada Experimental Range.
- Hellawell, J. (1991). Development of a rationale for monitoring. En Goldsmith F. (1991). *Monitoring for Conservation and Ecology*. Chapman & Hall.
- Higgs, E., Falk, D. A., Guerrini, A., Hall, M., Harris, J., Hobbs, R. J., y Throop, W. (2014). The changing role of history in restoration ecology. *Fron Ecol Environ*, 12(9), 499-506. <https://doi.org/10.1890/110267>
- Hinojosa, M. (2019). *Diagnósticos socio ambientales en Ecuador a partir de la Teoría de la Acción Colectiva y los Bienes Comunes*. [Tesis de Maestría en Gestión del Desarrollo, Universidad Andina Simón Bolívar].
- Hockley, N. J., Jones, J. P., Andriahajaina, F. B., Manica, A., Ranambitso, E. H. y Randriamboahary, J. A. (2005). When should communities and conservationists monitor exploited resources? *Biodiversity and Conservation*, 14, 2795-2806. <https://doi.org/10.1007/s10531-005-8416-8>
- Hofstede, R. (1995). The effects of grazing and burning on soil and plant nutrient concentrations in Colombian paramo grasslands. *Plant and Soil*, 173, 111-132. <https://doi.org/10.1007/bf00155524>
- Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., Vásquez, A. y Cerra, M. (2014). *Los páramos Andinos. ¿Qué sabemos? Estado del conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo*. UICN.

- Hofstede, R. (2001). El impacto de actividades humanas en el páramo. En: Mena P., Medina G. y Hofstede, R. (Eds.). *Los páramos del Ecuador: particularidades, problemas y perspectivas* (pp. 161-185). Editorial Abya Yala, Proyecto Páramo.
- Hofstede, R. (2002). *Los páramos andinos; su diversidad, sus habitantes, sus problemas y sus perspectivas. Un breve diagnóstico regional del estado de conservación de los páramos*. Memorias Congreso Mundial de páramos.
- Hofstede, R. (2003). Los páramos en el mundo: su diversidad y sus habitantes. En: Hofstede R., Segarra P. y P. Mena (Eds.). *Los páramos del mundo*. (pp. 15-38). Global Peatland Initiative, NC-UICN, EcoCiencia.
- Holl, K.D. y Cairns Jr., J. (2002). Monitoring and appraisal. En: Perrow, M. y Davy, A.J. (Eds.). *Handbook of ecological restoration. Vol. 1 Principles of restoration*. (pp 411-432). Cambridge University Press.
- Holl, K.D y Aide, T.M. (2010). When and where to actively restore ecosystems? *Forest Ecology and Management*, 261(10), 1558-1563. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.004>
- Hunt, R. y Cornelissen, J. H. C. (1997). Components of relative growth rate and their interrelations in 59 temperate plant species. *New Phytologist*, 135(10), 395-417. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00671.x>
- Ibañez, L. y Granadillo, J. (2014). La importancia de la entomofauna en los ecosistemas de páramo. *Revista de Semilleros de Investigación*, 1,1-5.
- Insuasty-Torres, J., Gómez-Ruiz, P., Rojas-Zamora, O., Cárdenas, C. y Vargas Ríos, O. (2011). Estrategias para la restauración ecológica de los páramos en áreas afectadas por pastoreo (Parque Nacional Natural Chingaza, Colombia). En: Vargas Ríos, O. y Reyes, S. (Eds.). *La restauración ecológica en la práctica: Memorias del I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica y II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica*. Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias.
- Instituto de Investigación Alexander von Humboldt. (2013). *Portafolio Nacional de Restauración de Páramos y Humedales de Alta Montaña*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. (2017). *Recomendación para la delimitación, por parte del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible del Complejo de Páramos La Cocha-Patascoy a escala 1:25.000*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Fondo Adaptación, Convenio interadministrativo 13-014 (FA 005 de 2013).
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. (2011). *El gran libro de los páramos. Proyecto paramo andino*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2018). Reporte de avance del Estudio Nacional del Agua. Ideam, ENA.
- Jaimes, V. y Sarmiento, L. (2002). Regeneración de la vegetación de páramo después de un disturbio agrícola en la cordillera oriental de Colombia. *Eco-tropicos*, 15(1), 61-74.
- Jung, V., Violle, C., Mondy, C., Hoffmann, L. y Muller, S. (2010). Intraspecific variability and trait-based community assembly. *Journal of Ecology*, 98(5), 1134-1140. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01687.x>
- Stafford, M. E. y Stohlgren, T. (2007). Rapid plant diversity assessment using a pixel nested plot design: A case study in Beaver Meadows, Rocky Mountain National Park, Colorado, USA. *Diversity and Distributions*, 13(4), 379-388. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2007.00333.x>
- Keddy, P. (1992). Assembly and response rules-two goals for predictive community ecology. *Journal of Vegetation Science*, 3(2), 157-164. <https://doi.org/10.2307/3235676>
- Keuskamp, J.A., Dingemans, B.J., Lehtinen, T., Sarnneel, J.M. y Hefting, M.M. (2013). Tea Bag Index: A novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. *Methods Ecol. Evol.*, 4(11), 1070-1075. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.12097>
- Kollmann, J., Meyer, S., Bateman, R., Conradi, T., Gossner, M. y Souza Mendonça, M. (2016). Integrating ecosystem functions into restoration ecology-recent advances and future directions. *Restoration Ecology*, 24(6), 722-730. <https://doi.org/10.1111/rec.12422>

- Korb, J., Covington, W. y Fulé, O. (2003). Sampling Techniques Influence Understory Plant Trajectories After Restoration: An Example from Ponderosa Pine Restoration. *Restoration Ecology*, 11(4), 504-515. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100x.2003.rec0170.x>
- Körner, C. (2003). *Alpine Plant Life* (2nd edition). Springer.
- Kusumanto, T. (2007). Learning to monitor political processes for fairness in Jambi, Indonesia. En: Guijt, I. (Ed). *Negotiated Learning: Collaborative Monitoring in Forest Resource Management*. Resources for the Future.
- Lammers, H. y Poorter, H. (1992). Inherent Variation in Growth Rate Between Higher Plants: A Search for Physiological Causes and Ecological Consequences. *Advances in Ecological Research*, 23, 187-261. [https://doi.org/10.1016/s0065-2504\(03\)34004-8](https://doi.org/10.1016/s0065-2504(03)34004-8)
- Lament, W.J. (1993). Plastic Mulches to produce Vegetable Crops. *HortTechnology*, 3(1), 35-39.
- Lammerts van Bueren, E. y Blom, E.M. (1997). *Hierarchical Framework for the formulation of sustainable forest management standards. Principles criteria indicators*. The Tropenbos Foundation.
- Lavorel, S. y Garnier, E. (2002). Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. *Functional Ecology*, 16(5), 545-556. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2002.00664.x>
- Lawrence, A., y Elphick, M. (Eds.) (2002). *Policy implications of participatory biodiversity assessment—summary report. ETFRN. Policy seminar convened by the Environmental Change Institute*. Environmental Change Institute, University of Oxford.
- Lawrence, A., y Ambrose-Oji, B. (2001). *Participatory assessment, monitoring and evaluation of biodiversity: The art and science. A background paper for the ETFRN Workshop on Participatory Monitoring and Evaluation of Biodiversity*, 29 December 2001. Environmental Change Institute, University of Oxford.
- León, O.A. (2003). *Distribución espacial y caracterización de comunidades vegetales de páramo en un gradiente altitudinal con vegetación natural y en proceso de paramización* (Reserva Forestal del Municipio de Cogua, Cundinamarca). [Tesis de pregrado en Ecología, Departamento de Ecología. Pontificia Universidad Javeriana].
- León, O., Jiménez, D. y Marín, C. (2015). Marco conceptual para la identificación de la zona de transición entre el bosque altoandino y páramo. En: Sarmiento C. y León, O. (Eds.). *Transición bosque- páramo. Bases conceptuales y métodos para su identificación en los Andes colombianos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- León, O, Galeano, A. y Aguilar-Garavito. M. (2019). *Diseño de programa de monitoreo de los proyectos de restauración ecológica en paisajes transformados por actividades agropecuarias y mineras, junto con las recomendaciones que permitan su correcta implementación*. Convenio 19-016 (MinAmbiente 209-2019). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Ley 99 de 1993 (diciembre 22). Por medio de la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovable, se organiza el sistema nacional ambiental (SINA) y se dictan otras disposiciones.
- Ley 685 de 2001 (agosto 15). Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones.
- Ley 1382 de 2010 (febrero 9). Por el cual se modifica el Código de Minas.
- Ley 1450 de 2011 (junio 16). Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo, 2010-2014.
- Ley 1753 de 2015 (junio 9). Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 “Todos por un nuevo país.
- Ley 1930 de 2018 (julio 27). Por medio de la cual se dictan disposiciones para la gestión integral de los páramos en Colombia.
- Lindenmayer, D. B. y Likens, G. E. (2009). Adaptive monitoring: a new paradigm for long-term research and monitoring. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(9), 482-486. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.03.005>
- Lindenmayer, D.B. y Likens, G.E. (2010). The science and application of ecological monitoring. *Biological Conservation*, 143(6), 1317-1328. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.02.013>

- Lindenmayer, D. B., Zammit, S. J., Attwood, E., Burns, C. L., Sheperd, G., Kay y Wood, J. (2012). A novel and cost-effective monitoring approach for outcomes in an Australian biodiversity conservation incentive program. *PlosOne*, 7 (12), 1-11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0050872>
- Lindenmayer, L. y Likens, G. (2018). *Effective ecological monitoring*. CSIRO Publishing.
- Lindig Cisneros, R. (2011). La restauración ecológica como una construcción social. En: Vargas Ríos O. y Reyes-B, S.P. (Eds.). *La restauración ecológica en la práctica: memorias del I Congreso colombiano de restauración ecológica y II Simposio nacional de experiencias en restauración ecológica* (pp. 41-49). Universidad Nacional de Colombia.
- Lindig, R. (2017). *Ecología de la restauración y restauración ambiental*. Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia, Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad.
- Little, C. y Lara, A. (2010). Restauración ecológica para aumentar la provisión de agua como un servicio ecosistémico en cuencas forestales del centro-sur de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 31(3), agregar las páginas.
- Llambi, L. D., Fontaine, M., Rada, F., Saugier, B. y Sarmiento, L. (2003). Ecophysiology of dominant species during old field succession in a High Tropical Andean Ecosystem. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 3, 447-453.
- Llambí, L.D., Soto, A., Céleri, De Bievre B., Ochoa B. y Borja, P. (2012). *Ecología, hidrología y suelos de páramo*. Proyecto Páramo Andino, Condesan, GEF-UNEP.
- Llambí, L.D., Fariñas, M., Smith, J., Castañeda, S. y Briceño, B. (2014). Diversidad de la vegetación en dos páramos de Venezuela: un enfoque multi escala con fines de conservación. En: Cuesta, F., Sevink, J., Llambí, L.D., De Bièvre, B. y Posner, J. (Eds.). *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos*. (pp. 1-37). Condesan.
- Llambí, L.D. (2015). Estructura, diversidad y dinámica de la vegetación en el ecotono bosque-páramo: revisión de la evidencia en la Cordillera de Mérida. *Acta biológica Colombiana*, 20(3), 5-19. <https://doi.org/10.15446/abc.v20n3.46721>
- Llambí, L.D. (2018). *Propuesta Estrategia para monitoreo integrado de los Ecosistemas de Alta Montaña de Colombia*. Ideam, Condesan, Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Llambí, L. D., Becerra, M., Peralvo, M., Avella, A., Baruffol, M. y Díaz, L. (2019). Construcción de una Estrategia para el Monitoreo Integrado de los Ecosistemas de Alta Montaña en Colombia. *Biodiversidad en la Práctica*, 4(1), 150-172.
- Lotero, J., Trujillo, L., Vargas, W., y Castellanos, O. (2011). Proceso de Restauración Ecológica en Áreas Afectadas por Incendios en el Complejo de Humedales del Otún, Parque Nacional Natural Los Nevados. En: Vargas Ríos, O. y Reyes, S. (Eds.). *La restauración ecológica en la práctica: Memorias del I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica y II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica*. Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia.
- Lotero, J., Velasco, P., Cardona, A., y Castellanos, O. (2007). *Recuperar el páramo. Restauración ecológica en la Laguna del Otún, PNN Los Nevados*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales de Colombia, Corporación Autónoma Regional de Risaralda.
- Luteyn, J. (1999). *Páramos: A check list of plant diversity, geographical distribution, and botanical literature*. Memoirs of the New York Botanical Garden Volume, 84. The New York Botanical Garden.
- Marín, C., Medina-Rangel, G., Jiménez, D., Sarmiento, M., León, O., Díaz-Triana, J. y Paiba, J. (2015). Protocolos metodológicos para la caracterización de las comunidades bióticas a lo largo del gradiente altitudinal bosque-páramo. En: Sarmiento, C. y León, O. (Eds.). *Transición bosque-páramo. Bases conceptuales y métodos para su identificación en los Andes colombianos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Machmer, M. y Steeger, C. (2002). *Effectiveness monitoring guidelines for ecosystem restoration*. (Final Report). Habitat Branch, Ministry of Water, Land and Air Protection.
- Malagón, D. y Pulido, C. (2000). Suelos del páramo colombiano. En: Rangel J.O. (Ed.). *Colombia. Diversidad Biótica III. La región de vida paramuna* (pp.

- 37-84). Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias.
- Males, N. y Sandoval, C. (2019). Efectividad de estrategias de restauración para la recuperación del páramo de frailejones perturbado por incendios en Chalpatán, Provincia del Carchi. Universidad Técnica Del Norte. [Tesis de grado carrera de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Universidad Técnica del Norte, Ecuador].
- Márquez, G. (2001). De la abundancia a la escasez. En: Palacio, G., González, J., Yepes, F., Carrizosa, J., Palacio, L., Montoya, C. y Márquez, G. *Naturaleza en disputa. Ensayos de historia ambiental en Colombia 1850-1995*. Universidad Nacional de Colombia.
- Martínez-Ramos, M. (2008). Grupos funcionales. En: Soberón, J., Halffter, G. y Llorente-Bousquets, J. *Capital Natural de México, Volumen I. Conocimiento actual de la biodiversidad*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Matteucci, D.S. y Colma, A. (1982). *Metodología para el estudio de la vegetación*. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos.
- Mazón, M., Aguirre, N., Echeverría, C. y Aronson, J. (2019). Monitoring attributes for ecological restoration in Latin America and the Caribbean region. *Restoration Ecology*, 27(5), 992-999. <https://doi.org/10.1111/rec.12986>
- McDonald, T., Gann, G.D., Jonson, J., y Dixon, K.W. (2016). *International standards for the practice of ecological restoration – including principles and key concepts*. Society for Ecological Restoration.
- McGill, B. J., Enquist, B. J., Weiher, E. y Westoby, M. (2006). Rebuilding community ecology from functional traits. *Trends in Ecology & Evolution*, 21, 178-85. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.02.002>
- McGinley, K. y Finegan, B. (2003). The ecological sustainability of tropical forest management: evaluation of the national forest management standards of Costa Rica and Nicaragua, with emphasis on the need for adaptive management. *Forest Policy and Economics*, 5(4), 421-431. [https://doi.org/10.1016/s1389-9341\(03\)00040-6](https://doi.org/10.1016/s1389-9341(03)00040-6)
- Medina-Rangel, G. y López-Perilla, G. (2014). Diversidad de anfibios y reptiles en la alta montaña del Suroriente de la Sabana de Bogotá, Colombia. *Herpetotropicos*, 10(1), 17-30.
- Meinzer, F.C., Goldstein, G. y Rada, F. (1994). Páramo microclimate and leaf thermal balance of andean giant rosette plants. En: Rundel P.W., Smith A.P. y F.C. Meinzer (Eds.). *Tropical alpine environments: plant, form and function* (pp. 45-59). Cambridge University Press.
- Melcher, I. M., Bouman, F. y Cleef, A. M. (2000). Seed Dispersal in Páramo Plants: Epizoochorous and Hydrochorous Taxa. *Plant Biology*, 2, 40-52. <https://doi.org/10.1055/s-2000-9146>
- Melcher, I. M., Bouman, F. y Cleef, A. M. (2004). Seed atlas of the monocotyledonous genera of the páramo. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 199(4), 286-308. <https://doi.org/10.1078/0367-2530-00157>
- Meli, P., Herrera, F. F., Melo, F., Pinto, S., Aguirre, N., Musálem, K., Minaverry, C., Ramírez, W. y Brancañon, P.H.S. (2017). Four approaches to guide ecological restoration in Latin America. *Restoration Ecology*, 25, 156-163.
- Mendoza, H., Lozano, F., Matallana, C., Alameda, J., Ramírez, D., Vargas, W., Rubiano, D., Espinosa, S. y Vargas, A. (2015). La restauración ecológica en áreas rurales en la cuenca del río Tunjuelo (Bogotá) en el contexto de la aplicación de herramientas de manejo del paisaje. En: Cabrera, M. y W. Ramirez (Eds). *Restauración ecológica de los páramos de Colombia. Transformación y herramientas para su conservación*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Meneses, L.F. y Jarro, C. (2009). Restauración Ecológica en Áreas de Páramo Afectadas por Uso Pecuario en El Parque Nacional Natural Pisba. En: Vargas Ríos O. y Reyes S. (Eds.). *La restauración ecológica en la práctica: Memorias del I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica y II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica*. Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia.
- Messier, J., McGill, B. J., Enquist, B. J. y Lechowicz, M. J. (2017). Trait variation and integration across scales: is the leaf economic spectrum present at local scales? *Ecography*, 40(6), 685-697. <https://doi.org/10.1111/ecog.02006>
- Meyer, S.T, Koch, C. y Weisser, W.W. (2015). Towards a standardized Rapid Ecosystem Function As-

- assessment (REFA). *Tree*, 1939. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2015.04.006>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2002). *Programa para el Manejo Sostenible y Restauración de Ecosistemas de la Alta Montaña Colombiana*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (PNGIBSE)*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Plan Nacional de restauración: Restauración Ecológica, Rehabilitación y Recuperación de Áreas disturbadas*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018, 9 de octubre). Bosques, Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos. <http://www.minambiente.gov.co/index.php/bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistemicos/paramos>
- Ministerio de Minas y Energía. (2003). *Glosario Técnico Minero*. Ministerio de Minas y Energía.
- Ministerio de Minas y Energía y Ministerio del Medio Ambiente. (2002). *Guía Minero ambiental de Exploración*. Bogotá D.C.: Ministerio de Minas y Energía.
- Molinillo, M. y Monasterio, M. (2002). Patrones de vegetación y pastoreo en ambientes de páramo. *Ecotropicos*, 15, 19–34.
- Monasterio, M. (1980). *Estudios ecológicos en los páramos andinos*. Universidad de los Andes, Mérida.
- Monasterio, M. y Sarmiento, L. (1991). Adaptive radiation of Espeletia in the cold andean tropics. *Trends in Ecology & Evolution*, 6(12), 387-391. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(91\)90159-u](https://doi.org/10.1016/0169-5347(91)90159-u)
- Morales, M., Otero, J., van der Hammen, T., Torres, A., Cadena, C., Pedraza, C., Rodríguez, N., Franco, C., Betancourth, J.C., Olaya, E., Posada, E. y Cárdenas, L. (2007). *Atlas de páramos de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Morán, M., Campos, J. y Louman, B. (2006). *Uso de principios, criterios e indicadores para monitorear y evaluar las acciones y efectos de políticas en el manejo de los recursos naturales*. Serie técnica. Informe técnico/CATIE no. 347. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Muñoz, Y., Cadena, A. y Rangel-Ch, J.O. (2000). Mamíferos. En: Rangel-Ch. J.O. 2000 (Ed.). *Colombia diversidad biótica III: La región de Vida Paramuna* (pp. 599-611). Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Murcia, C. y Guariguata, M. (2014). *La restauración ecológica en Colombia: Estado actual, tendencias, necesidades y oportunidades*. Documentos ocasionales 107. Centro para la Investigación Forestal.
- Murcia, C., Guariguata, M.R. y Montes, E. (2015). Estado del monitoreo de la restauración ecológica en Colombia. Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres. En: Aguilar-Garavito, M. y Ramírez, W. (Eds). *Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Murcia, C., Guariguata, M., Andrade, A., Andrade, G., Aronson, J., Escobar, E., Etter, A., Moreno, F., Ramírez, W. y Montes, E. (2016). Challenges and prospects for scaling-up ecological restoration to meet international commitments: Colombia as a case study. *Conservation Letters*, 9(3), 213-220. <https://doi.org/10.1111/conl.12199>
- Nicholls, C. I., Altieri, M. A. y Vázquez, L. L. (2015). Agroecología: Principios para la reconversión y el rediseño de sistemas agrícolas. *Agroecología*, 10(1), 61-72.
- Noon, B. R. (2003). *Conceptual issues in monitoring ecological resources*. En: Busch, D. E., y Joel, C. (Eds.). *Monitoring ecosystems: interdisciplinary approaches for evaluating ecoregional initiatives* (pp. 27-72). Island Press.
- Oksanen, J., Blanchet, F.G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlenn, D., Minchin, P.R., O'Hara, R.B., Simpson, G.L., Solymos, P., Henry, M., Stevens, H., Szoecs, E., y Wagner, H. (2019). *Vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.5-6. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Ospina, E. y Molina, J. (2013). Legislación Colombiana de Cierre de Minas. ¿Es realmente necesaria? *Bol. Cienc. Tierra*, 34, 51-62.
- Pabón y García. (1996). *Modelo Conceptual de los componentes Hidrológico, Oceanográfico, Meteorológico y Climatológico del Sistema de Información Ambiental*. Nota Técnica del Ideam.

- Pabón Caicedo, J.D. (2012). Cambio climático en Colombia: tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 36(139), 261-278.
- PACTO, Pela Restauração da Mata Atlântica. (2013). *Protocolo de monitoramento para programas e projetos de restauração florestal*. PACTO.
- Paradelo, R. (2013). Utilización de materiales compostados en la rehabilitación potencial de espacios afectados por residuos mineros y suelos de mina. *Boletín Geológico y Minero*, 124(3), 405-419.
- Peralvo, M. y Cuesta, F. (2014). Dinámicas de cambio de cobertura y uso de la tierra en los páramos andinos. En Cuesta, F., Sevink, J., Llambí, L.D., De Bièvre, B. y Posner, J. (Eds). *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos*. Condesan.
- Peet, R., Wentworth, T. y White, P. (1998). A Flexible, Multipurpose Method for Recording Vegetation Composition and Structure. *Castanea*, 63(3), 262-274.
- Pelayo, R. y Soriano, P. (2014). Áreas prioritarias para la conservación de las aves en las cuencas altas de tres ríos andinos. En Cuesta, F., Sevink, J., Llambí, L.D., De Bièvre, B. y Posner, J. (Eds.). *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos*. Condesan.
- Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Cornelissen, J. H. C. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 61(3), 167-234. <https://doi.org/10.1071/BT12225>
- Pizano, C. y Curiel, J. (2015). El monitoreo del suelo en los procesos de restauración ecológica: indicadores, cuantificadores y métodos. En: Aguilar-Garavito, M. y Ramírez, W. (Eds.). *Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Pinilla, C. (2012). *Portafolio de restauración de páramos y humedales de alta montaña*. Convenio MinAmbiente-IAvH No. 2012- 12-092. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Ponce de León, E. (2002). Marco Jurídico Colombiano Relacionado con los Paramos. En: Ange, C. J., Arjona, F., Rodríguez, J. y Duran, C. (Eds.). *Congreso Mundial de Páramos*. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Ministerio del Medio Ambiente y Conservación Internacional.
- Poorter, H. y De Jong, R. (1999). A comparison of specific leaf area, chemical composition and leaf construction costs of field plants from 15 habitats differing in productivity. *New Phytologist*, 143(1), 163-176. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00428.x>
- Poorter, H., Niinemets, Ü., Poorter, L., Wright, I. J. y Villar, R. (2009). Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): a meta-analysis. *New Phytologist*, 182(3), 565-588. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02830.x>
- Prabhu, R., Colfer, C.J.P., Venkateswarlu, P., Tan, L.C., Soekmadi, R. y Wollenberg, E. (1996). *Testing Criteria and Indicators for the Sustainable Management of Forests: Phase 1*. (Final Report). CIFOR Special Publication.
- Premauer, J. y Vargas, O. (2004). Patrones de diversidad en vegetación pastoreada y quemada en un páramo húmedo (Parque Natural Chingaza, Colombia). *Ecotropicos*, 17, 52-66.
- Procuraduría Delegada para Asuntos Ambientales. (2018). *Evaluación Normativa, Social y Ambiental de los Paramos en Colombia*. Informe Preventivo No. 003. Procuraduría Delegada para Asuntos Ambientales de Colombia.
- R Core Team. (2019). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Ramsay, P.M. y Oxley, E.R.B. (1997). The growth form composition of plant communities in the ecuadorian páramos. *Plant Ecology*, 131(2), 173-192. <https://doi.org/10.1023/A:1009796224479>
- Rangel-Ch, O. (2000). *Colombia. Diversidad biótica III. La Región de vida paramuna de Colombia*. Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia, Instituto Alexander von Humboldt.
- Ramírez, W., Aguilar-Garavito, M. y Cabrera, M. (2015). Definición de objetivos, metas, indicadores y cuantificadores para el monitoreo a procesos de restauración ecológica. En: Aguilar-Garavito M. y Ramírez, W. (Eds). *Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas*



- terrestres. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Raudes, M. y Sagastume, N. (2009). *Manual de Conservación de Suelos*. Programa para la Agricultura Sostenible en Laderas de América Central. Carrera de Ciencia y Producción Agropecuaria. Escuela Agrícola Panamericana, El Zamorano. Honduras.
- Redacción El Espectador. (2016, 9 de febrero). Oro y carbón, los principales minerales que se están explotando en los páramos. *El Espectador*.
- Reed, J., Van Vianen, J., Deakin, E., Barlow, J. y Sunderland, T. (2016). Integrated landscape approaches to managing social and environmental issues in the tropics: Learning from the past to guide the future. *Global Change Biology*, 22(7), 2540-54. <https://doi.org/10.1111/gcb.13284>
- Reay, S.D. y Norton, D.A. (1999). Assessing the success of restoration plantings in a temperate New Zealand forest. *Restoration ecology*, 7(3), 298-308. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100x.1999.72023.x>
- Región Administrativa y de Planeación Especial (RAPE). (2019). *Proyecto páramos*. <http://paramos.region-centralrape.gov.co/>
- Reis, A., Tres, D.R. y Scariot, E.C. (2007). Restauração na Floresta Ombrófila Mista através da sucessão natural. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 55, 67-73.
- Reis, A., Bechara, F.C. y Tres, D.R. (2010). Nucleation in tropical ecological restoration. *Scientia Agricola*, 67(2), 244-250. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162010000200018>
- Reis, A., Bechara, F.C., de Espíndola, M.B., Vieira, N.K. y Lopes de Sousa, L. (2003). Restauração de Áreas Degradadas: A Nucleação como Base para os Processos Sucessionais. *Revista Natureza y Conservação*, 1(1), 28-36.
- Resolución 769 de 2002 (agosto 5). Por la cual se dictan disposiciones para contribuir a la protección, conservación y sostenibilidad de los páramos.
- Resolución 839 de 2003 (agosto 1). Por la cual se establecen los términos de referencia para la elaboración del Estudio sobre el Estado Actual de Páramos y del Plan de Manejo Ambiental de los Páramos.
- Resolución 0886 de 2018 (mayo 18). Por la cual se adoptan los lineamientos para la zonificación y régimen de usos en las áreas de páramos delimitados y se establecen las directrices para diseñar, capacitar y poner en marcha programas de sustitución y reconversión de las actividades agropecuarias y se toman otras determinaciones.
- Ricotta, J.A. y Masiunas, J. B. (1991). The Effects of Black Plastic Mulch and Weed Control Strategies on Herb Yield. *HortScience*, 26(5), 539-541. <https://doi.org/10.21273/hortsci.26.5.539>
- Riginos, C., Herrick, J.E., Sundaresan, S.R., Farley, C. y Belnap, J. (2010). A Simple Graphical Approach to Quantitative Monitoring of Rangelands. *Rangelands*, 33(4), 6-13. <https://doi.org/10.2111/1551-501x-33.4.6>
- Rivera, D. y Pinilla, C. (2015). Transformación de los páramos en Colombia. En: Cabrera, M. y Ramirez, W. (Eds). *Restauración ecológica de los páramos de Colombia. Transformación y herramientas para su conservación*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Rojas, A., Osejo, A., Duarte, B., Piñeros, B. y Menjura, T. (2014). En: M. Cabrera y W. Ramirez (Eds.). *Restauración ecológica de los páramos de Colombia. Transformación y herramientas para su conservación*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt.
- Rojas-Zamora, O., Insuasty-Torres, J., Cardenas, C.A. y Vargas Ríos, O. (2013). Reubicación de plantas de *Espeletia grandiflora* (Asteraceae) como estrategia para el enriquecimiento de áreas de páramo alteradas (PNN Chingaza, Colombia). *Rev. Biol. Trop.*, 61 (1), 363-376.
- Rojas, A., Osejo, A., Duarte, B., Franco, B. y Menjura, T. (2015). *Guía de trabajo con comunidades de páramo. Propuesta metodológica de Investigación Acción Participativa (IAP) aplicada con dos comunidades campesinas de los páramos de Guerrero y Rabanal*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Rodríguez, N. y Rojas, S. (2009). Perfil de proyecto del componente de investigación “evaluación y seguimiento a procesos de restauración”, en el marco del proyecto 638 “restauración ecológica, rehabilitación y/o recuperación de áreas alteradas del Distrito Capital y la región”. Informe. Jardín Botánico José Celestino Mutis.
- Roldán-Pérez, G. (2003). *La bioindicación de la calidad del agua en Colombia*. Editorial Universidad de Antioquia.

- Roldán-Pérez, G. (2016). Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 40(155), 254-274. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.335>
- Sabogal, C., Besacier, C. y McGuire, D. (2015). Restauración de bosques y paisajes: conceptos, enfoques y desafíos que plantea su ejecución. *Unasylva*, 66, 2015/3.
- Salafsky, N., Margoluis, R. y Redford, K. (2001). Adaptive Management: A Tool for Conservation Practitioners. Biodiversity Support Program (BSP), a consortium of World Wildlife Fund, The Nature Conservancy, and World Resources Institut. Disponible online: <http://fosonline.org/wp-content/uploads/2019/01/AdaptiveManagementTool.pdf>
- Salgado-Negret, B., Pulido, E., Cabrera, M., Ruíz, C. y Paz, H. (2015). Protocolo para la medición de rasgos funcionales en plantas. En: Salgado-Negret, B. (Ed). *La ecología funcional como aproximación al estudio, manejo y conservación de la biodiversidad: protocolos y aplicaciones*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Salgado-Negret, B. y Paz, H. (2015). Escalando los rasgos funcionales a procesos poblacionales, comunitarios y ecosistémicos. En: Salgado-Negret, B. (Ed). *La ecología funcional como aproximación al estudio, manejo y conservación de la biodiversidad: protocolos y aplicaciones*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Sánchez, J. y Ferreira, J. (2016). Drenajes ácidos de Mina Alternativas de tratamiento. *REV. MAMYM*, 1, 20-33. <https://doi.org/10.15649/24225126.272>
- Sánchez, L. y Tole, M.A. (2019). *Estrategias de restauración en función de la conservación frente a la pérdida de área del Páramo de Guargua y Laguna Verde en la Vereda Salinas* (Municipio Carmen De Carupa). [Tesis de grado Especialización en Gestión Ambiental Urbana, Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Piloto de Colombia].
- Sánchez-Clavijo, L.M., Montenegro-Muñoz, S.A. y Pachón-Castellanos, L.F. (2019). *Lineamientos para el monitoreo de biodiversidad en los páramos de Colombia*. Informe técnico del convenio APC Colombia, Instituto Humboldt y Proyecto Páramos Unión Europea.
- Sarmiento, C., Cadena, C., Sarmiento, M., Zapata, J. y León, O. (2013). *Aportes a la conservación estratégica de los páramos de Colombia: Actualización de la cartografía de los complejos de páramo a escala 1:100.000*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Sarmiento, C. (Ed.). (2016). *Páramos y Humedales. Construcción de insumos técnicos para la gestión integral del territorio y la adaptación al cambio climático en ecosistemas estratégicos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Sarmiento, L. y Llambí, L.D. (2011). Regeneración del ecosistema de páramo después de un disturbio agrícola: síntesis de dos décadas de investigaciones en sistemas con descansos largos de la Cordillera de Mérida. En: Herrera F. e I. Herrera (Eds.). *La restauración ecológica en Venezuela: fundamentos y experiencias*. (pp. 123-145). Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas.
- Serman, P. (2012). Landscapes as integrating frameworks for human, environmental and policy process. En: Bieling, C. y Plieninger, T. *Resilience and the Cultural Landscape: Understanding and Managing Change in Human-Shaped Environments*. Cambridge University Press.
- Schafer, W., Nielsen, G., Dollhopf, D. y Temple, K. (1979). *Soil genesis, hydrological properties, root characteristics and microbial activity of 1 to 50-year old stripmine spoils*. Environmental Protection Agency.
- Schneider, C.A., Rasband, W.S. y Eliceiri, K.W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature methods*, 9, 671-675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- Schöb, C., Butterfield, B. J. y Pugnaire, F. I. (2012). Foundation species influence trait-based community assembly. *New Phytologist*, 196(3), 824-834. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04306.x>
- Selaya, G. N., Oomen, R. J., Netten, J. J. C., Weger, M. J. A. y Anten, N. P. R. (2008). Biomass allocation and leaf life span in relation to light interception by tropical forest plants during the first years of secondary succession. *Journal of Ecology*, 96(6), 1211-1221. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2008.01441.x>

- Sesquilé Escobar, E. (2017). *Monitoreo de acciones de restauración ecológica en el PNN Los Nevados (Monitoring of ecological restoration actions at the PNN Los Nevados)*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Sirvet, M.T. y Rigal, L. (2012). *Investigación Acción Participativa*. Proyecto Páramo Andino.
- Smith, A.P. y Young, T.P. (1987). Tropical Alpine Plant Ecology. *Annals Review Ecology and Systematic*, 18, 137-158. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.18.110187.001033>
- Sparks, T., Butchart, S., Balmford, A., Bennun, L., Stanwell, D., Walpole, M., y Green, R. (2011). Linked indicator sets for addressing biodiversity loss. *Oryx*, 45(3), 411-419. <https://doi.org/10.1017/s003060531100024x>
- Society for Ecological Restoration - SER. (2004). SER International Primer on Ecological Restoration. SER. [www.ser.org/resources/resources-detail-view/ser-international-primer-on-ecological-restoration](http://www.ser.org/resources/resources-detail-view/ser-international-primer-on-ecological-restoration)
- Society for Ecological Restoration Australasia (SERA). (2017). *National standards for the practice of ecological restoration in Australia. Second edition*. SERA.
- Sturm, H. y Rangel-Ch, O. (1985). *Ecología de los páramos andinos: una visión preliminar integrada*. Universidad Nacional de Colombia.
- Suárez, J. (2001). *Control de Erosión en Zona Tropicales*. División Editorial y de Publicaciones Universidad Industrial de Santander.
- Suter, G. W. (1993). A critique of ecosystem health concepts and indexes. *Environmental toxicology and chemistry*, 12(9), 1533-1539. <https://doi.org/10.1002/etc.5620120903>
- Tapia, C., Buitrago, A., López, G., Baptiste, B.LG., Vásquez, A. y Armero, M. (2011). *Manejo de páramos*. Proyecto Páramo Andino.
- ter Braak, C.J.F. (1987). Ordination. En Jongman, R.H., ter Braak, C.J.F. y van Tongeren, O.F.R. (Eds.). *Data analysis in community and landscape ecology*. Pudoc Wageningen.
- Umaña, M. N., Zhang, C., Cao, M., Lin, L. y Swenson, N. G. (2015). Commonness, rarity, and intraspecific variation in traits and performance in tropical tree seedlings. *Ecology Letters*, 18(12), 1329-1337. <https://doi.org/10.1111/ele.12527>
- Urbina-Cardona, N., Bernal, E., Giraldo-Echeverry, N. y Echeverry-Alcendra, A. (2015). El monitoreo de herpetofauna en los procesos de restauración ecológica: indicadores y métodos. En: Aguilar-Garavito M. y W. Ramírez (Eds.). *Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Usher, M. (1991). Scientific requirements of a monitoring programme. En: Goldsmith F. *Monitoring for Conservation and Ecology*. Chapman & Hall.
- Valencia, J., Lassaletta, L., Velázquez, E., Nicolau, J. M. y Gómez-Sal, A. (2012). Factors Controlling Compositional Changes in a Northern Andean Páramo (La Rusia, Colombia). *Biotropica*, 45(1), 18-26. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2012.00895.x>
- Valencia, J. (2015). *Factores que controlan el proceso de paramización en el norte de Los Andes (La Rusia, Colombia)*. [Tesis Doctoral, Departamento de ciencias de la vida, Universidad de Alcalá].
- Vallejo, M. y Gómez, D. (2017). Marco conceptual para el monitoreo de la biodiversidad en Colombia. *Biodiversidad en la práctica*, 2 (1), 1-47
- Valles, M. (2008). *Fitorremediación y estabilización química en la recuperación de suelo contaminado con metales pesados*. [Tesis Maestría en Ciencia y Tecnología Ambiental, Centro de Investigación en Materiales Avanzados].
- Van der Hammen, T. (1988). South America. En: B. Hutley y T. Webb III (Eds.). *Vegetation History* (pp. 307-337). Kluwer Academic Publisher.
- Van der Hammen, T. (1992). *Historia, ecología y vegetación*. Fondo FEN Colombia, Fondo de Promoción de la Cultura del Banco Popular, Corporación Colombiana para la Amazonia Araracuara.
- Van der Hammen, T. y Cleef, A. M. (1986). Development of the high Andean páramo flora and vegetation. En F. Vuilleumier y M. Monasterio (Eds.). *High Altitude Tropical Biogeography*. Pp: 153-201. Oxford University Press.
- Varela, A., Fuentes Martínez, L.S., Medina, C. y Jácome, J. (2017). Programa nacional evaluación del estado de los frailejones en los páramos de los Andes del norte: avances. En: *Memorias del IX Congreso Colombiano de Botánica* (30 de julio al 3 de agosto de 2017). Suplemento Especial Revis-

- ta Ciencia y Desarrollo, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Varela, A. (2014). Limitantes en la restauración ecológica: estudio de caso de las afecciones por patógenos en el Parque Nacional Natural Chingaza. En: Cabrera M. y Ramírez, W. (Eds). *Restauración ecológica de los páramos de Colombia. Transformación y herramientas para su conservación*. (pp. 212-227). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Vargas, O. (2002). Disturbios y patrones sucesionales y grupos funcionales de especies en la interpretación de matrices de paisaje en los páramos. *Perez Arbelaez*, 13, 73-89.
- Vargas, O., Premauer, J. y Cárdenas, C. (2002). Efecto del pastoreo sobre la estructura de la vegetación en un páramo húmedo de Colombia. *Ecotrópicos*, 15(1), 35-50.
- Vargas, O. y Pedraza, P. (2003). *El Parque Nacional Natural Chingaza*. Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia.
- Vargas Ríos, O., Jaimes, V. I., Castellanos, L. y Mora, J. (2004). *Propuesta de actividades de investigación para los páramos de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Vargas, O. (2013). Disturbios en los páramos andinos. En: Cortés-Duque J. y C. Sarmiento (Eds.). *Visión socioecosistémica de los páramos y la alta montaña colombiana: memorias del proceso de definición de criterios para la delimitación de páramos*. (pp. 39-57). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Vargas, O. (2017). *Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino. Los pasos fundamentales para la restauración ecológica*. Grupo de Restauración Ecológica, Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia.
- Vargas, O., Díaz, J., Reyes, S., y Gómez, A. (2017). *Guías técnicas para la restauración ecológica en Colombia*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- Vargas-Ríos, O. (2000). *Sucesión – regeneración del páramo después de quemas*. [Tesis de maestría en Biología, Línea ecología, Universidad Nacional de Colombia].
- Vargas-Ríos, O. (2011). Restauración ecológica: biodiversidad y conservación. *Acta Biológica Colombiana*, 16(2), 221-246.
- Vargas-Ríos, O. (Ed.) (2021). *Bases ecológicas y sociales para la restauración de los páramos*. Grupo de Restauración Ecológica, Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia.
- Vargas-Ríos, O. y Velasco-Linares, P. (2011). *Reviviendo nuestros páramos. Restauración ecológica de páramos*. Proyecto Páramo Andino.
- Vargas-Ríos, O., Díaz, J., Reyes, S. y Gómez Ruiz, P. (2012). *Guías Técnicas Para La Restauración Ecológica De Los Ecosistemas de Colombia*. Convenio de Asociación No. 22 entre Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia.
- Vásquez, M. y Solorza, J. (2018). Agrupación funcional de especies vegetales para la restauración ecológica de ecosistemas de montaña, Bogotá, Colombia. *Colombia Forestal*, 21(1), 5-17. <https://doi.org/10.14483/2256201X.11730>
- Von Bertrab, A. y Zambrano, L. (2010). Participatory Monitoring and Evaluation of a Mexico City Wetland Restoration Effort. *Ecological Restoration*, 28(3), 343-353. <https://doi.org/10.3368/er.28.3.343>
- Von Haden, A.C. y Dornbush, M. E. (2019). Depth Distributions of Belowground Production, Biomass and Decomposition in Restored Tallgrass Prairie. *Pedosphere*, 29(4), 457-467. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(17\)60455-7](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(17)60455-7)
- Velasco-Linares, P. (2014). Lineamientos y estrategias de restauración de los ecosistemas de páramo. En: Cabrera M. y W. Ramírez (Eds.). *Restauración ecológica de los páramos de Colombia. Transformación y herramientas para su conservación*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Walker, E. A., Hermann, J. M. y Kollmann, J. (2015). Grassland restoration by seeding: Seed source and growth form matter more than density. *Applied Vegetation Science*, 18(3), 368-378. <https://doi.org/10.1111/avsc.12153>

- Westoby, M. (1998). A leaf-height-seed (LHS) plant ecology strategy scheme. *Plant and Soil*, 199, 213-227. <https://doi.org/10.1023/A:1004327224729>
- Wallin, L., Svensson, B. M. y Lönn, M. (2009). Artificial Dispersal as a Restoration Tool in Meadows: Sowing or Planting? *Restoration Ecology*, 17(2), 270-279. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100x.2007.00350.x>
- Wildeman, T.R. y Laudon, L.S. (1989). La utilización de los humedales para el tratamiento de los problemas ambientales de la minería: las aplicaciones de minería no de carbón. En: Hammer D.A. (Ed.). *Humedales Artificiales para el Tratamiento de Aguas Residuales*. Lewis Publishers.
- Wildlife Conservation Society-WCS. (2018). *Diseño e implementación de la estrategia de restauración activa (siembras) y pasiva (aislamiento con cercos) en el ecosistema de páramos del Parque Nacional Natural Los Nevados, en la laguna El Mosquito, ubicada en la cuenca alta del río Otún (Risaralda)*. Proyecto Páramos: Biodiversidad y Recursos Hídricos en los Andes del Norte.
- Whitelaw, G., Vaughan, H., Craig, V., Atkinson, D. (2003). Establishing the Canadian Community Monitoring Network. *Environmental Monitoring and Assessment*, 88, 409-418. <https://doi.org/10.1023/A:1025545813057>
- Yepes, A., Arango, C. F., Cabrera, E., González, J. J., Galindo, G., Barbosa, A. P., Urrego, D., Tobón, P., Suárez, A. y Camacho, A. (2018). *Propuesta de lineamientos para el monitoreo comunitario participativo en Colombia y su articulación con el Sistema Nacional de Monitoreo de Bosques*. Ideam, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Programa ONU-REDD Colombia.
- Wickham, H. (2007). Reshaping Data with the reshape Package. *Journal of Statistical Software*, 21(12), 1-20. <https://doi.org/10.18637/jss.v021.i12>
- Wickham, H., y Henry, L. (2019). tidy: Tidy Messy Data. R package version 1.0.0. <https://CRAN.R-project.org/package=tidy>
- Worrall, A., Neil, D., Brereton, D. y Mulligan, D. (2009). Towards a sustainability criteria and indicators framework for legacy mine. *Journal of Cleaner Production*, 17(16), 1426-1434. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.04.013>
- Wortley, L., Hero, J.M. y Howes, M. (2013). Evaluating ecological restoration success: a review of the literature. *Restoration Ecology*, 21(5), 537-543. <https://doi.org/10.1111/rec.12028>
- Wu, J. (2013). Landscape sustainability science: Ecosystem services and human well-being in changing landscapes. *Landscape Ecology*, 28(6), 999-1023. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9894-9>
- Yarranton, G.A. y Morrison, R.G. (1974). Spatial dynamics of a primary succession: nucleation. *The Journal of Ecology*, 62(2), 417-428. <https://doi.org/10.2307/2258988>
- Zamudio, C. B., García, J., Redondo, J., Camacho, E., Garzón, C. y Hernández-Marrique, O. (2019). *Propuesta metodológica para la evaluación de sostenibilidad multiescala en paisajes productivos, aplicada en al menos un paisaje colombiano*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Zapata- Ríos, G. y Branch, L. (2014). Evaluación de los factores determinantes de presencia – ausencia de los carnívoros en los Andes ecuatorianos. En: Cuesta, F., Sevink, J., Llambí, L.D., De Bièvre, B., Posner, J. (Eds.). *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos*. Condesan.
- Zuleta, G.A., Rovere, A.E. y Mollard, F.P.O (Eds.). (2015). *Aportes y Conclusiones. Tomando decisiones para revertir la degradación ambiental*. Vázquez Mazzini Editores.

# GLOSARIO

**Arcilla:** la palabra arcilla se emplea para hacer referencia a rocas sedimentarias y, en general, a un material terroso de grano fino que se hace plástico al ser mezclado con una cantidad limitada de agua. Las arcillas son siempre de grano muy fino, el límite superior en el tamaño de los granos corresponde, por lo general, a un diámetro de 0.004 mm (menores de 4 micras). En mineralogía y petrografía se conocen como arcillolitas.

**Biorremediación:** técnicas basadas en el potencial de organismos vivos, principalmente microorganismos y plantas para descontaminar el medio ambiente (Durán, 2010).

**Bocamina:** 1. La entrada a una mina, generalmente un túnel horizontal. 2. Sitio en superficie por donde se accede a un yacimiento mineral.

**Cárcava:** se denomina cárcava al estado más avanzado de la erosión en surcos. Agrietamiento producido por la erosión de las laderas arcillosas.

**Cierre:** terminación de actividades mineras o desmantelamiento del proyecto originado en renuncia total, caducidad o extinción de los derechos del titular minero. Es la última etapa del desarrollo de una mina y se presenta cuando los márgenes de rentabilidad no son los adecuados por los bajos tenores o agotamiento de las reservas que no la hacen competitiva con otras minas.

**Colas:** material resultante de procesos de lixiviación y concentración de minerales que contiene muy poco metal valioso. Pueden ser nuevamente tratadas o desechadas.

**Deslizamiento:** es un movimiento abrupto del suelo y las rocas subyacentes en una ladera muy pendiente en repuesta a la fuerza de gravedad. Los deslizamientos pueden ser ocasionados por un terremoto u otro fenómeno natural.

**Derrumbe:** 1. Hundimiento de un tajo o un corte (cámara). 2. Colapso de labores mineras.

**Drenaje Ácido de Mina** (geoquímica): un DAM es un agua de pH bajo, enriquecida en sulfatos y con grandes concentraciones de acidez. La acidez de los DAM es producida por oxidación e hidrólisis de minerales de sulfuros y está representada por acidez mineral, que depende de la geología del depósito (hierro, aluminio, manganeso y otros metales), y acidez del ion hidrógeno.

**Erosión:** 1. Fenómeno de descomposición y desintegración de materiales de la corteza terrestre por acciones mecánicas o químicas. 2. Pérdida física de suelo transportado por el agua o por el viento, causada principalmente por deforestación, laboreo del suelo en zonas no adecuadas, en momentos no oportunos, con las herramientas impropias o utilizadas en exceso, especialmente en zonas de ladera. Puede tener impactos adversos tan importantes sobre el recurso como la pérdida de la capa o del horizonte superficial con sus contenidos y calidades de materiales orgánicos, o en la fuente de nutrientes y cementantes que mantienen una buena estructura y, por lo tanto, un buen paso del agua y el aire. En la minería la erosión hídrica es la más importante y puede ser laminar, en regueros o surcos y en barrancos o cárcavas. 3. Conjunto de procesos externos (exógenos) que mediante acciones físicas y químicas (como agua, hielo, viento) degradan las formas creadas por los procesos endógenos.

**Escombrera:** 1. Depósito donde se disponen de manera ordenada los materiales o residuos no aprovechables (estériles) procedentes de las labores de extracción minera. 2. Lugar seleccionado para depositar la capa vegetal, estériles y otros desechos sólidos provenientes de la explotación o el beneficio de los minerales.

**Escombros** (industria minera): 1. Material o roca que fueron rotos mediante la voladura. 2. Material de suelo, arena, arcilla o limo no consolidados, encontrados como material de recubrimiento en las operaciones de minería a cielo abierto. 3. Material estéril producido en una mina.

**Estabilidad** (geotecnia): resistencia de una estructura, un talud o un muro de contención, a la falla por desli-

zamiento o colapso bajo condiciones normales, para las que fue diseñado.

**Estabilidad del talud:** 1. Es la resistencia de cualquier superficie inclinada, como las paredes de una mina a cielo abierto o los cortes de taludes, a fallar. 2. Es la resistencia de una pendiente natural o artificial, o cualquiera otra superficie inclinada a fallar.

**Estéril:** 1. Se dice de la roca o del material de vena que prácticamente no contiene minerales de valor recuperables, que acompañan a los minerales de valor y que es necesario remover durante la operación minera para extraer el mineral útil. 2. En carbones, del estrato sin carbón, o que contiene mantos de carbón muy delgados para ser minados. 3. En depósitos minerales lixiviados, se dice de una solución de la cual los minerales de valor disueltos han sido removidos por precipitación, intercambio de iones, o por extracción por solventes. 4. Escombros que se forman cuando se explotan las minas. En las explotaciones mineras se utiliza el mineral aprovechable, pero el resto del material que acompaña al mineral y no es útil (ganga) se deja acumulado cerca de las galerías o explotaciones mineras en forma de derrubios. 5. Material sin valor económico que cubre o es adyacente a un depósito de mineral y que debe ser removido antes de extraer el mineral.

**Frente** (industria minera): 1. Lugar donde explotan los minerales de interés económico. 2. Superficie expuesta por la extracción. 3. Superficie al final de una labor minera (túnel, galería, cruzada, otras). 4. Lugares donde se ejecutan las tareas de avance y desarrollo de la mina.

**Galerías** : Túneles horizontales al interior de una mina subterránea.

**Laguna o presa de colas:** 1. Depresión usada para confinar las colas resultantes del proceso de beneficio. 2. Área cuyo límite más bajo corresponde a un muro o presa de contención, hacia la cual circulan los efluentes provenientes del beneficio, cuya primera función

es permitir suficiente tiempo para que las arenas y los metales pesados se sedimenten o para que el cianuro sea destruido antes que el agua “clara” sea descargada o recirculada al molino.

**Mina abandonada:** 1. Operación minera que se encuentra clausurada. 2. Excavación, derrumbada o sellada, que ha sido abandonada y en la cual no se pretende llevar a cabo operaciones mineras futuras.

**Minería a cielo abierto:** actividades y operaciones mineras desarrolladas en superficie.

**Minería ilegal:** es la minería desarrollada sin estar inscrita en el Registro Minero Nacional y, por lo tanto, sin título minero. Es la minería desarrollada de manera artesanal e informal, al margen de la ley. También incluye trabajos y obras de exploración sin título minero. Incluye minería amparada por un título minero, pero donde la extracción, o parte de ella, se realiza por fuera del área otorgada en la licencia.

**Minería informal:** constituida por las unidades de explotación pequeñas y medianas de propiedad individual y sin ningún tipo de registros contables.

**Minería legal:** es la minería amparada por un título minero, que es el acto administrativo escrito mediante el cual se otorga el derecho a explorar y explotar el suelo y el subsuelo mineros de propiedad nacional, según el Código de Minas. El título minero deberá estar inscrito en el Registro Minero Nacional.

**Minería subterránea:** actividades y operaciones mineras desarrolladas bajo tierra o subterráneamente.

**Plan de Cierre y abandono:** plan que se pone en marcha tras finalizar la vida productiva de las explotaciones mineras, el cual incluye el desmantelamiento y la demolición de las instalaciones que no cumplen ninguna función, el acondicionamiento de las bocaminas y los tambores de ventilación, y la restauración de los depósitos de estériles, con miras a eliminar posibles

fuentes de contaminación de las aguas, riesgos de accidentes, erosión de los terrenos, entre otros.

**Reconversión de actividades agropecuarias en páramos:** se entiende como una estrategia de gestión del cambio de los sistemas agropecuarios que integra y orienta acciones que progresivamente conllevan a la transformación de los actuales modelos de producción no compatibles con el ecosistema, hacia modelos de producción agroecológica o en el marco de distintas escuelas de agricultura limpia y tradicional o ancestral, según usos y costumbres. En este sentido, busca reducir de manera integral los conflictos de uso del territorio y los impactos biofísicos, sociales, económicos y culturales derivados del desarrollo de actividades agropecuarias. Aplica a las actividades productivas agropecuarias que existían antes de la entrada en vigor de las regulaciones actuales y sin perjuicio de la reglamentación de áreas protegidas y de instrumentos de ordenamiento territorial preexistentes que fueran más restrictivos.

**Sustitución de actividades agropecuarias en páramos:** se refiere al cambio o reemplazo progresivo de las actividades de producción agropecuarias y otras no compatibles con el ecosistema, por otras actividades económicas acordes con sus condiciones biofísicas y bajo el marco legal vigente. Estas nuevas actividades deben mantener o mejorar las condiciones económicas para el sustento de las comunidades y la sostenibilidad del ecosistema. Esta estrategia aplica prioritariamente para las actividades que fueron introducidas con posterioridad a la entrada en vigor de las regulaciones actuales o en áreas de especial importancia ecosistémica tales como humedales, nacimientos de agua, áreas de suministro de acueductos, entre otras.

**Riesgo** (seguridad e higiene minera): en salud ocupacional, se denomina riesgo a la probabilidad de que un objeto, material, sustancia o fenómeno pueda potencialmente desencadenar alguna perturbación en la salud o en la integridad del trabajador.

**Sedimentación:** es la separación de partículas sólidas en suspensión de un líquido, se realiza por asentamiento gravitacional.

**Socavón:** 1. Galería principal de una mina, de la cual parten las galerías secundarias. 2. Labor labrada en la ladera de un cerro y que se interna hacia su interior en forma paralela al horizonte. 3. Un socavón que ha sido agrandado hasta ser convertido en un cuarto subterráneo mediante la extracción de minerales.

**Subsidencia** (geomorfología): es el desplazamiento hacia abajo de un terreno. Este hundimiento se vuelve problemático si es en zonas donde existen edificaciones. Puede ser causada por movimientos del suelo como levantamiento de terreno y deslizamiento de terreno. También por: algunos tipos de arcillas (los suelos de arcilla se dilatan o contraen según su contenido en agua (75 %); vegetación, los árboles robustos absorben el agua del suelo durante los períodos secos; las obras subterráneas, minas fuera de uso, apisonamientos de terraplenes, entre otros (15%); o tubos de desagüe perforados, los escapes de agua pueden erosionar cimientos (5%) Worrall et al., (2009), Paradelo (2013)

**Subsidencia** (sedimentología): 1. Hundimiento progresivo, regular o a sacudidas durante un período bastante largo, del fondo de una fosa o depresión (cuenca sedimentaria, marina o no) que se desarrolla paralelamente a la sedimentación depositada en ella.

**Surco** (erosión): la erosión en surcos es la forma de erosión más fácilmente perceptible, tiene su origen a causa del escurrimiento superficial del agua que se concentra en sitios irregulares o depresiones superficiales del suelo desprotegido o trabajado inadecuadamente. En función de la pendiente y de la longitud de la ladera del terreno, el flujo concentrado de agua provoca el aumento de las dimensiones de los surcos formados inicialmente, hasta transformarse en grandes zanjas llamadas cárcavas.

---

Para ampliar el glosario sobre temas de restauración ecológica véase el glosario de la publicación: Aguilar-Garavito M. y Ramírez, W. (Eds.). (2015). *Monitoreo a procesos de restauración ecológica aplicado a ecosistemas terrestres*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.



# ANEXOS

## Anexo 1. Listado de proyectos de restauración ecológica del páramo andino.

Tipo de disturbio	Ubicación	Título	Estrategias	Autor y año
Ganadería	Parque Nacional Natural Chingaza, Colombia	Estrategias para la restauración ecológica de los páramos en áreas afectadas por pastoreo.	1) La descompactación mecánica del suelo y el trasplante de mantos de suelo provenientes de zonas conservadas	Insuasty-Torres et al. 2011.
			2) La siembra de <i>Lupinus bogotensis</i> como especie fijadora de nitrógeno y facilitadora del crecimiento y supervivencia de <i>E. grandiflora</i> y macollas de gramíneas	
			3) El trasplante de individuos de <i>E. grandiflora</i> y varias especies de macollas	
	Parque Nacional Natural Pisba, Colombia	Restauración Ecológica en Áreas de Páramo Afectadas por Uso Pecuario en El Parque Nacional Natural Pisba.	1) Implementación de los arreglos florísticos con base en la caracterización de la zona riparia y de pie de ladera	Meneses et al. 2009.
			2) Aislamientos con alambre de púas	
	Parque Nacional Natural Chingaza, Colombia	Control de pastos exóticos mediante sombreado artificial y reubicación de especies nativas como estrategias para la restauración ecológica del páramo andino (PNN Chingaza-Colombia).	1) Sombreado artificial con acolchado de plástico negro durante tres o siete meses, con el fin de controlar la regeneración de los pastos exóticos, luego de la remoción de la biomasa epigea y parte de la hipogea	Castiblanco, 2012.
			2) Reubicación de especies: dos arbustos ( <i>Arcytophyllum nitidum</i> , <i>Pentacalia ledifolia</i> ) y dos rosetas ( <i>Paepalanthus alpinus</i> , <i>Puya trianae</i> ), para la conformación de núcleos de restauración, en las parcelas donde se había realizado la remoción de pastos	Ávila, 2014.
			3) Sombreado artificial sobre la reubicación de especies	
	Unidad Hidrográfica Jatunhuaicu, Ecuador	Guía para la Restauración Ecológica en los Páramos del Antisana.	1) Descompactación mecánica y traslado de suelo de los escenarios de referencia	Aguirre et al. 2014.
			2) Resiembra de macollas de pajonal y traslado de tapetes de plantas	

Tipo de disturbio	Ubicación	Título	Estrategias	Autor y año
	Parque Nacional Natural Los Nevados, Colombia	Diseño e implementación de la estrategia de restauración activa (siembras) y pasiva (aislamiento con cercos) en el ecosistema de páramos del Parque Nacional Natural Los Nevados, en la laguna El Mosquito, ubicada en la cuenca alta del río Otún (Risaralda).	1) Siembra de especies nativas 2) Aislamientos 3) Propagación de especies	WCS, 2018.
Fuego	Parque Nacional Natural Los Nevados, Colombia	Proceso de Restauración Ecológica en Áreas Afectadas por Incendios en el Complejo de Humedales del Otún, Parque Nacional Natural Los Nevados.	1) Evaluación del estado de la regeneración natural 2) Implementación de Núcleos de Regeneración mediante la relocalización de cespedones, traslado de suelo y bloqueo y siembra de arbustos 3) Conectividad a través de perchas artificiales para aves y refugios artificiales para fauna 4) Disminución del efecto de la erosión mediante barreras naturales antiescorrentía 5) Núcleos de facilitación, a través de la siembras de hierbas y arbustos, y la adición de semillas 6) Propagación de material vegetal de plantas propias de páramo	Lotero et al. 2007, 2011.
	Provincia del Carchi, Ecuador	Efectividad de estrategias de restauración para la recuperación del páramo de frailejones perturbado por incendios en Chalpatán, provincia del Carchi.	1) Regeneración natural con las especies <i>Hypericum laricifolium</i> e <i>Hypericum empetrifolium</i> 2) Introducción de especies nativas con dos densidades de la especie <i>Polylepis incana</i> 3) Traslado de parches con las especies <i>Hypericum laricifolium</i> e <i>Hypericum empetrifolium</i>	Males y Sandoval, 2019.
	Páramo de Rabanal, Colombia	Implementación técnica y participativa del plan de restauración de las áreas afectadas por incendios forestales en el páramo de Rabanal-Municipio de Samacá.	1) Plantación de especies nativas 2) Siembra de semillas 3) Aislamientos	Dotor y García, 2011.

Tipo de disturbio	Ubicación	Título	Estrategias	Autor y año
Agricultura y ganadería	Páramo de Guargua y Laguna Verde, Colombia	Estrategias de restauración en función de la conservación frente a la pérdida de área del Páramo de Guargua y Laguna Verde en la Vereda Salinas (Municipio Carmen De Carupa).	1) Propagación de especies	Sanchez y Tole, 2019.
			2) Aislamiento	
			3) Cercas vivas	
	Páramo de Rabanal, Colombia	Restauración ecológica activa y pasiva en el páramo de Rabanal.	1) Aclareos en plantaciones forestales	Corpochivor, 2018.
			2) Repoblación vegetal	
			3) Enriquecimientos	
			4) Aumento de bordes de relictos de bosques	
			5) Aislamientos	
	Complejos de páramos de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Meta, Tolima y Bogotá D.C	"Proyecto Páramos: Biodiversidad y Recursos Hídricos en los Andes del Norte"	1) Propagación de especies	RAPE, 2019.
			2) Aislamiento	
3) Siembra de especies				
Cuenca del río Tunjuelo, Bogotá	La restauración ecológica en áreas rurales en la cuenca del río Tunjuelo (Bogotá) en el contexto de la aplicación de herramientas de manejo del paisaje.	1) Cercas vivas mixtas para generar conectividad por linderos entre coberturas y para ofrecer recursos a la finca como madera y leña.	Mendoza et al. 2015.	
		2) Recuperación de rondas sobre microcuencas		
		3) Reconversión en sistemas productivos		
		4) Cerramiento de bosques		

**Anexo 2.** Caso hipotético usado como ejemplo para la selección de objetivos y metas de restauración.

**Problemática:** la cuenca alta del río blanco posee una gran cantidad de humedales que se encuentran muy deteriorados debido al aumento en la cobertura de especies invasoras y a que el ganado pastorea en sus zonas de amortiguación. Esto ha llevado a una reducción en la

cobertura vegetal nativa, en las poblaciones de aves acuáticas y en la calidad del agua. A pesar de que muchos habitantes tienen que traer agua del pueblo para consumo, no existe ninguna medida de conservación de los humedales.

Indicadores					
Objetivos específicos	Metas	Plazo	Respuesta	Presión	Estado
O1. Restaurar la cobertura vegetal de los humedales y sus áreas de amortiguación.	M1. Cercar la totalidad del perímetro de las zonas de amortiguación de los humedales	2 años	I1R. Porcentaje de perímetro cercado	I1P. Probabilidad de ocupación de ganado	-
	M2. Erradicar completamente las plantas invasoras de los humedales	10 años	I2R. Número de campañas de erradicación por año	I2P. Probabilidad de ocupación de plantas invasoras	-
	M3. Incrementar de forma sostenida la tasa de reclutamiento para poblaciones de plantas nativas prioritarias	10 años	I3R. Número de plántulas sembradas por año	-	I3E. Tasa de reclutamiento anual
	M4. Aumentar el porcentaje de cobertura de vegetación nativa al 80 %	10 años	-	-	I4E. Porcentaje de cobertura de vegetación nativa
O2. Restaurar los servicios ecosistémicos de provisión de hábitat para las aves acuáticas y de agua potable para los habitantes de la CARB.	M5. Fomentar un aumento sostenido en las poblaciones de aves acuáticas	10 años	-	-	I5E. Cuento máximo de individuos por especie
	M6. Reducir la alteración potencial de la calidad de agua hasta el nivel bajo	5 años	-	-	I6E. Índice de alteración potencial de la calidad de agua (IACAL)
O3. Mejorar la percepción que los habitantes de la CARB tienen acerca de la importancia de los humedales de alta montaña.	M7. Realizar actividades de educación ambiental acerca de los humedales para 60 % de los habitantes de las veredas	2 años	I7R. Porcentaje de habitantes que han participado en actividades de educación ambiental	-	-
	M8. Capacitar mínimo 25 habitantes locales para la guía de recorridos de avistamiento de aves en los humedales	5 años	I8R. Número de guías por vereda	-	-
	M9. Divulgar entre los habitantes los resultados arrojados por el programa de monitoreo	10 años	I9R. Porcentaje de habitantes que conocen los impactos del proyecto de restauración	-	-

**Objetivo general:** mejorar la salud de de los humedales de la cuenca alta del río blanco (CARB).

Beneficio	VARIABLES	Frecuencia medición	Hipótesis
-	V1R. Kilómetros de cerca instalada V1P. Presencia/ausencia de ganado	Trimestral (8 mediciones)	A medida que aumenta el porcentaje del perímetro cercado, disminuye la probabilidad de ocupación del ganado
-	V2R. Número de campañas de erradicación V2P. Presencia/ausencia de especies invasoras"	Anual (10 mediciones)	A medida que aumenta el número de campañas de erradicación por año, disminuye la probabilidad de ocupación de especies invasoras
-	V3R. Número de plántulas sembradas V3E. Número de plantas sembradas el año anterior que sobrevivieron	Anual (10 mediciones)	A medida que aumenta el número de plántulas sembradas por año, aumenta la tasa de reclutamiento anual
-	V4E. Área en vegetación nativa	Bianual (5 mediciones)	A medida que disminuye la probabilidad de ocupación de ganado y especies invasoras y que aumenta la tasa de reclutamiento de las especies nativas, aumenta la cobertura de vegetación nativa
I5B. Porcentaje de visitantes que son observadores de aves	V5E. Número de individuos por especie V5B. Número de observadores de aves	Mensual (120 mediciones)	A medida que disminuye la probabilidad de ocupación de especies invasoras y que aumenta la cobertura de vegetación nativa, aumentan la abundancia de aves acuáticas, el porcentaje de visitantes que son observadores de aves y las actitudes positivas hacia la conservación de los humedales
I6B. Porcentaje de habitantes que utilizan el agua de los humedales para consumo	V6E. Cargas contaminantes de materia orgánica, sólidos suspendidos y nutrientes V6B. Número de habitantes que utilizan el agua de los humedales para consumo	Semestral (10 mediciones)	A medida que disminuye la probabilidad de ocupación de ganado y que aumenta la cobertura de vegetación nativa, disminuye el IACAL y aumentan el porcentaje de habitantes que utilizan el agua y las actitudes positivas hacia la conservación de los humedales
I7B. Porcentaje de habitantes con actitudes positivas hacia la conservación de los humedales	V7R. Número de habitantes que han participado en actividades de educación ambiental V7B. Número de habitantes encuestados que manifiestan estar dispuestos a cuidar los humedales	Trimestral (8 mediciones)	A medida que aumenta la participación en actividades de educación ambiental, aumentan las actitudes positivas hacia la conservación de los humedales
I8B. Porcentaje del ingreso familiar de los guías que proviene del turismo	V8R. Número de habitantes capacitados V8B. Ingreso por actividades de turismo	Anual (5 mediciones)	A medida que aumenta el número de guías, aumentan el porcentaje de visitantes que son observadores de aves y el ingreso derivado de esta actividad
-	V9R. Número de habitantes que participan en los eventos o que reciben material de divulgación	Bianual (5 mediciones)	A medida que aumenta el número de habitantes que conocen los impactos del proyecto, aumentan las actitudes positivas hacia la conservación de los humedales

**Anexo 3.** Escenarios de sostenibilidad para el páramo andino de Colombia. Fuente: Elaboración propia a partir de la Resolución 0886 de 2018.

Categorías de Zonificación	Subcategorías	Alcance de la categoría	Escenario de uso deseado	Herramienta de cambio aplicable
Zona en tránsito a la reconversión y sustitución	Sustitución prioritaria	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ Áreas con actividades agropecuarias introducidas sobre áreas de vegetación natural desde el año 2011 en adelante.</li> <li>⊕ Áreas en las que se venían desarrollando actividades agropecuarias antes del 16 de junio de 2011 pero que se consideren de alta importancia para el suministro de servicios ecosistémicos; por ejemplo, nacimientos de agua, cuerpos de agua y sus rondas hídricas, humedales, áreas de importancia cultural, entre otras.</li> <li>⊕ Áreas que fueron intervenidas por procesos de exploración y explotación de recursos minero-energéticos de manera previa a la entrada en vigencia de la normativa relacionada.</li> </ul> <p>Los usos y las actividades que allí se permitan deberán procurar recuperar y mantener la composición, estructura y función del páramo.</p>	Preservación	Sustitución / Restauración
	Reconversión y sustitución de los medios de vida de base agropecuaria	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ Áreas en las que se venían desarrollando actividades agropecuarias antes del 16 de junio de 2011 y que se encuentran por fuera del alcance de la subcategoría de sustitución prioritaria.</li> </ul>	Uso agropecuario sostenible	Reconversión / Rehabilitación ecológica
Áreas prioritarias para la restauración ecológica	No aplica	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ Áreas que actualmente no se encuentran bajo uso agropecuario pero que pudieron ser objeto de alteraciones de origen natural u antrópico.</li> <li>⊕ Áreas que han sido afectadas por movimientos de remoción en masa, incendios de cobertura vegetal, invasión biológica o fenómenos hidrometeorológicos que hayan alterado significativamente el ecosistema y constituyan elementos de riesgo para la población circundante.</li> <li>⊕ Áreas impactadas por la actividad minera que han sido alteradas y degradadas significativamente.</li> </ul>	Preservación	Restauración ecológica
Áreas prioritarias para su preservación	No aplica	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ Zonas de alta importancia ambiental o fragilidad ecológica, que contribuyan al mantenimiento de la estructura y función de los ecosistemas de páramo, así como al mantenimiento de sus recursos naturales renovables y bellezas escénicas.</li> <li>⊕ Zonas de especial importancia para la provisión de servicios ecosistémicos; por ejemplo, cuencas aferentes de bocatomas de acueductos veredales o municipales, áreas de importancia cultural, turismo de naturaleza, entre otras.</li> </ul>	Preservación	Restauración ecológica

**Anexo 4.** Plan minero y restauración.

Aspectos	Objetivos del cierre y abandono	Botaderos de estériles	Túneles (subterránea)	Presa de relaves	Infraestructura	Manejo de aguas
Estabilidad física	Estabilizar superficies					
	Controlar riesgos					
	Restringir accesos					
	Controlar y prevenir erosión					
	Clausurar entradas					
	Prevenir fallas, derrumbes y producción de material particulado (sedimentos)					
	Garantizar seguridad de las estructuras y en el área					
	Lograr estabilidad a largo plazo					
	Mantener capacidad de inundación					
	Prevenir contra obstrucciones					
	Mantener flujo del agua					
	Controlar accesos					
Estabilidad química	Cumplir normas de calidad de aguas					
	Mantener calidad de aguas					
	Prevenir fugas al ambiente					
	Controlar reacciones					
	Controlar migración y dispersión					
	Recolectar y tratar residuos					
	Mantener seguridad en el área					
Uso del territorio	Recuperar para uso alternativo y apropiado					
	Recuperar patrones de drenaje					

**Anexo 5.** Ficha de monitoreo de estabilidad física.

<b>FORMULARIO DE EVALUACIÓN ESTABILIDAD FÍSICA</b>																											
<b>I. INFORMACIÓN GENERAL Y GEOGRÁFICA</b>																											
<b>A. Identificación y localización</b>	Observaciones:																										
1 Departamento																											
2 Municipio																											
3 Vereda																											
4 Nombre del predio																											
5 Propietario del predio																											
<b>II. CARACTERIZACIÓN DEL SITIO</b>																											
<b>A. Aspectos Físicos</b>																											
<b>1. Morfología</b>	<b>6. Frecuencia de procesos de remoción en masa</b>																										
Plano (menor al 3 %) <input type="checkbox"/> 1	No hay <input type="checkbox"/> 1																										
Ondulado (3 % - 7 %) <input type="checkbox"/> 2	Pocos (10 % del área) <input type="checkbox"/> 2 <i>(continúe)</i>																										
Alomado (7 % - 12 %) <input type="checkbox"/> 3	Frecuentes (10 % - 25 % del área) <input type="checkbox"/> 3 <i>(continúe)</i>																										
Colinado (12 % - 25 %) <input type="checkbox"/> 4	Abundantes (25 % - 75 % del área) <input type="checkbox"/> 4 <i>(continúe)</i>																										
Montañoso (mayor al 25 %) <input type="checkbox"/> 5	Muy abundantes (más del 75 % área) <input type="checkbox"/> 5 <i>(continúe)</i>																										
<b>2. Pendiente lateral</b>	<b>7. Clase de procesos de remoción en masa</b>																										
Menor al 10 % <input type="checkbox"/> 1	Reptación <input type="checkbox"/> 1																										
Entre el 10 % y el 20 % <input type="checkbox"/> 2	Terracetos y patas de vaca <input type="checkbox"/> 2																										
Mayor al 20 % <input type="checkbox"/> 3	Soliflucción <input type="checkbox"/> 3																										
<b>3. Pendiente longitudinal</b>	Flujos de lodo <input type="checkbox"/> 4																										
Menor al 10 % <input type="checkbox"/> 1	Deslizamientos y derrumbes <input type="checkbox"/> 5																										
Entre el 10 % y el 20 % <input type="checkbox"/> 2	Desprendimientos y caídas de roca <input type="checkbox"/> 6																										
Mayor al 20 % <input type="checkbox"/> 3	Golpes de cuchara <input type="checkbox"/> 7																										
<b>4. Grado de erosión</b>	<b>8. Cuerpos de agua</b>																										
No hay <input type="checkbox"/> 1 <i>(pase a 6)</i>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left; border-bottom: 1px solid black;">Tipo</th> <th style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">Código</th> <th style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">Distancia</th> <th style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">Pendiente</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="border-bottom: 1px solid black;">a. _____</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;"><input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;"><input type="text"/> <input type="text"/> %</td> </tr> <tr> <td style="border-bottom: 1px solid black;">b. _____</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;"><input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;"><input type="text"/> <input type="text"/> %</td> </tr> <tr> <td style="border-bottom: 1px solid black;">c. _____</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;"><input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;"><input type="text"/> <input type="text"/> %</td> </tr> <tr> <td style="border-bottom: 1px solid black;">d. _____</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;"><input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;"><input type="text"/> <input type="text"/> %</td> </tr> <tr> <td style="border-bottom: 1px solid black;">e. _____</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;"><input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;"><input type="text"/> <input type="text"/> %</td> </tr> </tbody> </table>			Tipo	Código	Distancia	Pendiente	a. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m	<input type="text"/> <input type="text"/> %	b. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m	<input type="text"/> <input type="text"/> %	c. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m	<input type="text"/> <input type="text"/> %	d. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m	<input type="text"/> <input type="text"/> %	e. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m	<input type="text"/> <input type="text"/> %
Tipo	Código	Distancia	Pendiente																								
a. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m	<input type="text"/> <input type="text"/> %																								
b. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m	<input type="text"/> <input type="text"/> %																								
c. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m	<input type="text"/> <input type="text"/> %																								
d. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m	<input type="text"/> <input type="text"/> %																								
e. _____	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m	<input type="text"/> <input type="text"/> %																								
Baja <input type="checkbox"/> 2 <i>(continúe)</i>	<b>Códigos tipos de cuerpos de agua</b>																										
Moderada <input type="checkbox"/> 3 <i>(continúe)</i>	1. Drenaje permanente (río, quebrada, caño)																										
Severa <input type="checkbox"/> 4 <i>(continúe)</i>	2. Drenaje intermitente																										
Muy severa <input type="checkbox"/> 5 <i>(continúe)</i>	3. Drenaje artificial (canal, vallado)																										
<b>5. Evidencias de erosión</b>	4. Nacedero																										
Canales difusos <input type="checkbox"/> 1	5. Jagüey																										
Canales bien definidos <input type="checkbox"/> 2	6. Tanque de Almacenamiento																										
Surquillos <input type="checkbox"/> 3	7. Lago/Laguna																										
Surcos <input type="checkbox"/> 4																											
Cárcavas <input type="checkbox"/> 5																											
Erosión laminar severa <input type="checkbox"/> 6																											
<b>Observaciones u otros aspectos físicos</b>																											



### III. OBRAS DE PROTECCIÓN Y ESTABILIZACIÓN

#### C. Obras de Estabilización y Protección

##### 1. Cunetas

	Tipo	Cantidad de obra
Revestidas		<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m
No revestidas		<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m

##### 2. Zanjas de coronación

	Tipo	Cantidad de obra
Revestidas		<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m
No revestidas		<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m

##### 3. Revestimientos superficiales

	Tipo	Cantidad de obra
Suelo cemento		<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m
Piedra pegada		<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m
Empedrado		<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m
Reforestación		<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m

##### 4. Cerramientos en malla eslabonada

	Tipo	Cantidad de obra
Cerramiento		<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m

#### D. Estructuras de retención

##### 5. Trinchos

	Tipo	Cantidad de obra
Permanente metálico		<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m <sup>2</sup>
Provisional madera		<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m <sup>2</sup>

##### 6. Otras estructuras

	Tipo	Cantidad de obra
Tabla estacado madera		<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m <sup>2</sup>
Gaviones		<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m <sup>2</sup>
Muros de concreto ciclópedo		<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> m <sup>2</sup>

#### Observaciones sobre obras de protección y estabilización

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

#### IV. OBSERVACIONES GENERALES

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**Anexo 6.** Manejo y procesamiento de datos de monitoreo a la restauración ecológica en páramos. Elaborado por: Angélica Hernández-Palma, 2020.

Este código de programación en R está escrito con el objetivo de ilustrar el proceso de verificación, manejo, y análisis de datos recolectados durante el proceso de monitoreo de un proyecto de restauración ecológica de páramos andinos. Este código utiliza una base de datos como ejemplo para ilustrar el proceso descrito anteriormente. La base de datos está disponible en el cuerpo de este código.

### Instalación de paquetes

En primer lugar se deben instalar los paquetes con los cuales vamos a trabajar este ejemplo. Los paquetes requeridos para este ejemplo son:

- + vegan
- + tidyr
- + reshape
- + ggplot2
- + Rmisc
- + RCurl

Los paquetes se instalan en el computador una primera y única vez, utilizando el comando:

```
install.packages(" ")
```

Entre las comillas se escribe el nombre del paquete a instalar. En el caso del primer paquete requerido, la forma de instalarlo es así:

```
install.packages("vegan")
```

Es necesario que el usuario instale los seis paquetes mencionados anteriormente con el fin de utilizar este código sin problemas.

### Cargar paquetes a la sesión

Una vez hayan instalado los paquetes requeridos, estos se deben cargar a la sesión de trabajo. Este procedimiento se realiza cada vez que se inicie una sesión en RStudio. Dentro de estos paquetes están las funciones que se utilizan en este código ejemplo.

Si estos paquetes no están cargados a la sesión en el momento de trabajar, el código no funcionará correctamente, el programa arrojará mensajes de error, y el ejemplo no funcionará.

```
library(vegan)
library(tidyr)
library(reshape)
library(ggplot2)
library(Rmisc)
library(RCurl)
```

### Cargar la base de datos

La base de datos a usar como ejemplo en este código se encuentra en GitHub, para cargarla a la sesión es necesario correr las siguientes líneas:

```
x <- getURL("https://raw.githubusercontent.com/ahernandezpalma/
Monitoreo_Paramos_Andinos/master/monitoreo_final.csv")
datos <- read.csv(text = x)
```

### Estructura de los datos y cambiar tipos de variables

Ahora se deben ver la estructura de los datos y de cada variable (columna):

```
str(datos)

## 'data.frame': 131 obs. of 24 variables:
## $ fecha : Factor w/ 8 levels "13/07/2017","26/06/2017",...:
1 2 5 5 4 5 5 5 ...
## $ pais : Factor w/ 1 level "Colombia": 1 1 1 1 1 1 1 1 ...
## $ departamento : Factor w/ 1 level "Risaralda": 1 1 1 1 1 1 1
1 1 ...
## $ municipio : Factor w/ 1 level "Pereira": 1 1 1 1 1 1 1 1 ...
```

```
## $ lugar      : Factor w/ 1 level "PNN Los Nevados": 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 ...
## $ localidad  : Factor w/ 2 levels "Laguna del Otun",...: 2 1 1 1 1
1 1 1 1 1 ...
## $ zona       : Factor w/ 4 levels "Alsacia Baja ",...: 4 3 1 1 1 1
1 1 1 ...
## $ implementacion: int 2011 2011 2009 2009 2009 2009 2009
2009 2009 2009 ...
## $ altitud    : int 3647 4073 3948 3948 3948 4016 3940 3948
3948 3948 ...
## $ hora       : Factor w/ 19 levels "10:35","10:42",...: 4 10 18 18
18 15 8 18 18 18 ...
## $ codigo     : Factor w/ 20 levels "AT1","AT2","AT3",...: 19 12 5
5 5 3 4 5 5 5 ...
## $ transecto  : int 4 2 5 5 5 3 4 5 5 5 ...
## $ subparcela : int 2 1 3 1 2 2 1 2 3 2 ...
## $ cobertura  : Factor w/ 5 levels "Arbustal-Pajonal",...: 5 2 1 1 1
3 1 1 1 1 ...
## $ familia    : Factor w/ 8 levels "Asteraceae","Clethraceae",...: 8
1 1 1 1 1 1 1 1 ...
## $ genero     : Factor w/ 14 levels "Acaena","Baccharis",...: 1 2 2
2 2 2 2 2 2 2 ...
## $ especie    : Factor w/ 15 levels "Acaena elongat",...: 1 2 3 3 3
3 3 3 3 3 ...
## $ cap        : num 3.77 3.14 3.14 3.14 3.14 ...
## $ dap        : num 1.2 1 1 1 1 1 1.1 1.2 1.3 1.9 ...
## $ altura     : num 80 91 67 76 95 60 72 73 88 137 ...
## $ cob_x      : int 103 45 25 33 39 46 48 63 48 80 ...
## $ cob_y      : int 115 45 21 26 29 27 58 74 32 63 ...
## $ cob_total  : int 11845 2025 525 858 1131 1242 2784
4662 1536 5040 ...
## $ observaciones : Factor w/ 3 levels "", "Rebrote", "Seco": 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 ...
```

Cada línea de código (##) muestra una variable (columna) diferente, así como el tipo de variable (chr= carácter/texto, int= número entero, num= numérico, Factor= categórico).

Algunas veces es necesario cambiar el tipo de variable para obtener los resultados deseados. En nuestro caso por ejemplo, el transecto se guardó como un número entero, ya que son números enteros del 1 al

5. Sin embargo, para razones de análisis de los datos necesitamos que esta variable sea categórica. Estos cambios de tipos de variables se pueden hacer de la siguiente manera:

```
datos$implementacion = as.factor(datos$implementacion) #Año de
implementación. Se debe cambiar de número entero a factor
datos$transecto = as.factor(datos$transecto) #Transecto. Se debe
cambiar de número entero a factor
datos$subparcela = as.factor(datos$subparcela) #Subparcela. Se
debe cambiar de número entero a factor
datos$familia = as.factor(datos$familia) #Familia. Se debe cambiar de
caracter/texto a factor
datos$genero = as.factor(datos$genero) #Género. Se debe cambiar
de caracter/texto a factor
datos$especie = as.factor(datos$especie) #Especie. Se debe cambiar
de caracter/texto a factor
```

## Resumen y exploración de los datos

Se puede ver un resumen de cada variable de la base datos:

```
summary(datos)
##      fecha      pais      departamento      municipio
## 7/9/2017 :32  Colombia:131  Risaralda:131  Pereira:131
## 29/06/2017:30
## 7/11/2017 :21
## 27/06/2017:14
## 26/06/2017:12
## 28/06/2017:11
## (Other)  :11
##      lugar      localidad      zona
## PNN Los Nevados:131  Laguna del Otun :93  Alsacia Baja :41
##                      Vereda El Bosque:38  Lomabonita :26
##                      Plan del Puma:26
##                      Playa Rica  :38
##
##
##
## implementacion  altitud  hora  codigo  transecto
## 2009:67          Min. :3647 13:20 :18  AT4 :18  1:25
```

```
## 2011:64      1st Qu.:3677 14:11 :18 PRT3 :18 2:18
##           Median :3948 15:50 :12 AT5 :12 3:29
##           Mean  :3923 10:42 :10 PRT1 :10 4:32
##           3rd Qu.:4060 15:20 :9  PPT4 :7 5:27
##           Max.  :4120 14:00 :7  PPT5 :7
##           (Other):57 (Other):59
## subparcela cobertura familia genero
## 1:46 Arbustal-Pajonal :30 Asteraceae :59 Escallonia :29
## 2:42 Frailejonal-Pajonal:41 Escalloniaceae:29 Baccharis :28
## 3:43 Pajonal :16 Hyperaceae :18 Espeletia :18
## Pastos Arbolados :6 Rosaceae :14 Hypericum :17
## Pastos Limpios :38 Loranthaceae :6 Hesperomeles:13
## Clethraceae :3 Pentacalia :11
## (Other) :2 (Other) :15
## especie cap dap
## Escallonia myrtilloides :29 Min. :3.140 Min. :1.000
## Baccharis tricuneata :27 1st Qu.:3.768 1st Qu.:1.200
## Espeletia hartwegiana :18 Median :5.024 Median :1.530
## Hypericum laricifolium :17 Mean :14.123 Mean :2.871
## Hesperomeles obtusifolia:13 3rd Qu.:25.277 3rd Qu.:2.000
## Pentacalia vaccinioides :11 Max. :66.568 Max. :18.500
## (Other) :16
## altura cob_x cob_y cob_total
## Min. :13.50 Min. :10.00 Min. :10.00 Min. :100
## 1st Qu.:62.00 1st Qu.:45.00 1st Qu.:34.00 1st Qu.:1600
## Median :82.00 Median :63.00 Median :57.00 Median :
3672
## Mean :93.87 Mean :70.03 Mean :63.04 Mean :5766
## 3rd Qu.:111.00 3rd Qu.:88.50 3rd Qu.:78.50 3rd Qu.:6483
## Max. :280.00 Max. :255.00 Max. :185.00 Max. :46920
##
## observaciones
## :128
## Rebrote: 2
## Seco :1
##
##
##
```

O de solo una variable (por ejemplo, especie) para ver cómo se distribuyen los valores (frecuencias):

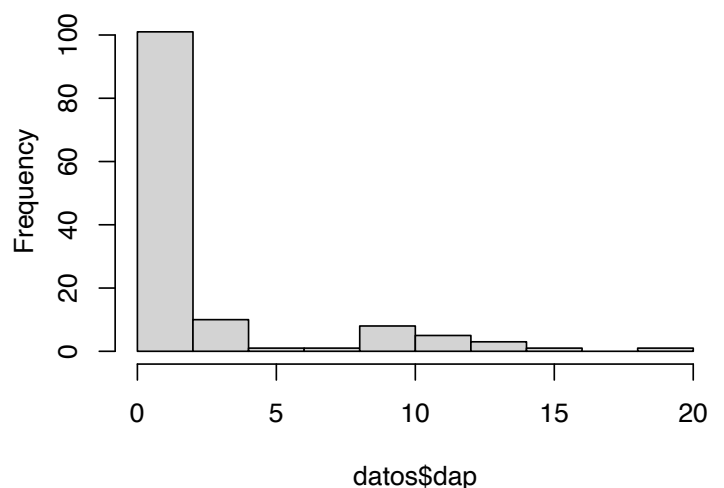
```
summary(datos$especie)
## Acaena elongat Baccharis rupicola Baccharis tricuneata
## 1 1 27
## Clethra revoluta Diplostephium schultzi Escallonia myrtilloides
## 3 1 29
## Espeletia hartwegiana Gaiadendron punctatum Gynoxys tolimensis
## 18 6 1
## Hesperomeles obtusifolia Hypericum laricifolium Hypericum strictum
## 13 17 1
## Lupinus bogotensis Pentacalia vaccinioides Pernettya prostrata
## 1 11 1
```

## Histogramas de variables numéricas

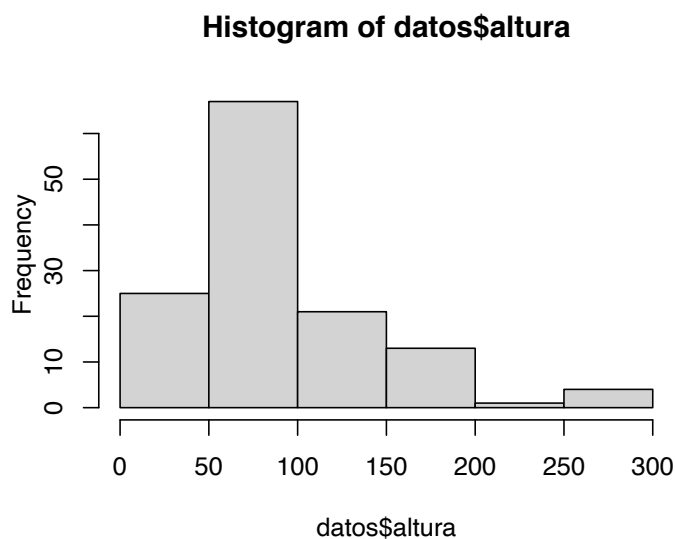
También se pueden buscar valores atípicos (outliers) y otros errores en los datos numéricos:

`hist(datos$dap)` #Histograma para variable DAP (diámetro a la altura del pecho)

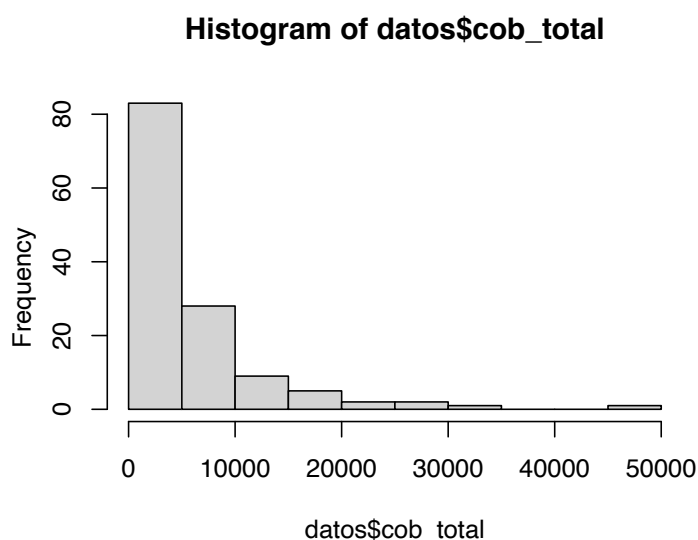
**Histogram of datos\$dap**



```
hist(datos$altura) #Histograma para variable altura
```



```
hist(datos$cob_total) #Histograma para variable cobertura
```



## Análisis de diversidad (a nivel de transecto)

Para este análisis, se debe crear una matriz especial (llamada en este caso “especies2”) para trabajar con la función “diversity” del paquete vegan. Esta matriz especial solo debe contener las especies como columnas y los sitios como filas. El cuerpo de la matriz son las abundancias de las especies en cada sitio de muestreo (transecto). No puede haber espacios en blanco y los nombres o códigos de los sitios de

muestreo deben ir como nombres de filas y no como una columna adicional.

```
especies <- as.data.frame(table(datos$especie, datos$transecto)) #Se
crea una tabla de frecuencias
especies2 <- spread(especies, Var1, Freq) #La tabla se cambia de
formato para lograr la matriz
transectos <- (especies2$Var2) #La variable "Var2" corresponde a
los transectos
row.names(especies2) <- transectos #Se crean los nombres de las filas
especies2$Var2 <- NULL #Se elimina la variable "Var2" para
organizar la matriz en el formato requerido
```

Se debe crear una tabla para almacenar los resultados del análisis de diversidad: índices de diversidad de Shannon y Simpson, así como número de especies (riqueza) e individuos (abundancia) de cada transecto:

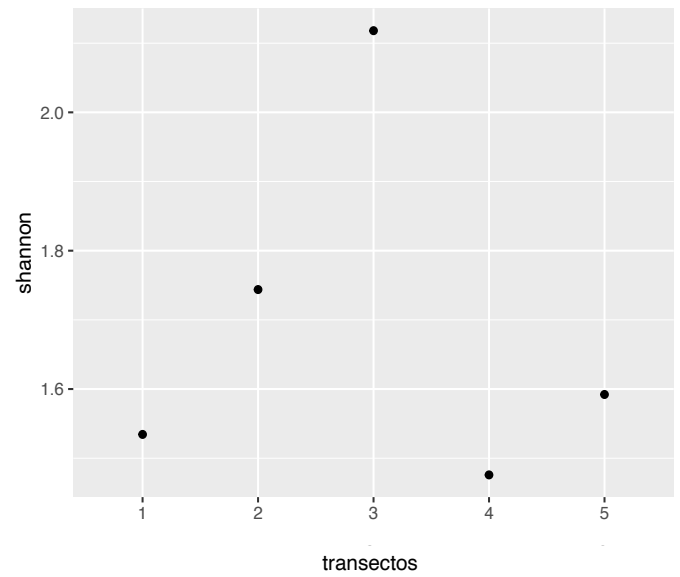
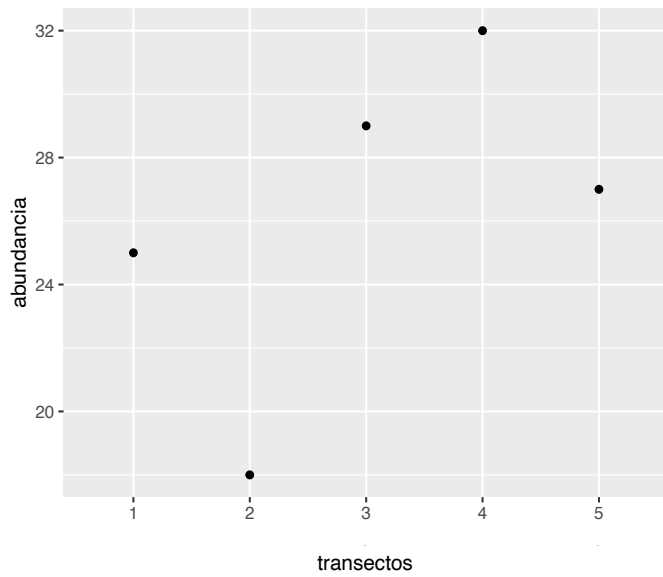
```
indices <- as.data.frame(transectos) #Crea la tabla con los nombres
de los transectos en la primera columna
indices$shannon <- diversity(especies2) #Calcula el índice de
Shannon
indices$simpson <- diversity(especies2, index = "simpson") #Calcula
el índice de Simpson
indices$riqueza <- specnumber(especies2) #Calcula el número de
especies
indices$abundancia <- rowSums(especies2) #Calcula el número de
individuos
```

```
print(indices)
```

##	transectos	shannon	simpson	riqueza	abundancia
## 1	1	1.534393	0.7520000	6	25
## 2	2	1.743812	0.7962963	7	18
## 3	3	2.118085	0.8466112	11	29
## 4	4	1.475873	0.7011719	7	32
## 5	5	1.592119	0.7709191	6	27

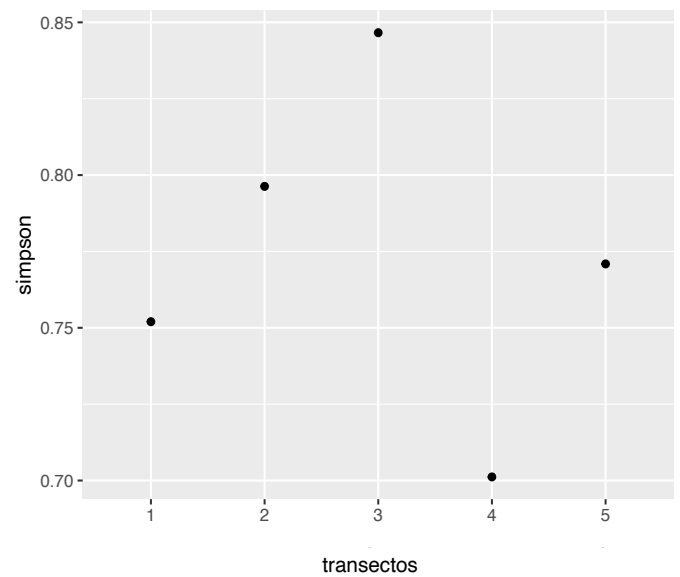
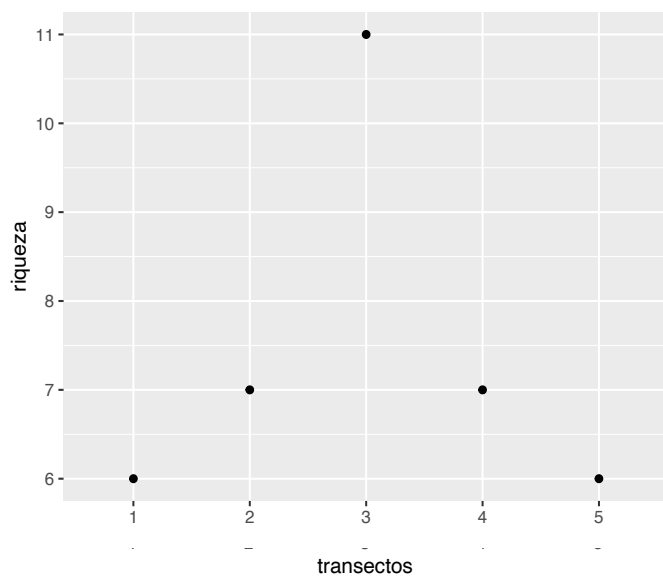
Los resultados de estos análisis de diversidad se pueden mostrar de forma gráfica de la siguiente manera:

```
ggplot(indices, aes(x=transectos, y=abundancia)) +
geom_point()
```



```
ggplot(indices, aes(x=transectos, y=riqueza)) +  
geom_point()
```

```
ggplot(indices, aes(x=transectos, y=simpson)) +  
geom_point()
```



```
ggplot(indices, aes(x=transectos, y=shannon)) +  
geom_point()
```

### Análisis de estructura vegetal (a nivel de transecto)

Los análisis de los datos de estructura vegetal recopilados mediante el monitoreo a las acciones de restauración, se pueden realizar de la siguiente manera:

```
estructura <- datos[c(12,17,18,19,20,23)] #Seleccionar las variables de estructura vegetal
```

```
estructura2 <- melt(estructura, id=c("transecto","especie")) #Cambiar de formato ancho a formato largo
```

```
transecto <- cast(estructura2, transecto ~ variable, mean) #Calcular el promedio por cada cobertura
```

```
print(transecto)
```

##	transecto	cap	dap	altura	cob_tota
## 1	1	13.796480	1.866800	77.76000	4334.640
## 2	2	15.691278	4.227222	90.63889	3859.833
## 3	3	9.311724	2.065517	78.20690	5361.034
## 4	4	14.105469	3.510625	110.96875	8411.719
## 5	5	18.566704	3.002963	107.51852	5659.000

```
especie <- cast(estructura2, especie ~ variable, mean) #Calcular promedio por cada especie
```

```
print(especie)
```

##	especie	cap	dap	altura	cob_tota
## 1	Acaena elongat	3.768000	1.200000	80.00000	11845.000
## 2	Baccharis rupicola	3.140000	1.000000	91.00000	2025.000
## 3	Baccharis tricuneata	6.896370	1.266296	63.14815	1830.222
## 4	Clethra revoluta	7.065000	2.250000	149.66667	10174.000
## 5	Diplostephium schultzii	4.710000	1.500000	43.00000	667.000
## 6	Escaellonia myrtilloides	21.069897	1.611379	77.03448	9828.172
## 7	Espeletia hartwegiana	32.533889	10.361111	175.86111	4443.278
## 8	Gaidendron punctatum	4.448333	1.416667	39.33333	260.500
## 9	Gynoxys tolimensis	5.024000	1.600000	80.00000	627.000
## 10	Hesperomeles obtusifolia	5.579538	1.776923	88.92308	10813.538
## 11	Hypericum laricifolium	6.409294	1.395294	87.11765	3666.412
## 12	Hypericum strictum	3.140000	1.000000	80.00000	2021.000
## 13	Lupinus bogotensis	4.710000	1.500000	116.00000	3672.000
## 14	Pentacalia vaccinioides	19.054091	3.417273	117.72727	7598.364
## 15	Pernettya prostrata	3.768000	1.200000	86.00000	1440.000

```
cob_total <- summarySE(datos, measurevar="cob_total",  
groupvars=c("transecto", "especie"),
```

```
na.rm=T, conf.interval= 0.95) #La información de una sola variable de estructura se puede resumir según varios criterios (groupvars)
```

```
## Warning in qt(conf.interval/2 + 0.5, datac$N - 1): NaNs produce
```

## Convertir variables de fecha al formato adecuado

Si se requiere trabajar con fechas en algún análisis específico, es necesario convertir la variable a un formato de fecha específico. En nuestro ejemplo, la columna fecha está guardada como una variable categórica (factor).

```
class(datos$fecha)
```

```
## [1] "factor"
```

Para convertir la variable en una variable adecuada, se puede utilizar la función "as.Date" como en el siguiente ejemplo:

```
datos$fecha_nueva <- as.Date(datos$fecha, format = "%d/%m/%Y")
```

```
class(datos$fecha_nueva) #Ahora está guardada como una variable de fecha
```

```
## [1] "Date"
```

## Recuadro 1

```
#Ejemplo para cambiar de formato ancho a largo
```

```
datos2 <- datos[c(14,17,18,19,20,23)] #Selección de ejemplo para cambiar de formato ancho a largo
```

```
datos2 <- datos[c(14,17,18,19,20,23)] #Seleccionar variables a utilizar  
datos3 <- melt(datos2, id=c("cobertura","especie")) #Cambio de formato ancho a formato largo
```

```
#Promedio de variables de estructura por cobertura
```

```
cob_avg <- cast(datos3, cobertura ~ variable, mean)
```

```
print(cob_avg)
```

##	cobertura	cap	dap	altura	cob_tota
## 1	Arbustal-Pajonal	14.637633	1.523667	86.43333	7778.233
## 2	Frailejónal-Pajona	18.621732	5.544146	118.89024	4258.707
## 3	Pajonal	17.043250	2.070000	67.50000	5415.062
## 4	Pastos Arbolados	24.335000	1.345000	74.16667	2779.667
## 5	Pastos Limpios	6.019711	1.628158	86.97368	6421.263

```
#Promedio por especie
```

```
spp_avg <- cast(datos3, especie ~ variable, mean)
```

```
print(spp_avg)
```

##	especie	cap	dap	altura	cob_tota
## 1	<i>Acaena elongat</i>	3.768000	1.200000	80.00000	11845.000
## 2	<i>Baccharis rupicola</i>	3.140000	1.000000	91.00000	2025.000
## 3	<i>Baccharis tricuneata</i>	6.896370	1.266296	63.14815	1830.222
## 4	<i>Clethra revoluta</i>	7.065000	2.250000	149.66667	10174.000
## 5	<i>Diplostephium schultzi</i>	4.710000	1.500000	43.00000	667.000
## 6	<i>Escallonia myrtilloides</i>	21.069897	1.611379	77.03448	9828.172
## 7	<i>Espeletia hartwegiana</i>	32.533889	10.361111	175.86111	4443.278
## 8	<i>Gaiadendron punctatum</i>	4.448333	1.416667	39.33333	260.500
## 9	<i>Gynoxys tolimensis</i>	5.024000	1.600000	80.00000	627.000
## 10	<i>Hesperomeles obtusifolia</i>	5.579538	1.776923	88.92308	10813.538
## 11	<i>Hypericum laricifolium</i>	6.409294	1.395294	87.11765	3666.412
## 12	<i>Hypericum strictum</i>	3.140000	1.000000	80.00000	2021.000
## 13	<i>Lupinus bogotensis</i>	4.710000	1.500000	116.00000	3672.000
## 14	<i>Pentacalia vaccinioides</i>	19.054091	3.417273	117.72727	7598.364
## 15	<i>Pernettya prostrata</i>	3.768000	1.200000	86.00000	1440.000





Definir el éxito de un proceso de restauración ecológica ha sido un tema de amplia discusión en la última década y los aportes a este campo han sido múltiples; sin embargo, aún quedan muchos vacíos y son pocos los documentos específicos capaces de guiar el monitoreo. En esta vía, la evaluación y seguimiento de un proceso de restauración ecológica resulta indispensable para garantizar que el nivel o estado esperado se pueda establecer y para identificar que las inversiones y acciones realizadas sean eficientes y efectivas. El monitoreo también permite conocer las necesidades de otros proyectos similares, convirtiéndose en una referencia para futuros procesos.

La implementación de la fase de monitoreo en un proyecto de restauración ecológica es indispensable para evidenciar los beneficios y el impacto de la restauración en el sistema biofísico, así como para que los gestores ambientales, planificadores, autoridades ambientales, tomadores de decisiones, entes de control, entre otros, cuenten con las bases necesarias para acoger la restauración como una alternativa viable dada la problemática ambiental actual. Este libro propone lineamientos específicos para el monitoreo de la restauración ecológica en el páramo andino y busca aportar a la construcción de procesos de restauración ecológica exitosos.



PÁRAMOS



Unión Europea