



Informe mensual de actividades

Anexo WP1.3.5 Estudio sobre el manejo y control
de deslizamientos con soluciones basadas en la
naturaleza

Enero de 2026



Contrato

CCT 261 de 2025

Contenido

WP1.3.5 Estudio sobre el manejo y control de deslizamientos con soluciones basadas en la naturaleza (SbN)	2
Alcance y naturaleza del Manual	2
Sección 1 Introducción y contexto de la problemática	5
Introducción	5
Objetivo general	6
Objetivos específicos	6
Contexto de los movimientos en masa en el trópico	6
Movimientos en masa más comunes en el Valle de Aburrá	7
Sección 2 Estado del arte: Contexto normativo y bibliográfico de las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN)	8
Marco de procesos físicos	8
Movimientos en masa	8
Tipos de movimientos en masa	8
Erosión	15
Erosionabilidad	17
Marco de Soluciones basadas en la Naturaleza	18
Recuperación de áreas afectadas por movimientos en masa mediante soluciones basadas en la naturaleza (SbN)	18
Tipos de soluciones basadas en la naturaleza	19
Bioingeniería del suelo	19
Soluciones híbridas	20
Marco geotécnico y estructural	21
Técnicas de bioingeniería	21
Marco ecológico y biológico	25
Mecanismos de recuperación de movimientos en masa basados en la naturaleza	25
Clasificación funcional de especies vegetales	28
Interacción suelo-vegetación-microbiota	28
Papel de la sucesión vegetal en la recuperación de laderas	29
Concepto de zonas de vida y su uso para la selección de especies	29
Sección 3.1 Análisis de la implementación	31
Metodología para la clasificación por zonas de vida	31
Variables y fuentes de información	31
Procedimiento	32
Avances, análisis y resultados en la delimitación de zonas de vida	34
Método de Holdridge	34
Método alternativo: clasificación basada en altitud, temperatura y precipitación	37
Metodología para la caracterización de la cobertura vegetal y suelos (Caracterización ecológica	40

Avances, análisis y resultados en visitas preliminares a sitios de interés para la caracterización ecológica	44
Recorrido 1: Caldas La Estrella y San Antonio de Prado	44
Recorrido 2: Bello y Medellín	46
Recorrido 3: Medellín	47
Avance en Análisis multitemporal de la cobertura vegetal a partir de imágenes.	47
La Palma	48
Pueblo Viejo	49
La Bermejala	49
La Gabriela	50
Las Playas	51
Palmitas	52
Salinas	53
Avances en la selección de puntos viables y toma de muestras	54
Sección 3.2 Análisis de la implementación	58
Desarrollo de criterios para la selección de sitios adecuados para la aplicación de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) y/o soluciones híbridas.	58
Descripción de los criterios de selección	58
Método para calcular la puntuación final de cada sitio	62
Avances en Metodología para la selección de técnicas de bioingeniería	62
Anexos Fichas asociadas a recorridos preliminares	66
Anexos Fichas asociadas a salidas de campo para toma de muestras	77
Referencias	102

WP1

Observatorio de amenazas y riesgos

Este WP tiene como objetivo generar conocimiento que sirva como insumo para la alerta temprana y la toma de decisiones a partir del monitoreo, análisis, modelación y generación de alarmas y alertas sobre múltiples componentes físicos, a través de actividades de investigación y operaciones que permitan avanzar en la caracterización, entendimiento, seguimiento y pronóstico de múltiples amenazas ambientales y evaluación de riesgos asociados.

Se avanzará en la consolidación del observatorio de múltiples amenazas, el cual es fundamental dada la variedad de amenazas que pueden impactar la sociedad y el territorio. Para este fin, el WP1 está constituido por tres grandes grupos de actividades: WP1.1 - Caracterización y monitoreo de variables y procesos asociados con las amenazas. El grupo WP1.2 - Modelación y pronóstico de la calidad del aire, las lluvias y otros fenómenos asociados con las amenazas. Por último, el grupo WP1.3 - Información para la gestión y herramientas operacionales que permitan la consolidación del observatorio de amenazas y riesgos en su primera fase, para el apoyo a emergencias, se enfoca en la aplicación (transferencia) de esta investigación a las operaciones para generar alertas y apoyar la gestión, a través de la consolidación de un observatorio multi-amenaza.

WP1.3.5

Estudio sobre el manejo y control de deslizamientos con soluciones basadas en la naturaleza (SbN)

Con el fin de ampliar la comprensión de las actividades desarrolladas, asegurar la coherencia entre la información reportada en este documento y el objetivo final de la construcción del manual, y facilitar un seguimiento más detallado del proceso, esta sección inicial donde se declara el alcance y la naturaleza del manual se propone como un instrumento de seguimiento permanente.

Alcance y naturaleza del Manual

El Manual de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) para el manejo y control de movimientos en masa se concibe como un instrumento técnico–metodológico de carácter orientador, cuyo alcance se enmarca en la formulación de lineamientos, criterios y recomendaciones para la identificación, selección y aplicación de SbN en escenarios de inestabilidad de laderas. Al igual que los manuales de diseño adoptados por entidades nacionales, este documento no corresponde a un compendio de diseños de ingeniería ni sustituye los estudios geotécnicos detallados requeridos para cada sitio, sino que establece un marco de referencia técnico que apoya la toma de decisiones en las etapas de planeación, priorización y conceptualización de intervenciones.

En este sentido, el Manual define tipologías de escenarios de movimientos en masa, clasifica alternativas de SbN aplicables de acuerdo con condiciones geomorfológicas, geotécnicas y ambientales, y propone criterios técnicos mínimos para su implementación, integración con medidas de ingeniería convencional y posterior seguimiento. Su aplicación se orienta a escalas de ladera, con énfasis en contextos de gestión del riesgo, garantizando coherencia con estándares nacionales e internacionales y promoviendo soluciones sostenibles, replicables y compatibles con las condiciones del Valle de Aburrá. En coherencia con este alcance, la Tabla 1 presenta una matriz de referencia que sintetiza la estructura general del Manual —organizada en capítulos o secciones— y orienta el seguimiento de los avances mensuales a partir de los componentes temáticos, las actividades técnicas y los productos asociados.

Tabla 1. Estructura del Manual SbN: secciones, actividades derivadas y entregables.

Sección del manual	Actividades principales por sección	Entregables por sección
Introducción y contexto de la problemática	■ Análisis de las tipologías de movimientos en masa presentes en el Valle de Aburrá. ■ Identificación de limitaciones para su análisis y caracterización.	■ Resultados del análisis de tipologías de movimientos en masa. ■ Guía para el levantamiento y registro de eventos.
Contexto normativo y bibliográfico	■ Búsqueda, revisión y análisis del marco normativo vigente. ■ Revisión de procesos físicos asociados a la inestabilidad de laderas. ■ Análisis del marco ecológico aplicable. ■ Revisión de experiencias en bioingeniería y SbN aplicadas a movimientos en masa. ■ Análisis conceptual de restauración vegetal, bioingeniería y enfoques híbridos.	■ Marco técnico y normativo de referencia para el Valle de Aburrá.
Análisis de la implementación	■ Definición de criterios técnicos, físicos y ambientales para evaluar la viabilidad de implementación de SbN. ■ Valoración cualitativa de los criterios definidos.	■ Metodología de evaluación y viabilidad mediante matriz cualitativa para SbN.
Alternativas de implementación	■ Definición de alternativas de intervención: bioingeniería, restauración vegetal y soluciones híbridas. ■ Análisis de condiciones de aplicación y restricciones técnicas por tipo de alternativa.	■ Tipologías de obra y requerimientos técnicos asociados. ■ Criterios para la selección de especies vegetales. ■ Guía para la descripción y evaluación visual de zonas de intervención.
Plan de implementación	■ Definición de procedimientos y planes de trabajo para la ejecución de las alternativas seleccionadas.	■ Recomendaciones técnicas para el sembrado. ■ Procedimientos constructivos por tipo de solución basada en la naturaleza.

Sección del manual	Actividades principales por sección	Entregables por sección
Herramientas para la cuantificación de la implementación	■ Estructuración del plan de trabajo mediante actividades y subactividades asociadas a la implementación.	■ Estructura base para la elaboración de un Análisis de Precios Unitarios (APU) generalizado.

Con base en este marco conceptual y estructural, y en coherencia con los componentes y productos definidos como entregables principales del Manual, mes a mes se irán registrando y complementando las secciones del documento, las cuales reflejan el desarrollo de las actividades técnicas adelantadas y su contribución al avance progresivo del mismo.

Sección 1

Introducción y contexto de la problemática

En esta sección del documento se consolidan los análisis asociados a las tipologías de movimientos en masa presentes en el Valle de Aburrá, así como la identificación de las principales limitaciones para su análisis y caracterización. Los resultados aquí consignados constituyen el insumo técnico para la definición de criterios, lineamientos y herramientas orientadas al levantamiento, registro y análisis de eventos, los cuales serán desarrollados y profundizados en las secciones posteriores del manual. Además, esta sección constituye la motivación para la construcción de esta herramienta.

Introducción

El presente documento constituye un anexo técnico al Manual de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) para el manejo de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, y tiene como propósito recopilar, analizar y sistematizar la información científica, técnica y contextual que sustenta los lineamientos y criterios metodológicos que serán incorporados en el manual principal.

El Valle de Aburrá se caracteriza por un relieve montañoso y escarpado, dominado por laderas empinadas, suelos residuales, depósitos coluviales y formaciones rocosas fracturadas y meteorizadas. Estas condiciones geológicas y geomorfológicas, combinadas con una alta densidad poblacional y procesos acelerados de urbanización, han incrementado la exposición y vulnerabilidad frente a los movimientos en masa.

En los últimos años, las entidades gubernamentales y de gestión del riesgo han fortalecido su compromiso con la reducción del riesgo de desastres, en coherencia con los marcos internacionales como el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015–2030, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y el Acuerdo de París sobre cambio climático. Este alineamiento global reconoce la necesidad de integrar la sostenibilidad ambiental y la gestión del riesgo, especialmente en territorios donde los procesos naturales se ven amplificados por el cambio climático y por la presión antrópica sobre las laderas.

El Valle de Aburrá, en particular, presenta una fuerte dependencia de la dinámica climática regional, marcada por un régimen de precipitación bimodal y por la influencia de fenómenos como La Niña, asociados a incrementos significativos en la lluvia. La variabilidad en la intensidad y distribución temporal de las precipitaciones genera tanto periodos secos prolongados como eventos extremos de lluvia en cortos intervalos de tiempo, condiciones que actúan como detonantes de deslizamientos, avenidas torrenciales e

inundaciones. Cuando estos procesos se superponen con laderas urbanizadas, ecosistemas degradados y baja resiliencia comunitaria, las consecuencias se amplifican notablemente.

Dentro del conjunto de amenazas presentes en el Valle de Aburrá, los movimientos en masa destacan como uno de los fenómenos más recurrentes y de mayor impacto, ocasionando pérdidas humanas, daños materiales e interrupciones en la infraestructura crítica y en las redes de movilidad. Estas afectaciones son especialmente graves en zonas urbanas densamente pobladas y en sectores donde la expansión urbana ha ocupado áreas con alta susceptibilidad a la inestabilidad del terreno.

En este contexto, el documento anexo se plantea como un instrumento de análisis, integración y respaldo técnico para el desarrollo del Manual SbN, abordando la comprensión de los procesos físicos, ecológicos y socioambientales asociados a los movimientos en masa, así como las metodologías empleadas para la caracterización, evaluación y selección de soluciones basadas en la naturaleza aplicables al territorio metropolitano.

Objetivo general

Establecer los fundamentos técnicos, ecológicos y metodológicos que sustentan la formulación del Manual de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) para la gestión de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, asegurando la trazabilidad del proceso de investigación, metodologías, análisis e integración de resultados.

Objetivos específicos

- I. Analizar los procesos físicos y ecológicos asociados a los movimientos en masa en el Valle de Aburrá, considerando su dinámica, causas y distribución espacial.
- II. Caracterizar la composición vegetal y microbiológica en sitios representativos de distintos estadios de sucesión, identificando especies pioneras, secundarias y tardías con potencial para restauración.
- III. Evaluar la relación entre las propiedades del suelo, la cobertura vegetal y la actividad microbiana en laderas afectadas por movimientos en masa.
- IV. Clasificar las especies vegetales en función de las zonas de vida del Valle de Aburrá, según el sistema bioclimático de Holdridge (1967), para orientar su selección en intervenciones de restauración.
- V. Integrar los resultados ecológicos y biofísicos en una metodología que permita definir criterios de selección y aplicación de medidas SbN adaptadas al contexto local.
- VI. Desarrollar una guía base para la elaboración de presupuestos, adaptada a las características técnicas de la solución basada en la naturaleza seleccionada y a las condiciones económicas del contexto de intervención.

Contexto de los movimientos en masa en el trópico

Las regiones montañosas tropicales se consideran zonas críticas de deslizamientos de tierra, tanto por su vulnerabilidad física como por la exposición humana creciente. Sin embargo, el conocimiento sobre los procesos de movimientos en masa en estos entornos sigue siendo limitado. Gran parte de la información

Distribución por tipo de movimiento en masa
(Inventario SIATA 2010-2025)

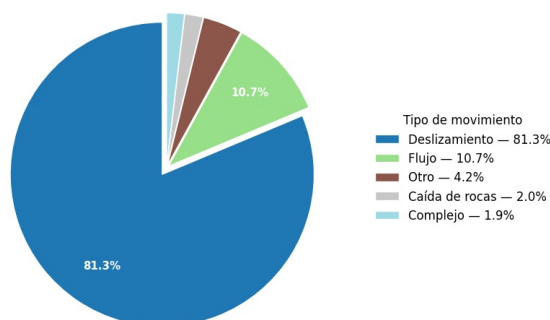


Figura 1. Distribución por tipo de movimiento en masa (inventario SIATA 2010 - 2025)

disponible proviene de modelos de susceptibilidad a escala continental o global, que no capturan las particularidades locales como la litología, la dinámica climática o el uso del suelo.

En los trópicos, la combinación de fuertes pendientes, suelos meteorizados, altas tasas de precipitación y una rápida degradación ambiental causada por el ser humano genera un escenario propicio para los deslizamientos. La presión demográfica y los cambios en el uso y cobertura del suelo son factores clave en la frecuencia e intensidad creciente de estos eventos, sobre todo en áreas rurales.

La deforestación, en particular, juega un papel central: la pérdida de raíces disminuye la cohesión del regolito y altera los patrones de drenaje, lo que favorece principalmente la aparición de deslizamientos superficiales. Además, actividades como la minería artesanal y la construcción de vías agravan la inestabilidad de laderas, dependiendo de su intensidad, temporalidad y del contexto geológico y topográfico en el que se desarrollan.

Movimientos en masa más comunes en el Valle de Aburrá

Los inventarios históricos han permitido dimensionar esta problemática: Aristizábal (2008) reporta, para el período 1880–2007, un total de 6.750 eventos en la región, de los cuales el 35 % corresponden a movimientos en masa. Aunque las inundaciones constituyen el fenómeno más recurrente, los deslizamientos han sido responsables de la mayor proporción de víctimas fatales (77 %), con eventos de gran impacto como Rosellón (1927), Media Luna (1954), Santo Domingo Savio (1974), Villatina (1987) y El Barro (2005).

De acuerdo con el *Inventario de Movimientos en Masa de SIATA (2010–2025)*, los procesos más comunes en el Valle de Aburrá corresponden a los **deslizamientos** (81.3 %), que incluyen modalidades rotacionales y traslacionales, seguidos por los **flujos de lodos y avenidas torrenciales** (10.7 %). En menor proporción se presentan eventos clasificados como caídas de rocas, movimientos complejos y otros tipos de inestabilidad (ver Figura 10).

El modo de falla de estos fenómenos depende de factores como el tipo y grado de meteorización del material, la presencia de planos de debilidad, la inclinación de las laderas y las condiciones hidrometeorológicas. En muchos casos, los procesos se originan por la combinación de mecanismos de erosión, inestabilidad del suelo y saturación hídrica, lo que da lugar a fallas complejas.

Sección 2

Estado del arte: Contexto normativo y bibliográfico de las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN)

En esta sección del documento se consignan los aspectos relacionados con la búsqueda, revisión y análisis de herramientas académicas, normativas y bibliográficas requeridas para el entendimiento de las Soluciones Basadas en la Naturaleza, las cuales servirán como insumo para una posterior depuración y adaptación de la información a su aplicación en un contexto local, como el Valle de Aburrá.

Marco de procesos físicos

Movimientos en masa

El término movimiento en masa hace referencia al desplazamiento pendiente abajo de materiales como rocas, detritos o suelos, provocado por la fuerza de la gravedad (Cruden and Varnes, 1996). Estos procesos se manifiestan en formas diversas, como deformaciones del terreno, movimientos viscosos u otros tipos de desplazamientos de masas, y pueden ocurrir en cualquier parte del planeta.

Su análisis y monitoreo resultan fundamentales debido al alto riesgo que representan, ya que pueden causar pérdidas humanas y económicas significativas, en especial en el contexto de países como Colombia, donde las temporadas de lluvias intensas, especialmente asociadas al fenómeno de La Niña, generan o reactivan deslizamientos, desprendimientos y flujos que afectan a numerosas comunidades (Montero Olarte, 2017).

Tipos de movimientos en masa

Según la clasificación propuesta por Cruden y Varnes en 1996, los movimientos en masa se dividen en cinco tipos básicos; caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral y flujo, retomando y ampliando la clasificación de Varnes (1978). Esta clasificación considera no solo el tipo de desplazamiento, sino también

aspectos como el contenido de agua, la velocidad del movimiento, su distribución y estilo. A continuación, se describen los movimientos definidos en este sistema de clasificación:

Caída

La caída es un tipo de movimiento en masa que consiste en la separación de una masa de roca o suelo desde un talud empinado, a lo largo de una superficie que puede o no presentar desplazamiento por cortante. Una vez que ocurre el desprendimiento, el material descende a través del aire, principalmente en caída libre, aunque también puede rebotar o rodar. Suele estar influenciada por la geometría de las discontinuidades y puede ser extremadamente rápida.



Figura 2. Esquema de caída de rocas.

Volcamiento

El volcamiento es un tipo de movimiento en masa que consiste en la rotación hacia adelante de una masa de roca o suelo en una ladera, alrededor de un eje o pivote situado por debajo del centro de gravedad de dicha masa (Cruden and Varnes, 1996). Este tipo de movimiento se presenta típicamente en terrenos con pendientes empinadas, donde la masa pierde estabilidad y gira frontalmente. Se reconocen tres tipos:

- **Volcamiento de bloques de roca, delimitados por discontinuidades preexistentes:** este tipo puede ser Individual, cuando un bloque reposa sobre una base inicialmente firme que es socavada o falla por cortante. O Múltiple, cuando hay interacción entre varios bloques, generando una pérdida de estabilidad progresiva desde el extremo más expuesto. Esto puede ser causado, por ejemplo, por la erosión de una corriente de agua que socava los bloques inferiores.

Se reconocen tres subtipos de volcamiento múltiple:

Volcamiento flexural: este tipo de volcamiento es común en masas rocosas que presentan sistemas de discontinuidad con fuerte buzamiento hacia el interior de la ladera, generando la formación de columnas en voladizo (tipo cantiléver). Estas columnas sufren flexión progresiva, lo que provoca

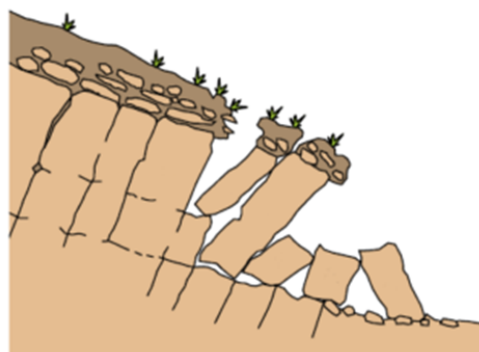


Figura 3. Esquema del volcamiento de bloques.

agrietamientos por tensión que finalmente llevan al desprendimiento de fragmentos rocosos, los cuales se acumulan al pie del talud.

Volcamiento en Chevron: se presenta principalmente en macizos rocosos con diaclasas de inclinación pronunciada hacia el interior de la ladera, característico de formaciones de rocas metamórficas como esquistos y filitas. El movimiento inicia a partir de un plano débil que actúa como bisagra, alrededor del cual se doblan los bloques, dando lugar a una deformación flexural gradual y a un volcamiento parcial.

Volcamiento flexural en bloque: en este caso, se observa una flexión pseudocontinua de columnas rocosas largas dentro de un macizo, producto del movimiento acumulado a lo largo de múltiples diaclasas transversales. Esto genera un deslizamiento distribuido en la base de la masa inestable, mientras que en el resto del cuerpo se produce una combinación de deslizamiento y volcamiento.

- **Volcamiento de bloques aislados liberados por tensión:** este tipo de desprendimiento ocurre cuando bloques individuales de roca se separan del macizo rocoso principal debido a tensiones internas. La liberación de estos bloques está facilitada por la presencia de agrietamientos por tensión en la parte superior de la ladera, que permiten que los bloques se desestabilicen y eventualmente se volteen o caigan.
- **Volcamiento de detritos:** este proceso consiste en el desprendimiento de masas tabulares de detritos desde un punto elevado, en un mecanismo de tipo retrogresivo. Estos desprendimientos pueden originarse, por ejemplo, en la corona de un deslizamiento o en el barranco de la orilla de un cauce, donde las condiciones geomorfológicas y estructurales favorecen la pérdida de estabilidad. Un caso común de volcamiento de detritos se observa en las orillas de ríos o quebradas, donde la erosión lateral debilita la base de taludes formados por material suelto o semiconsolidado, facilitando la inclinación y posterior caída del material.

Deslizamiento

Cruden y Varnes definen el deslizamiento como un tipo de movimiento en masa que consiste en el desplazamiento ladera abajo de una masa de suelo o roca, que ocurre predominantemente a lo largo de una

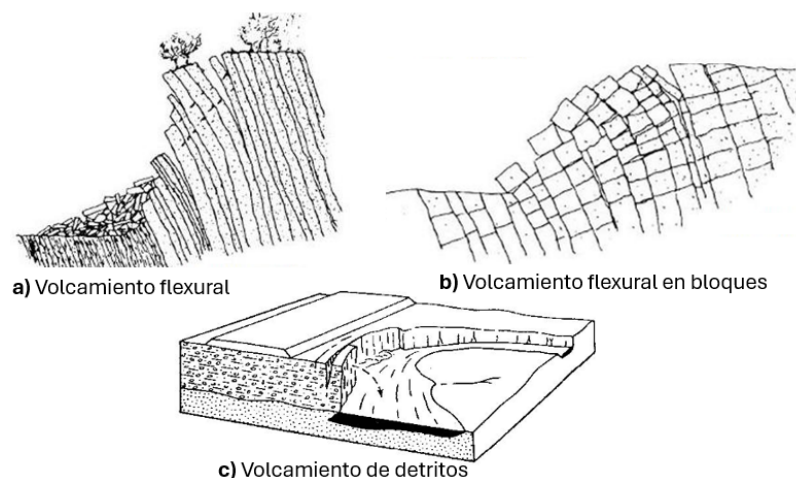


Figura 4. Tipos de volcamiento.

superficie de ruptura o a través de zonas relativamente delgadas sometidas a esfuerzos cortantes intensos. Según estos autores, la superficie de ruptura no se forma de manera simultánea a lo largo de toda la masa inestable, sino que se inicia con la aparición de agrietamientos en la parte superior de la ladera, los cuales más adelante definirán la corona del deslizamiento. En la parte inferior de la masa movilizada se forma la denominada pata del deslizamiento, la cual, en algunos casos, puede ser rebasada por el propio material desplazado.

- **Deslizamiento rotacional:** también conocido como hundimiento, ocurre cuando una masa de suelo o roca se desliza ladera abajo a lo largo de una superficie de rotura curva y cóncava. Este tipo de falla no está controlado estructuralmente y suele presentar poca deformación interna, ya que la masa rota como un bloque. El material en la parte superior se desplaza casi verticalmente, mientras que la superficie del terreno se inclina hacia el escarpe de la corona. Es un movimiento lento a moderadamente lento, debido a que el mecanismo de rotación es autoestabilizante: la fuerza de gravedad que impulsa el movimiento disminuye a medida que avanza el deslizamiento. Este tipo de deslizamiento es común tanto en roca como en suelos cohesivos.
- **Deslizamiento rotacional retrogresivo:** ocurre cuando, tras un hundimiento inicial, el terreno inestable continúa retrocediendo hacia atrás, es decir, hacia la corona. Esto se debe a que el escarpe generado por el deslizamiento original es casi vertical y no tiene soporte, lo que favorece nuevos colapsos desde su base. Este proceso se ve intensificado por la acumulación de humedad en la zona, la cual se concentra debido a la geometría del terreno. Si esta humedad persiste, la inestabilidad continúa avanzando en sentido retrógrado, hasta que el terreno forme un talud más estable y menos inclinado.
- **Deslizamiento traslacional planar:** ocurre cuando una masa de suelo o roca se desplaza a lo largo de una superficie de ruptura plana, que puede ser continua o presentar escalones. Este tipo de deslizamiento, especialmente en roca, suele estar controlado por estructuras geológicas, como planos de estratificación o fracturas. En la corona, es común la presencia de una grieta de tensión que separa la masa inestable del terreno estable. A diferencia del deslizamiento rotacional, no es autoestabilizante, por lo que puede alcanzar altas velocidades, especialmente si la superficie de falla es muy inclinada y extensa. En estos casos, la masa puede fragmentarse y evolucionar hacia un flujo de detritos, particularmente cuando la ruptura sigue una discontinuidad paralela a la ladera.

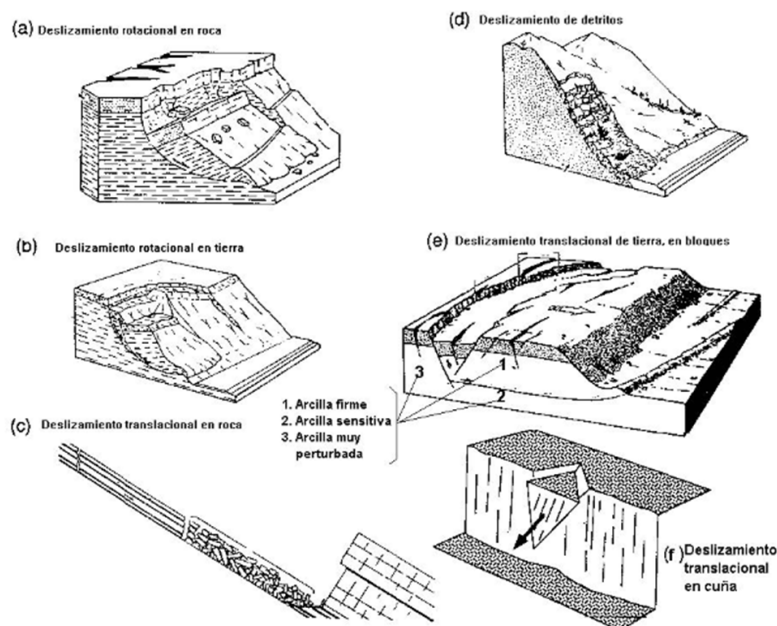


Figura 5. Deslizamientos rotacionales y traslacionales.

- **Deslizamiento traslacional en cuña:** es un caso especial de deslizamiento traslacional, en el que la masa se mueve a lo largo de la intersección de dos discontinuidades estructurales. Este tipo de falla suele estar controlado por la geometría y orientación de las fracturas o planos de debilidad que forman una cuña inestable dentro del macizo rocoso o del suelo.
- **Deslizamiento compuesto:** este combina características de los deslizamientos rotacionales y traslacionales. La superficie de ruptura comienza con un escarpe principal muy inclinado, que se va suavizando en profundidad, hasta terminar en una sección casi plana. En algunos casos, la pata del deslizamiento puede inclinarse en sentido contrario al movimiento, y en la zona de la corona pueden formarse bloques hundidos en graben.

Flujos

Según Cruden and Varnes (1996), un flujo es un movimiento en masa espacialmente continuo, con superficies de corte efímeras y poco definidas, donde el material se desplaza con un comportamiento similar al de un líquido viscoso. Su base puede corresponder a una superficie de cizallamiento o a una zona de deformación distribuida. Los flujos abarcan una variedad de tipos, desde lentos —como los flujos de tierra o de loess— hasta rápidos, como los flujos secos de arena.

Existe una transición progresiva entre deslizamiento y flujo, influida por el contenido de agua, la pendiente y la pérdida de cohesión del material. Dentro de los flujos, se distingue un subconjunto denominado flujos canalizados, caracterizados por concentrarse en cauces naturales o hondonadas, principalmente durante lluvias intensas. Estos incluyen flujos de detritos, avalanchas de detritos y torrentes de bloques. Suelen tener alta densidad (más del 80% de sólidos), capacidad de arrastre de bloques grandes y vegetación, y pueden avanzar en pulsos intermitentes, generando eventos conocidos en Colombia como avenidas torrenciales.

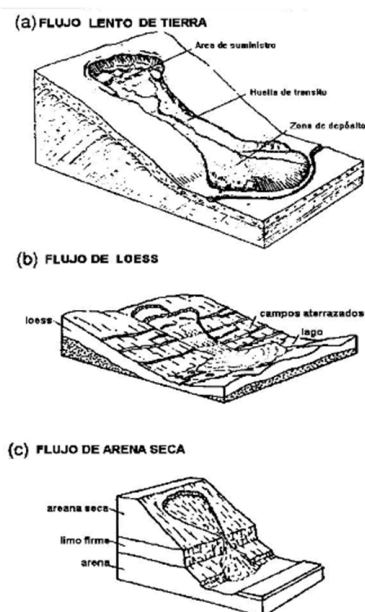


Figura 6. Ejemplos de flujos: a) lento de tierra, b) de Loess, y c) de arena seca.

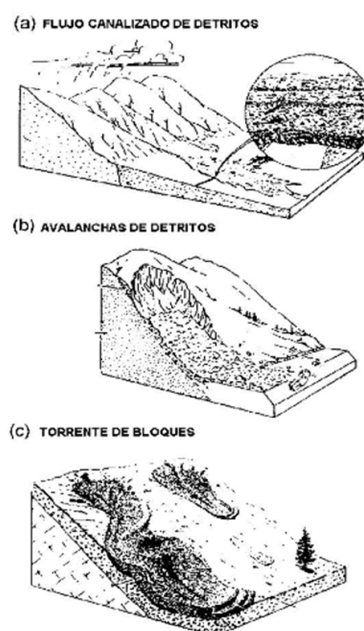


Figura 7. Flujos canalizados: a) de detritos, b) avalancha de detritos, y c) torrente de bloques.

Propagación lateral

La propagación lateral es un proceso en el que una masa de suelo cohesivo o roca blanda experimenta una extensión o dilatación lateral, acompañada de una subsidencia general del material fracturado que se encuentra sobre ella. A diferencia de otros movimientos en masa, en este caso no se forma una superficie de falla bien definida. El material blando puede extruirse lateralmente, especialmente si es susceptible a procesos como la licuación o el flujo plástico. Se reconocen dos formas principales:

- **Propagación lateral en bloque:** ocurre cuando una masa rocosa subhorizontal cubre un material más blando. La roca se fragmenta en bloques grandes, y el material blando es expulsado a presión a través de las fracturas. Es un movimiento generalmente muy lento.
- **Propagación lateral por licuación:** se da en suelos blandos y húmedos (como arcillas sensitivas o limos), cubiertos por materiales más firmes. Ante una perturbación que destruye la estructura del suelo (como un sismo), el material pierde resistencia, se licúa o fluye plásticamente, generando un movimiento más rápido que en el caso anterior.

Creep

El creep es un tipo de movimiento extremadamente lento del terreno, que implica la deformación progresiva de materiales inconsolidados (como suelos y regolito) bajo esfuerzo constante, sin una superficie de falla definida. Este fenómeno afecta principalmente la parte superficial de las laderas, especialmente en materiales como saprolitos, suelos residuales, suelos volcánicos, coluviones arcillosos y rocas lodosas

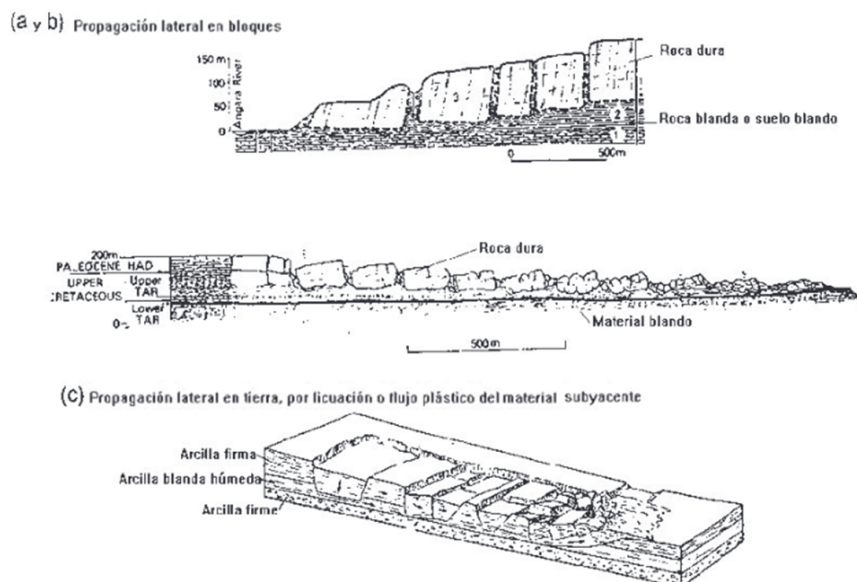


Figura 8. Casos de propagación lateral

degradadas. En Colombia, es frecuente en terrenos intervenidos o deforestados, donde se han perdido las raíces que estabilizaban la capa superior del suelo. Se reconocen tres tipos principales de creep:

- **Creep estacional de suelos:** ocurre en zonas sometidas a ciclos de humedecimiento-secado o congelamiento-deshielo, donde las partículas del suelo se expanden y contraen repetidamente. Este proceso genera un movimiento progresivo y superficial hacia la pendiente, sin que se formen superficies de falla.
- **Creep continuo de suelos:** según Terzaghi (1950), el creep continuo es un movimiento muy lento y sostenido del terreno que ocurre por debajo de la capa superficial donde se presenta el creep estacional. Aunque tampoco tiene una superficie de falla definida, se genera una zona de desgarre por cortante que separa el material en movimiento del material estacionario a mayor profundidad. De acuerdo con Bloom (1998), el terreno se desplaza en capas sucesivas, donde cada una es empujada por el movimiento de la capa inferior, generando un efecto acumulativo. La velocidad de desplazamiento es máxima en la superficie y disminuye exponencialmente con la profundidad.
- **Solifluxión:** es un tipo de flujo viscoso lento que afecta material saturado por deshielo en regiones frías (como páramos). Se produce cuando el suelo superficial se congela en invierno, impidiendo el drenaje, y posteriormente se satura y se moviliza durante el deshielo en primavera y verano. Se diferencia del creep por tener una velocidad ligeramente mayor y por la formación de lóbulos morfológicos en el terreno. En Colombia, ocurre principalmente en zonas de páramo.
- **Creep de roca:** este proceso implica la curvatura lenta y permanente de estratos rocosos en laderas, favorecido por patrones estructurales como el rumbo paralelo a la ladera y buzamientos inclinados. Afecta especialmente a estratos delgados en formaciones sedimentarias, donde la deformación progresiva genera una curvatura visible en los afloramientos rocosos.

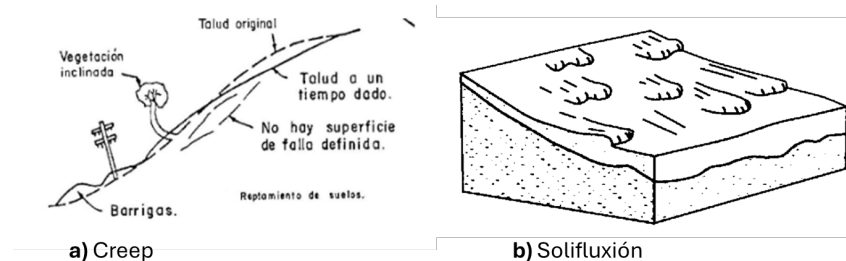


Figura 9. Esquema de creep y solifluxión

Erosión

La erosión es un proceso que involucra la remoción, el desplazamiento y la acumulación posterior de materiales del suelo o de la roca, como resultado de la acción de un fluido en movimiento. Este fenómeno puede ser provocado tanto por el agua como por el viento. Desde el punto de vista mecánico, la erosión se desarrolla a través de tres etapas fundamentales: el desprendimiento de las partículas, su transporte y, finalmente, su depósito o sedimentación (Suárez, 2001).

De acuerdo con Ayres (1960, como se citó en Suárez, 2001), la erosión del suelo se ve influenciada principalmente por cuatro variables clave, cuya interacción determina el grado de desprendimiento y transporte de materiales:

- **E:** Tasa de erosión.
- **R:** Factor que depende de la cantidad e intensidad de la lluvia.
- **G:** Factor que depende de la pendiente y la topografía del terreno.
- **S:** Factor que depende de las propiedades físicas y químicas del suelo.
- **V:** Factor que depende de las características de la cobertura vegetal.

En este contexto, las medidas de control de la erosión se orientan a reducir la fuerza tractiva del flujo y/o a incrementar la resistencia del suelo frente al proceso erosivo (Suárez, 2001).

Suárez (2001) presenta diversas formas en las que puede manifestarse la erosión del suelo, entre las cuales se destacan las siguientes:

Erosión eólica

La acción del viento genera fuerzas de fricción y levantamiento que provocan el desprendimiento, transporte y posterior deposición de las partículas del suelo.

Erosión por impacto de gotas de lluvia

Cuando las gotas de lluvia caen sobre superficies de suelo desprovistas de cobertura vegetal, el impacto puede liberar y desplazar partículas a distancias considerables.

Erosión laminar

El escurrimiento superficial del agua puede ocasionar la remoción progresiva de las capas más externas del suelo, dando lugar a un proceso de desgaste continuo y poco perceptible.

Erosión en surcos

La concentración del flujo superficial en pequeñas irregularidades del terreno favorece la profundización de canales estrechos, formando surcos generalmente dispuestos de manera semiparalela.

Erosión por afloramiento de aguas subterráneas

El ascenso del agua subterránea hacia la superficie puede generar el desprendimiento de materiales sub-superficiales, dando origen a cárcavas o cavidades.

Erosión interna

El paso del agua a través del interior del suelo puede arrastrar partículas finas, produciendo vacíos o cavernas internas que comprometen la estabilidad del terreno.

Erosión en cárcavas

La evolución de los surcos o la concentración significativa de corrientes de agua en un punto específico puede originar canales profundos y alargados denominados cárcavas, cuyo desarrollo resulta difícil de detener una vez iniciado.

Erosión en cauces de agua (lateral y vertical)

La fuerza tractiva ejercida por el flujo en ríos y corrientes provoca la ampliación lateral de los cauces, su profundización y cambios en la dinámica hidráulica.

Erosión por oleaje

El movimiento ascendente y descendente de las olas sobre superficies de suelo genera fuerzas que facilitan el desprendimiento y transporte de partículas.

Erosión o remoción en masa (deslizamientos)

Este tipo de erosión se asocia al desplazamiento de grandes volúmenes de suelo o roca, conocidos de forma general como deslizamientos. Dentro de los procesos de remoción en masa que afectan taludes y laderas, algunos están estrechamente vinculados a la erosión, entre los que se incluyen la reptación, los flujos de tierra y las avalanchas.

Erosionabilidad

La erodabilidad, también denominada erosionabilidad, se refiere al grado de vulnerabilidad de un suelo frente al desprendimiento y transporte de sus partículas como consecuencia de los procesos erosivos. En el caso de los suelos cohesivos, los sedimentos generados suelen ser movilizados principalmente en suspensión, lo que puede generar impactos relevantes en la calidad del agua. Por su parte, en los suelos no cohesivos, la respuesta ante la erosión está determinada, en gran medida, por el tamaño y la forma de las partículas que los componen.

En los suelos residuales y en las rocas sometidas a procesos de meteorización, la susceptibilidad a la erosión se encuentra estrechamente vinculada al tipo de roca madre y a sus características estructurales y mineralógicas (Suárez, 2001).

Marco de Soluciones basadas en la Naturaleza

Recuperación de áreas afectadas por movimientos en masa mediante soluciones basadas en la naturaleza (SbN)

Los movimientos en masa constituyen geoamenazas significativas que devastan ecosistemas e infraestructuras a escala global. Su frecuencia e intensidad aumentan, impulsadas por una combinación de factores climáticos, como eventos de precipitación extrema, y de presiones antrópicas, como la deforestación y la expansión urbana en zonas de riesgo (Londoño Torres, 2021).

En el Área Metropolitana del Valle de Aburrá los movimientos en masa son uno de los problemas de riesgo más comunes, siendo la ciudad de Medellín, el municipio que presenta las mayores afectaciones (Londoño Torres, 2021; Garcés Mesa, 2022). Solo entre los años 1990 y 2025 se registraron más de 300 movimientos en masa (El Colombiano, 2025).

Estos fenómenos no solo alteran drásticamente la topografía y la hidrología, sino que también afectan la cobertura vegetal, lo que desencadena un largo y complejo proceso de recuperación ecológica. En los casos de movimientos de masa de gran magnitud, la vegetación puede ser enterrada, destruida o sufrir daños irreversibles. Pueden presentarse también, daños parciales que afectan a árboles maduros y generan la fragmentación del ecosistema (Nakata et al., 2023; Arrogante-Funes et al., 2024). Por lo anterior, comprender los procesos de recuperación natural una vez ocurridos los movimientos en masa es crucial para restablecer la estabilidad física del área perturbada y la sostenibilidad de los sistemas socioecológicos (Nakata et al., 2023).

Como alternativa para gestionar los impactos asociados a los fenómenos de variabilidad climática, entre ellos los movimientos en masa, surge el concepto de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN). Las SbN son un concepto sombrilla que reconoce los sistemas socioecológicos como un entramado de relaciones, cuyas funciones son alternativas para proteger la biodiversidad y responder a los desafíos sociales (Eggermont et al., 2015b). En Colombia, se adoptó la definición dada por las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente (UNEP), que detalla: “Acciones encaminadas a proteger, conservar, restaurar, utilizar de forma sostenible y gestionar los ecosistemas terrestres, de agua dulce, costeros y marinos naturales o modificados que hacen frente a los problemas sociales, económicos y ambientales de manera eficaz y adaptativa, procurando al mismo tiempo bienestar humano, servicios ecosistémicos, resiliencia y beneficios para la biodiversidad” (United Nations Environment Programme, 2022).

La misma resolución de la UNEP indica que las SbN:

- Deben respetar las salvaguardas sociales y ambientales.
- Pueden aplicarse de acuerdo con las circunstancias locales, nacionales y regionales.
- Hacen parte de las acciones claves para alcanzar los ODS abordando retos como: la pérdida de biodiversidad, el cambio climático, la degradación del suelo, la desertificación, la seguridad alimentaria, el riesgo de desastres, la disponibilidad de agua, la erradicación de la pobreza, la desigualdad y el desempleo.
- Pueden fomentar la innovación y la investigación.

Las SbN, al ser un concepto sombrilla, integran una serie de enfoques orientados a la conservación, el uso sostenible, y la distribución justa y equitativa de los servicios ecosistémicos. Esto implica que los espacios geográficos sean analizados como unidades funcionales y que el diseño de intervenciones responda a la resolución de problemas territoriales (Departamento Nacional de Planeación (DNP), 2024).

Consideraciones Socioeconómicas en la Recuperación de Movimientos en masa

Un enfoque puramente técnico o ecológico para la recuperación de deslizamientos es incompleto y, a menudo, insostenible. Comprender la vulnerabilidad social, la percepción del riesgo y las prácticas de uso del suelo de las comunidades afectadas es esencial para diseñar planes de restauración que sean aceptados, efectivos y duraderos. La restauración no ocurre en un vacío social; es una intervención en un paisaje vivido y utilizado por personas.

La vulnerabilidad social, definida por factores como el nivel educativo, la actividad económica, la calidad de la vivienda y el acceso a servicios, influye directamente en la capacidad de una comunidad para anticipar, afrontar y recuperarse de un desastre como un deslizamiento. Un estudio en el corregimiento de San Cristóbal en Medellín, Colombia, reveló hallazgos cruciales: a pesar de conocer la amenaza, la percepción del riesgo es a menudo baja entre los residentes que no han sido directamente afectados por un evento previo. Esto sugiere que la experiencia personal es un factor determinante en la conciencia del peligro. Además, el estudio destacó que la confianza comunitaria es un pilar fundamental de la resiliencia local, donde los residentes a menudo confían más en sus vecinos para obtener ayuda y apoyo que en las instituciones oficiales. Cualquier plan de recuperación debe tener en cuenta estas dinámicas para fomentar la participación y la confianza (Londoño Torres, 2021).

Tipos de soluciones basadas en la naturaleza

De acuerdo con la definición de Eggermont et al. (2015a), las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) se clasifican en tres tipos, según el grado de intervención en los ecosistemas y la cantidad de servicios ecosistémicos y grupos de interés que se busca atender:

- **Tipo 1:** Intervención nula o mínima en los ecosistemas, con el objetivo de mantener o mejorar la provisión de múltiples servicios ecosistémicos en áreas naturales conservadas.
- **Tipo 2:** Gestión activa y sostenible de ecosistemas y paisajes (de forma extensiva o intensiva), orientada a mejorar la provisión de ciertos servicios ecosistémicos en comparación con intervenciones convencionales.
- **Tipo 3:** Intervención intensiva o creación de nuevos ecosistemas, incluyendo diseños artificiales, para generar servicios ecosistémicos en entornos altamente modificados o degradados.

Bioingeniería del suelo

La **bioingeniería del suelo** consiste en el uso de material vegetal como recurso principal para la estabilización de laderas. Este enfoque se ha aplicado en la reducción de deslizamientos superficiales y procesos erosivos en taludes y márgenes de corrientes (Lewis et al., 2001).

En este tipo de sistemas, las plantas, especialmente especies con raíces profundas como gramíneas y arbustos, desempeñan una función estructural al disminuir la erosión y favorecer la cohesión del terreno. El objetivo es restablecer la cobertura vegetal de manera que, con el tiempo, se genere un sistema autosostenible que requiera solo intervenciones mínimas de mantenimiento.

Al imitar procesos naturales y emplear materiales locales, la bioingeniería del suelo constituye una alternativa de bajo costo y bajo impacto ambiental frente a métodos convencionales de estabilización. La

selección adecuada de especies resulta fundamental, ya que la efectividad de las plantas en la protección contra la erosión y los movimientos en masa depende de sus características morfológicas y de sus propiedades mecánicas.

Entre las funciones principales de la bioingeniería se encuentran:

- **Retención de materiales:** la vegetación intercepta y detiene sedimentos o flujos superficiales.
- **Protección del suelo:** la cobertura vegetal actúa como armadura frente al impacto de la lluvia y la escorrentía.
- **Apoyo mecánico:** las plantas maduras contribuyen a reforzar la base de los taludes.
- **Refuerzo del terreno:** los sistemas radiculares incrementan la resistencia al corte de las capas superficiales.
- **Drenaje:** la vegetación ayuda a evacuar el exceso de agua, reduciendo la presión de poros.
- **Limitación de fallas:** las raíces mantienen cohesionada la capa superficial, disminuyendo la probabilidad de fallas poco profundas.

Soluciones híbridas

Las **soluciones híbridas** representan una estrategia integrada que combina infraestructuras verdes con elementos de infraestructura convencional. Este enfoque busca reducir el riesgo de desastres y fortalecer la resiliencia climática mediante la unión de la funcionalidad ecológica con la capacidad estructural de las obras de ingeniería (Browder et al., 2019).

En estos sistemas, la vegetación y los materiales naturales contribuyen a la estabilización del terreno, el control de la erosión y la gestión hídrica, mientras que los componentes mecánicos como mallas, geoceldas o gaviones proporcionan soporte estructural adicional. De esta manera, se logra una mayor durabilidad y eficiencia frente a amenazas como deslizamientos, flujos superficiales o erosión acelerada. Este tipo de enfoques se considera una evolución de las técnicas de bioingeniería del suelo (Lewis et al., 2001), ya que amplían su aplicación al incorporar materiales sintéticos o rígidos sin perder la función ecológica.

Ejemplos comunes de soluciones híbridas incluyen:

- **Mallas y vegetación:** combinación de geomallas o geoceldas rellenas de suelo vegetal y cubiertas con especies nativas, que refuerzan la estabilidad de la ladera y controlan la erosión.
- **Hidrosiembra con mallas orgánicas:** aplicación de mezclas de semillas, fertilizantes y fibras naturales sobre mantas biodegradables, que promueven el rápido establecimiento vegetal y la retención del suelo.
- **Sistemas de gaviones con cubierta vegetal:** muros o colchones de gaviones rellenos con piedras para soporte estructural, complementados con sustrato y vegetación para integración paisajística.
- **Lechos vivos:** estructuras que combinan ramas, estacas y plantas enraizadas con materiales de control de erosión, generando una matriz viva y estable.
- **Taludes reforzados con hormigón y vegetación:** aplicación de hormigón proyectado en la superficie del talud, acompañado de la siembra de especies vegetales para mejorar la cohesión y el valor estético.

Marco normativo

A nivel internacional, existen lineamientos como:

- **UNDRR (2023):** Words into Action: Nature-based Solutions for Disaster Risk Reduction.
- **Comisión Europea (2020):** EU Guidance on Integrating Nature-based Solutions for Disaster Risk Management.

En el contexto nacional, es importante considerar:

- **INVÍAS (2022):** Especificaciones generales de construcción de carreteras.
- **Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2021):** lineamientos de SbN para adaptación al cambio climático.
- **UNGRD (2018):** políticas de gestión del riesgo que incluyen enfoques ecosistémicos.

Este marco normativo establece la necesidad de que las SbN no solo cumplan con criterios técnicos, sino también con estándares de sostenibilidad, participación social y alineación institucional.

Marco geotécnico y estructural

Técnicas de bioingeniería

Construcciones vivas

Fajinas vivas

Se definen como elementos cilíndricos compuestos por material vegetal que se disponen de forma horizontal sobre las curvas de nivel de una pendiente. Su instalación requiere la excavación previa de zanjas superficiales donde se alojan los cilindros, los cuales quedan anclados al terreno mediante el uso de estacas para asegurar su posición y resistencia (Instituto de Agricultura Sostenible, 2014; ?).

Biorrollos

Se definen como cilindros de control erosivo constituidos por una malla exterior de alta durabilidad (fabricada en fibras naturales como el coco o sintéticas como el nylon y polipropileno) que alberga en su interior un relleno de fibras orgánicas o polímeros fotodegradables. Estas estructuras, que suelen presentar diámetros de entre 0.10 y 0.50 metros con longitudes de 3 a 6 metros, pueden incluir un sistema de semillado protegido por un papel especial en su cara posterior, diseñado específicamente para evitar la dispersión de las semillas antes de su germinación (Instituto de Agricultura Sostenible, 2014).

Filtro vivo – biofiltros

Es un sistema de drenaje compuesto por una red de zanjas interconectadas que siguen la dirección de la pendiente. Esta estructura se caracteriza por el uso de capas superpuestas de material vegetal —como la guadua o diversas especies leñosas— seleccionadas específicamente por su capacidad de rebrote. Su función primordial es la gestión hídrica, facilitando la evacuación eficiente del agua acumulada en el interior del suelo y dirigiéndola de manera controlada hacia puntos de vertido seguros, tales como cunetas o drenajes naturales (INVIAS, 2022; Rivera et al., 2015).

Estacas vivas (estaquillado)

Es una técnica de bioingeniería que consiste en la inserción directa en el terreno de fragmentos de especies leñosas con alta capacidad de propagación vegetativa. Estas piezas, seleccionadas por su potencial para enraizar y transformarse en ejemplares adultos, deben poseer dimensiones y una consistencia lo suficientemente robustas para permitir su hincado mecánico o manual. Al desarrollarse, el sistema radicular de estas estacas actúa como un anclaje biológico que estabiliza las capas superficiales del suelo (?).

Escalonado de matorral (*contourbrush layering*)

Consiste en la inserción de esquejes vivos de especies arbustivas o leñosas con alta capacidad regenerativa directamente en el terreno. Estas ramas se disponen de forma organizada en filas horizontales que respetan las curvas de nivel de la pendiente. Se trata de una técnica versátil, ya que puede integrarse durante la fase de construcción de la ladera o aplicarse como una medida correctiva posterior para mitigar los efectos de la erosión mediante el enraizamiento natural del material vegetal (Instituto de Agricultura Sostenible, 2014; ?).

Paquetes de matorral

Es una técnica de bioingeniería diseñada específicamente para la rehabilitación de oquedades o depresiones generadas por deslizamientos superficiales. El procedimiento consiste en la reconstrucción del relieve mediante la disposición de capas sucesivas y alternas: una base de material vegetal (ramas de arbustos o matorrales) seguida de una capa de suelo de relleno debidamente compactado. Esta estructura multicapa permite recuperar la continuidad de la pendiente mientras se mejora la resistencia interna del terreno gracias al aporte orgánico y mecánico de la vegetación (?).

Esteras de matorral – colchón de ramaje

Es una técnica de bioingeniería que consiste en el revestimiento integral de la superficie de un talud mediante una capa densa de ramas entrelazadas. Estas se disponen de forma que configuran una estera protectora, la cual se fija firmemente al sustrato mediante el uso de estacas de madera y refuerzos de alambre. Este método está diseñado específicamente para la estabilización de márgenes en cuerpos de agua, como ríos y arroyos, siendo altamente eficaz en pendientes moderadas que oscilan entre relaciones de 3H:1V y 4H:1V (?).

Empaquetado de ramas

Es una técnica de bioingeniería derivada de la estratificación de ramas, que consiste en la colocación de capas de relleno compactado combinadas con ramas, las cuales se aseguran mediante estacas vivas y estacas de madera. Este sistema permite que, con el tiempo, las estacas y el desarrollo del sistema radicular aporten un refuerzo estructural a la ribera o al talud. De manera complementaria, las ramas expuestas y la vegetación asociada actúan como un filtro natural de sedimentos y proporcionan protección superficial frente a los procesos erosivos, contribuyendo a la estabilidad y conservación del terreno (?).

Capas de ramas

Son una técnica de bioingeniería empleada para la estabilización de taludes, que consiste en la colocación de disposiciones horizontales alternadas de suelo y ramas vivas dentro de la pendiente, conformando una estructura continua de refuerzo. El extremo vegetal de cada capa actúa como una barrera viva, cuya función es retener el material suelto que se desplaza ladera abajo. Esta técnica resulta especialmente adecuada en intervenciones que implican corte y relleno, en pendientes con abundante material suelto o en áreas erosionadas donde se emplea suelo colapsado o material importado. Asimismo, las capas de ramas pueden utilizarse en zanjas como medida para la estabilización de taludes y la protección frente a eventos de inundación (?).

Plantación conjunta

Es una técnica de bioingeniería orientada a la estabilización de suelos, que consiste en la instalación de esquejes vivos de especies leñosas con capacidad de desarrollar raíces adventicias, colocados dentro de juntas de roca previamente rellenas con material edáfico. Esta disposición genera una estructura radicular continua que se integra al suelo, formando una malla viva que mejora su cohesión y resistencia. Asimismo, la técnica contribuye a la reducción del contenido de humedad mediante la absorción de agua por la vegetación. La plantación conjunta resulta especialmente eficaz en la rehabilitación de zonas afectadas por movimientos en masa superficiales, así como en áreas expuestas a escorrentías y flujos subterráneos poco profundos, proporcionando un control inmediato de la erosión superficial y un soporte mecánico inicial del terreno (Campbell et al., 2008).

Cercas de mimbre

Es una técnica de bioingeniería utilizada para la estabilización de taludes y laderas, que consiste en la construcción de pequeños escalonamientos con el fin de reducir el ángulo efectivo de la pendiente y facilitar el establecimiento de la vegetación. Estas estructuras actúan como elementos de retención de materiales sueltos, evitando su desplazamiento. Los esquejes vivos empleados en su conformación brotan y se desarrollan con el tiempo, generando una cobertura vegetal inicial que favorece la colonización de especies leñosas pioneras. En condiciones de suelos húmedos, las cercas de mimbre contribuyen a mantener la estabilidad del terreno, al tiempo que permiten el drenaje del exceso de humedad (Atkins, 2001).

Taponamiento de grietas

Es una técnica aplicada en zonas afectadas por procesos denudativos asociados a movimientos en masa y erosión, que se caracterizan por la presencia de fracturas longitudinales y transversales en el terreno. Estas

discontinuidades facilitan la entrada de aguas lluvias y de escorrentía, incrementando la inestabilidad del suelo. La técnica consiste en eliminar dichas grietas mediante excavaciones que superen su profundidad, seguidas de la compactación del fondo con material del sitio o con suelos arcillosos adecuados, y el posterior relleno y compactación del material, con el fin de restituir la continuidad del terreno y reducir la infiltración de agua (Rivera et al., 2015).

Construcciones mixtas

Trinchos vivos en vertederos – trinchos disipadores

Son barreras construidas principalmente con guadua que se instalan de forma transversal y escalonada siguiendo el eje de cárcavas o surcos. Al fragmentar la energía del agua, estas estructuras actúan como un escudo que impide el arrastre de partículas de suelo gruesas o de textura franco-arenosa, protegiendo así la integridad del terreno (INVIAS, 2022; Rivera et al., 2015).

Trinchos vivos escalonados – terrazas escalonadas

Se definen como estructuras diseñadas para la estabilización superficial que permiten transformar terrenos irregulares en pendientes continuas o en sistemas de terrazas escalonadas. Su propósito fundamental es la recuperación de áreas degradadas por la erosión o por desplazamientos de tierra, funcionando como una herramienta de reconfiguración geométrica del relieve. Es importante precisar que, a diferencia de otras obras de ingeniería civil, estos trinchos no cumplen la función de muros de contención, sino que actúan como un soporte para la restauración de la forma natural de la ladera (Rivera et al., 2015).

Pantallas

Se definen como una modalidad especializada de terrazas, diseñadas específicamente para proteger la parte superior de los escarpes (tanto principales como secundarios). Su función primordial es actuar como un remate final de la obra para prevenir que la lluvia socave estas superficies, las cuales suelen ser muy vulnerables a la erosión. A diferencia de las terrazas convencionales, las pantallas utilizan una mayor densidad de piezas de guadua para cubrir por completo la cara expuesta del talud, requiriendo un volumen significativamente menor de tierra de relleno y compactación (Rivera et al., 2015).

Muros vivos – muro de criba

Se definen como estructuras huecas fabricadas con troncos de madera que funcionan como contenedores de suelo. Su diseño integra material vegetal vivo (varas y ramas) en su cara exterior, el cual tiene la capacidad de enraizar tanto en el relleno interno como en el talud original. Inicialmente, el sistema opera de forma puramente mecánica como un muro de contención que estabiliza la pendiente. Sin embargo, a medida que la vegetación se desarrolla, las raíces asumen progresivamente la función estructural, sustituyendo la resistencia de la madera —que se degrada con el tiempo— hasta convertirse en el componente principal de soporte y anclaje del terreno (?).

Muros de gaviones con vegetación

Se define como una estructura de contención híbrida que integra capas de material leñoso vivo entre los módulos de gaviones que conforman el muro. Esta técnica permite que las ramas, al enraizar, atraviesen el relleno de piedra hasta anclarse firmemente en el talud subyacente. Aunque la estabilidad mecánica del terreno recae primordialmente en la masa de los gaviones, la red radicular actúa como un refuerzo biológico que cohesiona la estructura interna. Además de incrementar la resistencia del sistema, este método facilita la integración paisajística al proporcionar una apariencia natural a la obra civil (?).

Marco ecológico y biológico

Mecanismos de recuperación de movimientos en masa basados en la naturaleza

La recuperación natural, o sucesión ecológica primaria, es el proceso mediante el cual la vida recoloniza un terreno desnudo, como la cicatriz de un movimiento en masa. Este mecanismo es de suma importancia, ya que representa una vía de restauración rentable y de bajo impacto cuando las condiciones ambientales lo permiten. Además, sirve como una línea de base fundamental para medir la eficacia y la necesidad de intervenciones artificiales, lo que permite a los gestores decidir cuándo y dónde actuar (Nakata et al., 2023; Sittadewi et al., 2024).

La recuperación natural raramente comienza desde cero, las plantas remanentes, árboles caídos, bancos de semillas en el suelo y vegetación adyacente, son elementos críticos que actúan como catalizadores de la sucesión vegetal, tal como se demostró en estudios realizados en Japón por (Nakata et al., 2023; Thapa et al., 2024), donde se resaltó que árboles caídos pero aún vivos, constituyen un legado biológico particularmente valioso, ya que representan material vivo que puede rebrotar y contribuir a la estabilización inicial. Del mismo modo, los árboles que sobreviven en los bordes de la cicatriz del deslizamiento son cruciales, ya que actúan como fuentes de suelo, nutrientes y semillas, lo que facilita la colonización de áreas desnudas. Por ello, su preservación constituye una estrategia pasiva de restauración altamente eficaz (Nakata et al., 2023).

Las primeras etapas de la sucesión están dominadas por especies pioneras, organismos resilientes adaptados a condiciones adversas. Dependiendo del ecosistema, estas pueden ser tanto herbáceas como leñosas. Estas especies a menudo poseen características reproductivas ventajosas, como la producción de semillas ligeras, dispersadas por el viento, o la capacidad de reproducción vegetativa, que les permiten colonizar rápidamente las cicatrices inestables de los movimientos en masa (Nakata et al., 2023).

El éxito y la velocidad de la regeneración natural están fuertemente condicionados por una serie de factores ambientales. La evidencia científica descrita por autores como (Nakata et al., 2023; Arrogante-Funes et al., 2024; Thapa et al., 2024), sugiere que los siguientes son determinantes:

- **Topografía:** Las pendientes suaves son más propicias para la recuperación que las pendientes pronunciadas, ya que presentan menor erosión del suelo y permiten una mayor retención de semillas y de humedad.
- **Estabilidad del Suelo:** Las áreas con mínima erosión o deposición de sedimentos son focos clave para el establecimiento de la vegetación. La actividad geomorfológica continua, como la erosión en cárcavas, impide la colonización por plantas.
- **Exposición Solar y Humedad:** Una radiación solar excesiva puede secar la capa superficial del suelo, retrasando o impidiendo la germinación y el establecimiento de plántulas. La humedad edáfica

es, por tanto, un factor limitante crucial para la recuperación.

- **Proximidad a Vegetación Existente:** Las tasas de recuperación tienden a disminuir a medida que aumenta la distancia al borde del deslizamiento y a la vegetación existente, lo que subraya nuevamente la importancia de los legados biológicos como fuentes de propágulos.

Tradicionalmente, el seguimiento de la recuperación de los movimientos en masa se ha basado en inventarios de campo, métodos que, si bien son precisos, resultan costosos, logísticamente complejos y, en ocasiones, peligrosos debido a la inestabilidad del terreno (Dang et al., 2024). Por otro lado, estos métodos son insuficientes para capturar la dinámica espacial y temporal a gran escala de procesos como la sucesión ecológica, especialmente en las etapas iniciales, cuando la vegetación pionera es pequeña y dispersa (Nakata et al., 2023).

En los últimos años, las tecnologías modernas de teledetección han revolucionado el monitoreo de zonas afectadas por movimientos en masa. Las imágenes satelitales, como las proporcionadas por Sentinel-2, junto con datos de LiDAR (Light Detection and Ranging) y Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV), ofrecen datos multitemporales y de alta resolución que son cruciales para evaluar la dinámica del paisaje post-desastre (Nakata et al., 2023; Thapa et al., 2024; Dang et al., 2024). Los UAV, en particular, destacan por su capacidad para monitorear la sucesión vegetal en sus etapas más tempranas. Su proximidad al terreno les permite capturar plantas pequeñas (de pocos centímetros) y cambios topográficos detallados, como la erosión o la deposición de sedimentos, con una precisión que las imágenes satelitales de menor resolución podrían pasar por alto (Nakata et al., 2023). Asociado a estas tecnologías, el aprendizaje profundo (deep learning) ha emergido como una herramienta poderosa para automatizar el análisis de imágenes de teledetección. Modelos como U-Net, basados en arquitecturas de redes neuronales convolucionales, se utilizan para identificar y delinear automáticamente las huellas de los movimientos en masa a partir de imágenes satelitales con una precisión notablemente alta, tal como lo demuestra (Dang et al., 2024) en un estudio en Vietnam, donde alcanzó una exactitud del 97 % en la detección de movimientos en masa utilizando el modelo U-Net. Aunque existen múltiples arquitecturas (p. ej., U-Net, U2-Net, U-Net3+), dicho estudio demostró que modelos más simples, como U-Net con tamaños de parche de entrada pequeños (32x32 píxeles), superaron a otros más complejos para identificar la morfología específica de los movimientos en masa de la región, que son típicamente más pequeños y numerosos. Esto muestra la importancia de adaptar el modelo al contexto local. Estas herramientas inteligentes permiten a los gestores del territorio identificar con antelación incidentes y emitir advertencias oportunas.

Otros métodos incluyen el análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), calculado a partir de bandas espectrales de imágenes satelitales, que monitorean la regeneración de la vegetación. El análisis de series temporales de NDVI permite cuantificar la pérdida de cobertura vegetal, la velocidad de la recuperación y el tiempo estimado necesario para que el ecosistema alcance un estado similar previo al desastre (Arrogante-Funes et al., 2024). Sin embargo, los datos de teledetección deben complementarse con estudios de campo, especialmente para realizar inspecciones que permitan identificar las especies dominantes, validar las observaciones remotas (Nakata et al., 2023; Thapa et al., 2024) y clasificar con precisión el estado de los árboles dañados, lo cual es fundamental para evaluar el impacto ecológico y planificar procesos de recuperación. Tal es el caso de (Yousefi et al., 2025) que evalúa el potencial de recuperación de un sitio por sí mismo mediante la categorización de los árboles en 4 clases: (i) caídos pero aún vivos o verdes; (ii) caídos y muertos o secos; (iii) en pie y muertos o secos; y (iv) en pie pero muertos en algunas partes.

Estrategias de Recuperación Artificial y Asistida

Cuando la recuperación natural es insuficiente o demasiado lenta para estabilizar el terreno y restaurar las funciones ecológicas críticas, se requieren intervenciones artificiales. Estas estrategias buscan acelerar la sucesión, mejorar la estabilidad del suelo y reducir el riesgo de desastres secundarios, entre las que se destacan las siguientes:

Reforestación y Selección de Especies

Las técnicas de revegetación artificial, como la siembra aérea, pueden ser métodos eficaces para introducir vegetación en áreas inaccesibles. En el Monte Hakusan, Japón, se implementó la dispersión de semillas y esquejes por helicóptero en la zona superior de un gran deslizamiento (Thapa et al., 2024). La evaluación de esta intervención arrojó resultados mixtos: las especies herbáceas nativas (*Artemisia montana*, *Miscanthus sinensis*) tuvieron un alto éxito de germinación y establecimiento, pero los esquejes de sauce pulverizados no lograron enraizar. Esto subraya que la selección de especies y métodos de propagación es crítica. Para mejorar la estabilidad de los taludes, se recomienda el uso de plantas nativas, de rápido crecimiento, con sistemas de raíces profundas y altas tasas de evapotranspiración, ya que ayudan a anclar el suelo y a reducir la presión de poros del agua (Sittadewi et al., 2024).

Sistemas Agroforestales Multiestrato

En regiones donde las comunidades locales dependen de la tierra para su subsistencia, los modelos de restauración deben integrar las necesidades socioeconómicas. Un estudio en West Bogor, Indonesia, propuso un modelo de gestión basado en la agroforestería multiestrato, adaptado a las diferentes zonas de un deslizamiento (Sittadewi et al., 2024). Este enfoque no solo busca estabilizar el terreno, sino también proporcionar beneficios económicos a la comunidad, asegurando su aceptación y mantenimiento a largo plazo.

Este modelo demuestra un enfoque holístico que combina la restauración ecológica con el desarrollo sostenible, alineando los objetivos de conservación con las prácticas de uso del suelo locales.

Precipitación de Carbonato de Calcio Inducida (MICP y EICP)

De acuerdo con (Sharma, 2025), la Precipitación de Calcita Inducida por Microorganismos (MICP) y la Precipitación de Calcita Inducida por Enzimas (EICP) son soluciones geotécnicas innovadoras que imitan procesos naturales de cementación para mejorar las propiedades del suelo. El mecanismo consiste en utilizar bacterias ureolíticas (MICP) o la enzima ureasa libre (EICP) para hidrolizar la urea, lo que genera iones de carbonato. En presencia de iones de calcio, se precipita carbonato de calcio (calcita), que actúa como un cemento natural, uniendo las partículas del suelo. Este proceso aumenta la resistencia del suelo, reduce su permeabilidad y mejora su resistencia a la erosión. La EICP presenta ventajas sobre la MICP, especialmente en suelos de grano fino donde las bacterias pueden tener dificultades para penetrar, y su menor dependencia de condiciones ambientales específicas (como temperatura y pH) la hace una opción más versátil.

Clasificación funcional de especies vegetales

La clasificación funcional de las especies vegetales dentro del proceso de sucesión se basa en su papel ecológico y en el momento en que aparecen a lo largo de la recuperación de un ecosistema. De acuerdo con Begon et al. (2006), las especies pueden agruparse en tres grandes categorías: **pioneras**, **secundarias** y **tardías o de clímax**, cada una con funciones diferenciadas en la dinámica del suelo, la cobertura y la estabilidad del terreno.

- **Especies pioneras:** Son las primeras en colonizar áreas perturbadas o desnudas. Poseen alta capacidad de dispersión, rápido crecimiento y tolerancia a condiciones adversas de radiación, temperatura y humedad. Su sistema radicular superficial y fibroso favorece la protección inicial del suelo frente a la erosión y crea condiciones para el establecimiento de otras especies.
- **Especies secundarias:** Se establecen una vez que las condiciones del suelo y del microclima mejoran gracias a la acción de las especies pioneras. Presentan un crecimiento moderado, mayor exigencia de nutrientes y desarrollan raíces más profundas que contribuyen a la estabilización estructural del suelo.
- **Especies tardías o de clímax:** Representan las comunidades más maduras y estables del ecosistema. Son especies de crecimiento lento, longevas y con sistemas radiculares profundos y robustos que aportan mayor cohesión al suelo y estabilidad hidrológica. Estas especies mantienen la estructura del bosque y regulan los ciclos ecológicos a largo plazo.

Comprender esta clasificación funcional permite orientar la selección de especies adecuadas para la restauración ecológica y las intervenciones de bioingeniería, garantizando una secuencia sucesional coherente con la estabilidad y resiliencia del terreno.

Interacción suelo–vegetación–microbiota

La interacción entre el suelo, la vegetación y la microbiota constituye un componente esencial en la dinámica de los ecosistemas terrestres, especialmente en los procesos de recuperación y estabilización de laderas. Este acoplamiento tripartito determina el desarrollo de la estructura del suelo, la productividad vegetal y la capacidad del sistema para resistir perturbaciones y erosionarse.

De acuerdo con Li et al. (2025), la composición microbiana del suelo varía con la pendiente, la cobertura vegetal y el contenido de materia orgánica, influenciando directamente la disponibilidad de nutrientes y la retención de humedad. Las comunidades bacterianas y fúngicas de la rizosfera desempeñan un papel crucial en la formación de agregados estables, en la degradación de compuestos orgánicos y en la solubilización de minerales, procesos que mejoran la cohesión del suelo y su capacidad de infiltración.

En etapas tempranas de sucesión, las especies pioneras favorecen el establecimiento de microorganismos asociados a raíces finas y de rápido crecimiento, los cuales facilitan la fijación de nitrógeno y la disponibilidad de fósforo. A medida que avanza la sucesión, las especies secundarias y tardías diversifican la microbiota edáfica, incrementando las redes simbióticas micorrízicas y bacterianas que fortalecen la estabilidad del ecosistema. Este proceso coevolutivo entre vegetación y microbiota se traduce en una retroalimentación positiva: el desarrollo radicular estabiliza el suelo, mientras que la actividad microbiana mejora su estructura y fertilidad.

Estudios recientes como los de Wang et al. (2023) y Osman (2011) demuestran que la incorporación de microorganismos solubilizadores de minerales y fijadores de nitrógeno en proyectos de bioingeniería puede

acelerar la recuperación de la estructura del suelo y el establecimiento vegetal en taludes degradados. Así, la interacción suelo-vegetación-microbiota no solo impulsa la restauración ecológica, sino que constituye un mecanismo natural de refuerzo geotécnico dentro de las estrategias de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) aplicadas a la estabilización de laderas.

Papel de la sucesión vegetal en la recuperación de laderas

La sucesión vegetal desempeña un papel fundamental en la recuperación y estabilización de laderas afectadas por movimientos en masa, al promover la cobertura progresiva del suelo, la mejora de sus propiedades físico-químicas y la consolidación estructural a través del desarrollo radicular.

De acuerdo con Osman (2011), el proceso sucesional determina la evolución de la estabilidad del terreno, ya que cada etapa de la sucesión vegetal aporta funciones ecológicas y mecánicas diferenciadas. En las primeras fases, las especies pioneras contribuyen principalmente a la reducción de la erosión superficial mediante raíces fibrosas y una cobertura densa que protege el suelo frente al impacto de la lluvia y al escurrimiento. En fases intermedias y tardías, las especies de mayor porte y raíces más profundas incrementan la resistencia al corte del suelo, mejoran la cohesión entre partículas y favorecen la infiltración del agua, reduciendo la saturación y la presión intersticial.

Osman (2011) señala que la sucesión vegetal actúa como un proceso autocatalítico de estabilización, donde la presencia y crecimiento de la vegetación no solo recuperan la cobertura y la biodiversidad, sino que también modifican las condiciones mecánicas del suelo hasta alcanzar un equilibrio dinámico entre la estructura radicular y los procesos hidrológicos. En este sentido, la restauración basada en la sucesión vegetal constituye una herramienta clave dentro de las estrategias de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN), al integrar procesos ecológicos con funciones geotécnicas orientadas a la sostenibilidad de las laderas.

Concepto de zonas de vida y su uso para la selección de especies

El concepto de zonas de vida fue propuesto originalmente por Holdridge (1967) como un sistema ecológico para clasificar los ecosistemas terrestres a partir de variables climáticas que determinan la distribución potencial de la vegetación. Este enfoque establece una relación funcional entre la biotemperatura media anual, la precipitación anual y la evapotranspiración potencial, generando un marco bioclimático que permite identificar unidades ecológicas homogéneas llamadas “zonas de vida”.

Según el sistema de Holdridge, cada zona de vida representa un conjunto de condiciones ambientales que sustentan tipos de vegetación característicos y procesos ecológicos particulares. En regiones tropicales montañosas, como el Valle de Aburrá, las variaciones en altitud, temperatura y precipitación generan una alta heterogeneidad ambiental, lo que se traduce en una amplia diversidad de zonas de vida.

La clasificación por zonas de vida constituye una herramienta clave para la selección de especies vegetales en procesos de restauración ecológica y en la implementación de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN). Al conocer las condiciones bioclimáticas de un sitio, es posible identificar las especies que naturalmente prosperan en esas condiciones y replicar comunidades vegetales adaptadas localmente. De esta manera, las especies seleccionadas presentan mayor probabilidad de sobrevivencia, reducen los requerimientos de mantenimiento y aseguran la coherencia ecológica del ecosistema restaurado.

En el contexto del Valle de Aburrá, el uso del sistema de zonas de vida permite establecer criterios objetivos para asociar las especies observadas en áreas afectadas por movimientos en masa con otras zonas que comparten condiciones similares de temperatura, altitud y régimen de precipitación. Así, las

especies pioneras, secundarias o tardías identificadas en una zona de vida específica pueden emplearse como referencia para la restauración de laderas en sitios análogos, promoviendo la eficiencia ecológica y la replicabilidad de las intervenciones.

Sección 3.1 Análisis de la implementación

En esta sección del documento se desarrollan los criterios técnicos, físicos y ambientales necesarios para evaluar la viabilidad de implementación de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN). Asimismo, se presentan las metodologías de evaluación asociadas y requeridas para la obtención de resultados en el contexto local. Los insumos y procedimientos desarrollados buscan servir de base para la estructuración de una matriz cualitativa, la cual funcionará como herramienta para el análisis comparativo y la toma de decisiones en la selección e implementación de alternativas SbN.

Metodología para la clasificación por zonas de vida

La clasificación de zonas de vida para el Valle de Aburrá se desarrolló siguiendo el método bioclimático propuesto por Holdridge (1967), el cual relaciona la biotemperatura media anual, la precipitación anual promedio y la evapotranspiración potencial para delimitar unidades ecológicas homogéneas que representan las condiciones climáticas y vegetales potenciales del territorio.

Variables y fuentes de información

Para la aplicación del método se emplearon las siguientes variables climáticas:

- **Biotemperatura media anual (°C):** obtenida a partir de las estaciones meteorológicas de SIATA distribuidas a lo largo del Valle de Aburrá en el período de referencia 2019–2025.
- **Precipitación media anual (mm):** calculada a partir del promedio de registros pluviométricos de las estaciones SIATA en el período de referencia 2019–2025.
- **Evapotranspiración potencial (ETP):** estimada principalmente mediante el método empírico de Hargreaves and Samani (1985), a partir de los registros diarios de temperatura máxima y mínima de las estaciones SIATA en el período de referencia 2019–2025. De manera complementaria, se realizó el cálculo de la ETP utilizando el método propuesto por *Cenicafé*, el cual requiere únicamente información de altitud.

Procedimiento

El procedimiento metodológico se desarrolló en tres etapas principales, orientadas al cálculo de los parámetros bioclimáticos, la clasificación de zonas de vida y la representación cartográfica del sistema ecológico propuesto por Holdridge (1967).

1. **Cálculo de parámetros bioclimáticos.** Se calcularon la *biotemperatura media anual* (BT), la *evapotranspiración potencial* (ETP) y la *relación precipitación/evapotranspiración potencial* (RH), variables que definen la ubicación bioclimática de cada punto en el diagrama de Holdridge.

Biotemperatura media anual.

La biotemperatura (BT) representa la temperatura promedio ajustada al rango fisiológicamente activo de las plantas (0–30 °C). Según Holdridge (1967), se calcula mediante:

$$BT = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{bio,i} \quad (1)$$

donde:

- BT = biotemperatura media anual (°C),
- n = número de meses del año (12),
- $T_{bio,i}$ = temperatura media mensual ajustada según:

$$T_{bio,i} = \begin{cases} 0, & \text{si } T_i < 0 \\ T_i, & \text{si } 0 \leq T_i \leq 30 \\ 30, & \text{si } T_i > 30 \end{cases}$$

Este ajuste excluye los valores fuera del rango fisiológicamente activo de las plantas, asegurando que la biotemperatura refleje únicamente el potencial real de crecimiento vegetal.

Evapotranspiración potencial.

La evapotranspiración potencial (ETP) fue estimada mediante dos métodos empíricos complementarios, con el fin de contextualizar los resultados del análisis bioclimático y multitemporal.

En primer lugar, se empleó el método propuesto por Hargreaves and Samani (1985), el cual requiere datos de temperatura y radiación solar. La expresión general del método es:

$$ETP = 0,0023 \times (T_{med} + 17,8) \times (T_{max} - T_{min})^{0,5} \times R_a \quad (2)$$

donde:

- ETP = evapotranspiración potencial diaria (mm/día),
- T_{med} = temperatura media diaria (°C),
- T_{max}, T_{min} = temperaturas máxima y mínima diarias (°C),
- R_a = radiación solar extraterrestre ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$).

El valor anual de ETP se obtuvo mediante la suma de los valores diarios o mensuales, según la resolución de los datos climáticos disponibles de las estaciones SIATA.

De manera complementaria, la evapotranspiración potencial (ETP) fue estimada mediante el método empírico propuesto por *Cenicafé*, el cual se basa exclusivamente en la altitud y resulta especialmente útil en contextos donde no se dispone de información climática detallada. La expresión utilizada es:

$$ETP = 4,658 \cdot \exp(-0,0002 h) \quad (3)$$

donde:

- ETP = evapotranspiración potencial diaria (mm/día),
- h = altitud sobre el nivel del mar (m),
- $\exp$ = función exponencial.

Para la aplicación de este método se empleó un Modelo Digital de Elevación (DEM) del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) con resolución espacial de 100 m, a partir del cual se calculó la distribución espacial de la evapotranspiración potencial en los sitios analizados.

Relación de evapotranspiración potencial.

Finalmente, se calculó la relación de evapotranspiración potencial (RE), que permite identificar el tipo de zona de vida en función del balance hídrico. De acuerdo con Holdridge (1967), se expresa como:

$$RE = \frac{ETP}{P} \quad (4)$$

donde:

- RE = relación de evapotranspiración potencial (adimensional),
- P = precipitación media anual (mm),
- ETP = evapotranspiración potencial anual (mm).

Valores de $RE < 1$ indican condiciones húmedas, $RE \approx 1$ equilibrio hídrico y $RE > 1$ condiciones secas o con déficit de agua.

- II. **Clasificación bioclimática.** Con base en los parámetros anteriores, se asignó a cada punto del mapa una categoría de zona de vida, siguiendo los límites definidos por Holdridge asajustados a la realidad climática del Valle de Aburrá (ver Figura 10).

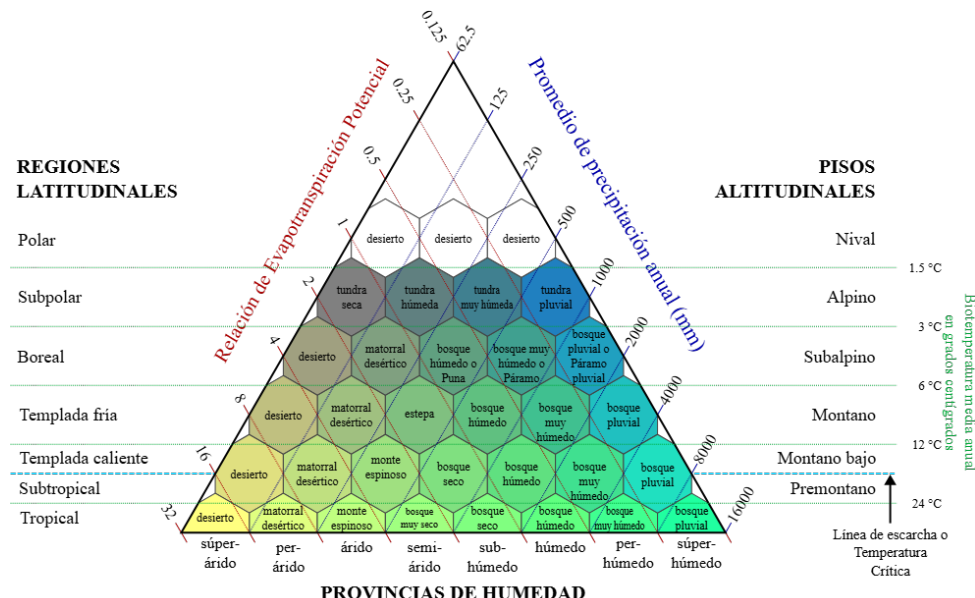


Figura 10. Sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge

III. **Generación del mapa de zonas de vida.** Los resultados se integraron en un entorno SIG utilizando *QGIS 3.x*, donde se generó el mapa de zonas de vida ajustado al Valle de Aburrá. El mapa se construyó mediante la superposición de las capas interpoladas de temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial, utilizando el método de interpolación IDW (*Inverse Distance Weighting*). Finalmente, se verificó la coherencia espacial de los resultados con la cobertura vegetal actual y con estudios previos del *Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2014)*.

Avances, análisis y resultados en la delimitación de zonas de vida

En esta etapa se consolidó la delimitación de las zonas de vida en el Valle de Aburrá a partir de la aplicación del sistema bioclimático de Holdridge, utilizando como referencia el mapa oficial de zonas de vida del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y los campos climáticos derivados de la información de las estaciones SIATA. Para este proceso se adoptaron metodologías consistentes para el cálculo de las variables climáticas fundamentales, cuyos resultados constituyen la base de trabajo para los análisis posteriores.

Método de Holdridge

Se generaron los mapas de temperatura media anual, precipitación media anual y relación precipitación–evapotranspiración potencial (ETP/P), empleando dos métodos para la estimación de la evapotranspiración potencial: el método de Hargreaves, basado en información climática de estaciones, y el método de Cenicafé, basado en la altitud. A partir de estas variables se realizó la clasificación bioclimática de las zonas de vida, conforme a los umbrales definidos en el sistema de Holdridge.

La delimitación de zonas de vida se desarrolló de manera independiente para cada una de las estimaciones de evapotranspiración potencial, generándose dos mapas bioclimáticos comparables entre sí. La

comparación entre ambos resultados permitió evaluar la sensibilidad de la clasificación de zonas de vida a la metodología empleada para el cálculo de la ETP, así como analizar la capacidad de cada enfoque para representar los gradientes climáticos característicos del Valle de Aburrá.

Los mapas resultantes de este proceso corresponden a la clasificación de zonas de vida que será utilizada como insumo base para los análisis ecológicos y territoriales desarrollados en el presente estudio.

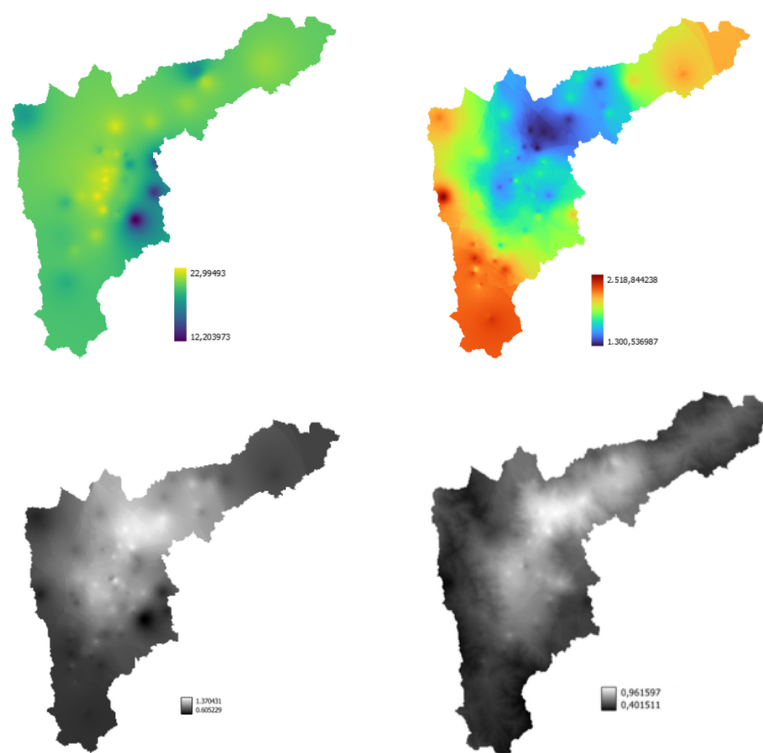


Figura 11. Mapas climáticos empleados en la delimitación de zonas de vida en el Valle de Aburrá: (fila superior, izquierda) temperatura media anual; (fila superior, derecha) precipitación anual; (fila inferior, izquierda) relación de evapotranspiración potencial estimada mediante el método de Hargreaves; (fila inferior, derecha) relación de evapotranspiración potencial estimada mediante el método de Cenicafé.

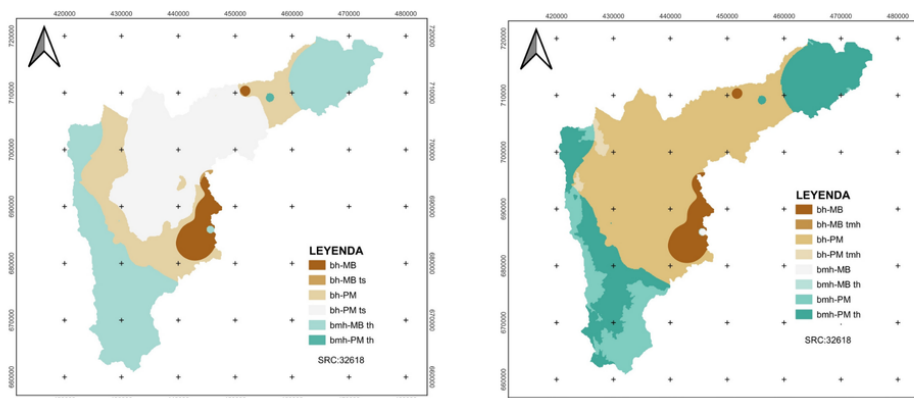


Figura 12. Comparación de las zonas de vida delimitadas mediante el sistema de Holdridge empleando dos métodos para la estimación de la evapotranspiración potencial: (izquierda) zonas de vida obtenidas a partir de la ETP calculada con el método de Hargreaves; (derecha) zonas de vida obtenidas a partir de la ETP calculada con el método de Cenicafé.

Tabla 2. Zonas de vida (Holdridge) derivadas del método de Hargreaves para el cálculo de ETP.

PP	Temp	Ep	Zona de vida	Zona de vida
1000 a 2000	12 a 18	0.5 a 1	bh-MB	Bosque húmedo Montano Bajo
1000 a 2000	12 a 18	1 a 2	bh-MB ts	Bosque húmedo Montano Bajo transición seco
1000 a 2000	18 a 24	0.5 a 1	bh-PM	Bosque húmedo Premontano
1000 a 2000	18 a 24	1 a 2	bh-PM ts	Bosque húmedo Premontano transición seco
2000 a 4000	12 a 18	0.5 a 1	bmh-MB th	Bosque muy húmedo Montano Bajo transición húmedo
2000 a 4000	18 a 24	0.5 a 1	bmh-PM th	Bosque muy húmedo Premontano transición húmedo

Tabla 3. Zonas de vida (Holdridge) derivadas del método de Cenicafé para el cálculo de ETP.

PP	Temp	Ep	Zona de vida	Zona de vida
1000 a 2000	12 a 18	0.25 a 0.5	bh-MB tmh	Bosque húmedo Montano bajo transición muy húmedo
1000 a 2000	12 a 18	0.5 a 1	bh-MB	Bosque húmedo Montano bajo
1000 a 2000	18 a 24	0.25 a 0.5	bh-PM tmh	Bosque húmedo Premontano transición muy húmedo
1000 a 2000	18 a 24	0.5 a 1	bh-PM	Bosque húmedo Premontano
2000 a 4000	12 a 18	0.25 a 0.5	bmh-MB	Bosque muy húmedo Montano bajo
2000 a 4000	12 a 18	0.5 a 1	bmh-MB th	Bosque muy húmedo Montano bajo transición húmedo

Continúa en la siguiente página

Tabla 3 – Continuación de la página anterior.

PP	Temp	Ep	Zona de vida	Zona de vida
2000 a 4000	18 a 24	0.25 a 0.5	bmh-PM	Bosque muy húmedo Premontano
2000 a 4000	18 a 24	0.5 a 1	bmh-PM th	Bosque muy húmedo Premontano transición húmedo

En términos generales, los dos métodos empleados para la estimación de la evapotranspiración potencial conducen a delimitaciones distintas de las zonas de vida, evidenciando la sensibilidad del sistema de Holdridge a la metodología utilizada para el cálculo de la ETP. No obstante, el método de Hargreaves incorpora un tratamiento más detallado de la información climática, al integrar variables de temperatura y radiación, lo que permite una representación más robusta de los gradientes climáticos del territorio. En consecuencia, los resultados obtenidos mediante este método ofrecen un mayor nivel de confiabilidad para la clasificación bioclimática y son adoptados como base principal para los análisis desarrollados en el presente estudio.

Método alternativo: clasificación basada en altitud, temperatura y precipitación

Dado que la ETP introducía inconsistencias, se probó un enfoque alternativo basado en la *Clasificación de suelos de Antioquia*, que utiliza altitud, temperatura y precipitación. En la tabla 4 se pueden ver las combinaciones de los diferentes rangos de cada una de las variables mencionadas asociadas a la zona homogénea a la que corresponden.

Tabla 4. Zonas de vida en el departamento de Antioquia.

Rango	Descripción	Altitud msnm	Precipitación	Temperatura
bh-MB	Bosque Húmedo Montano Bajo	2000–3000	1000–2000	12–17
bh-PM	Bosque Húmedo Premon-tano	1000–2000	1000–2000	17–24
bh-PMtc	Bosque Húmedo Premon-tano Transición cálido	0–1000	1500–2000	24–26.5
bh-T	Bosque húmedo tropical	0–1000	2000–4000	24–35
bmh-MB	Bosque Muy Húmedo Mon-tano Bajo	2000–3000	2000–4000	12–17
bmh-PM	Bosque Muy Húmedo Pre-montano	1000–2000	2000–4000	17–24
bmh-PMtc	Bosque Muy Húmedo Pre-montano trans. cálido	0–1000	2900–4000	24–27
bmh-T	Bosque muy húmedo tropi-cal	0–1000	4000–8000	24–35
bp-M	Bosque pluvial montano	3000–4000	2000–4000	6–12
bp-MB	Bosque pluvial montano bajo	2000–3000	4000–8000	12–24
bp-PM	Bosque pluvial premontano	1000–2000	4000–8000	17–24

Continúa en la siguiente página

Tabla 4 – Continuación de la página anterior.

Rango	Descripción	Altitud msnm	Precipitación	Temperatura
bp-PMtc	Bosque pluvial premontano transición cálido	1000–2000	5500–8000	24–27
bp-T	Bosque pluvial tropical	0–1000	>8000	24–35
bp-Ttf	Bosque pluvial transición fría	0–1000	>8000	21.5–24
bs-T	Bosque seco tropical	0–1000	1000–2000	24–35

Para facilitar la clasificación se definieron rangos para cada una de las variables y a cada uno de estos se les asignó un código de un dígito, de esta manera para cada zona de vida obtenida se tendría un código de 3 dígitos. En la Tabla 5 se resumen los rangos empleados para la clasificación.

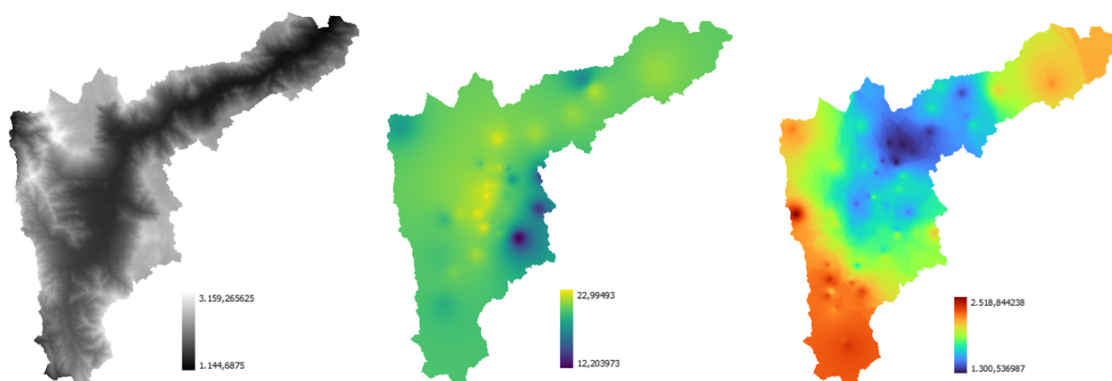


Figura 13. Mapas de altitud (DEM), temperatura y precipitación empleados en la clasificación de zonas de vida según la “Clasificación de suelos de Antioquia”.

Tabla 5. Rangos de altitud, precipitación y temperatura, y sus códigos asociados.

Rango (msnm)	altitud	Código	Rango precipitación (mm)	Código	Rango temperatura (°C)	Código
1000–2000		1	1000–2000	4	12–18	6
2000–3000		2	2000–4000	5	18–24	7
> 3000		3				

Basándonos en esta clasificación se listaron las combinaciones de códigos halladas para el Valle de Aburrá y comparando con la Tabla 4 se asignaron las Zonas de vida correspondientes. en la Tabla 6 tal está el resumen de los resultados obtenidos

Tabla 6. Tabla resumen de resultados de método alternativo

Combinación códigos	Rango altitud (msnm)	Rango precipitación (mm)	Rango temperatura (°C)	Zona de vida	Zona de vida dpto Antioquia
146	1000–2000	1000–2000	12–18	Bosque húmedo montano bajo	NA
246	2000–3000	1000–2000	12–18	Bosque húmedo montano bajo	OK
147	1000–2000	1000–2000	18–24	Bosque húmedo premontano	OK
247	2000–3000	1000–2000	18–24	Bosque húmedo premontano	NA
347	> 3000	1000–2000	18–24	Bosque húmedo premontano	NA
256	2000–3000	2000–4000	12–18	Bosque muy húmedo montano bajo	OK
157	1000–2000	2000–4000	18–24	Bosque muy húmedo premontano	OK
257	2000–3000	2000–4000	18–24	Bosque muy húmedo premontano	NA
357	> 3000	2000–4000	18–24	Bosque muy húmedo premontano	NA

Solo las áreas que dicen “OK” en la Tabla 6 coinciden con la clasificación de zonas de vida tomada de la Clasificación de suelos de Antioquia”. Se evidencia que algunos sectores del Valle de Aburrá se encuentran fuera de los rangos definidos, lo que limita la aplicación de esta metodología en el territorio en estudio.

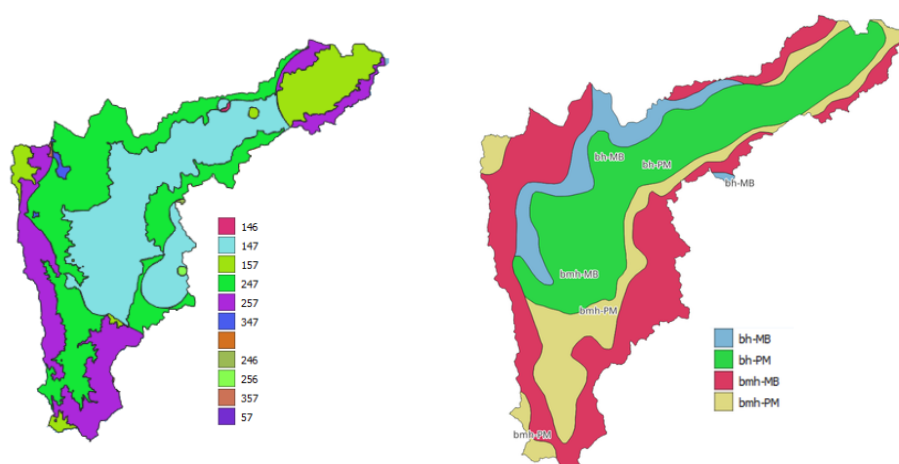


Figura 14. Comparación entre las zonas de vida obtenidas con el método alternativo (izquierda) y las zonas de vida oficiales del IGAC (derecha).

Los resultados obtenidos con este método alternativo no serán tenidos en cuenta para el manual de soluciones basadas en la naturaleza.

Metodología para la caracterización de la cobertura vegetal y suelos (Caracterización ecológica)

El trabajo de campo se orientó a caracterizar la cobertura vegetal, las condiciones edáficas y los procesos de sucesión ecológica en zonas previamente afectadas por movimientos en masa dentro del Valle de Aburrá. Para ello, se desarrollaron las siguientes etapas metodológicas:

- I. **Selección y visita preliminar a sitios de interés.** Se identificaron diez (10) puntos de monitoreo de movimientos en masa registrados por SIATA, priorizando aquellos distribuidos en diferentes sectores del Valle de Aburrá y en los cuales se evidenciara el inicio de procesos de sucesión vegetal. Los sitios fueron visitados para realizar una evaluación cualitativa inicial que permitiera determinar su idoneidad como posibles áreas de estudio. En esta etapa se analizó la cobertura vegetal, las condiciones del terreno, la accesibilidad y el grado de recuperación natural, con el fin de definir su potencial para la toma de muestras de suelo y vegetación, así como para futuros análisis sucesionales.
- II. **Elaboración de fichas de caracterización.** Con la información levantada durante las visitas de campo se diseñaron fichas que resumen las observaciones sobre las condiciones del sitio. Cada ficha incluye variables de ubicación, accesibilidad, tipo de cobertura, pendiente, estabilidad del terreno y observaciones ecológicas generales. A partir de esta información se definió la viabilidad de cada punto como posible objeto de muestreo.
- III. **Análisis multitemporal de la cobertura vegetal a partir de imágenes.**

Con base en los sitios previamente definidos como viables, se desarrolló un análisis multitemporal de la cobertura vegetal utilizando históricos de ortofotos RGB y, cuando existió disponibilidad, imágenes multiespectrales provistas por el equipo de Teledetección de SIATA. El objetivo de esta etapa fue identificar, delimitar y caracterizar espacialmente las zonas dentro de cada evento de movimiento en masa donde se evidencian procesos de sucesión vegetal, con el fin de orientar la selección final de puntos de muestreo en campo.

El procesamiento y análisis espacial se realizó a partir de imágenes multitemporales adquiridas mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV), integrando técnicas de análisis ráster, cálculo de índices espectrales y análisis temporal del cambio. El procedimiento se desarrolló en las siguientes etapas:

- a) **Carga y organización de imágenes multitemporales.** Las imágenes RGB adquiridas mediante UAV fueron cargadas en un entorno SIG y organizadas cronológicamente según su fecha de adquisición, garantizando la coherencia temporal del análisis de la dinámica de la cobertura vegetal.
- b) **Eliminación de la banda Alpha.** Con el fin de asegurar la homogeneidad espectral entre los rásteres, se eliminó la banda Alpha de cada imagen utilizando la herramienta *Ráster → Conversión → Traducir*, conservando únicamente las bandas RGB y asignando explícitamente el sistema de referencia de coordenadas correspondiente. En los parámetros adicionales se definieron las bandas mediante la instrucción:

-b 1 -b 2 -b 3

- c) **Cálculo del índice Excess of Green (ExG).** Para resaltar la cobertura vegetal y minimizar la influencia de otras superficies, se calculó el índice *Excess of Green (ExG)* para cada imagen mediante la Calculadora Ráster de QGIS, utilizando la expresión:

$$ExG = (2 \times Green) - Red - Blue \quad (5)$$

Este procedimiento permitió obtener un ráster ExG independiente para cada fecha analizada.

- d) **Normalización de los rásteres ExG.** Con el objetivo de estandarizar los valores y permitir comparaciones temporales consistentes, cada ráster ExG fue normalizado a un rango entre 0 y 1 mediante la siguiente expresión:

$$ExG_{norm} = \frac{ExG - min}{max - min} \quad (6)$$

donde *min* y *max* corresponden a los valores mínimo y máximo del ráster ExG respectivo.

- e) **Cálculo de tasas de cambio entre fechas.** Se aplicó un script en Python para calcular las tasas de cambio entre cada par de rásteres ExG normalizados consecutivos en el tiempo, permitiendo cuantificar las variaciones temporales de la cobertura vegetal entre fechas sucesivas.
- f) **Generación del ráster de cambio total acumulado.** A partir de las tasas de cambio individuales, se integraron todas las variaciones temporales en un único ráster de cambio total acumulado, representativo de la dinámica global de la cobertura vegetal desde la primera hasta la última fecha del período de estudio.
- g) **Segmentación del ráster de cambio total.** El ráster de cambio total acumulado fue segmentado en cinco categorías discretas con el fin de facilitar su interpretación y análisis espacial:
- Pérdida fuerte
 - Pérdida moderada
 - Estable
 - Ganancia moderada
 - Ganancia significativa

La clasificación se realizó mediante la Calculadora Ráster, generando un ráster categórico con valores enteros asociados a cada clase.

- h) **Conversión de ráster a polígonos y disolución por clase.** El ráster categorizado fue convertido a formato vectorial mediante la herramienta *Ráster → Conversión → Poligonizar*. Posteriormente, se aplicó un script en Python para disolver los polígonos pertenecientes a una misma categoría, obteniéndose cinco polígonos finales, uno por cada clase de cambio.
- i) **Producción de insumos cartográficos para la selección de puntos de muestreo.** Finalmente, se seleccionó una de las imágenes RGB originales como capa base, a la cual se aplicó una transparencia del 35 %. Sobre esta imagen se superpusieron los polígonos correspondientes a las categorías de ganancia de cobertura vegetal, junto con el polígono delimitador de la zona de estudio asociada a cada movimiento en masa. Estos productos cartográficos fueron utilizados como insumo principal para la selección final de los puntos de muestreo de suelo y vegetación en campo.

- IV. **Selección de puntos viables y toma de muestras.** Con base en los resultados de la etapa anterior, se seleccionarán las zonas viables dentro de los sitios de interés para la toma de muestras de suelo y vegetación. Las muestras de plantas se enviarán al herbario correspondiente para su identificación taxonómica y verificación de especie. Una vez identificadas, las especies se clasificarán de acuerdo con su rol sucesional (pioneras, secundarias o tardías) mediante revisión bibliográfica y criterio profesional.

v. Selección de puntos viables y toma de muestras de vegetación y suelo.

Con base en los productos cartográficos derivados del análisis multitemporal de la cobertura vegetal, se realizó la selección de los puntos de muestreo potenciales.

Una vez definidos los puntos, se procedió a la ejecución del protocolo de muestreo en campo, el cual incluyó la recolección de ejemplares vegetales y muestras de suelo, siguiendo criterios estandarizados para garantizar la calidad y representatividad de las muestras.

● Obtención y procesamiento de ejemplares vegetales

La recolección de material vegetal se realizó siguiendo el siguiente protocolo estructurado:

- a) De acuerdo con lo definido, se ubicó cada punto de muestreo mediante GPS.
- b) Una vez en el sitio de interés, se estableció una parcela de muestreo de 2 m × 2 m, delimitada mediante tubos de PVC ensamblados en forma de cuadrado.
- c) Se realizó un registro fotográfico general de la parcela antes de iniciar la recolección de muestras vegetales.
- d) Se procedió a la toma de muestras, seleccionando de manera ordenada las especies presentes dentro de la parcela. En la libreta de campo se registraron datos generales tales como fecha, ubicación (municipio, corregimiento, vereda), coordenadas geográficas y características visibles de cada planta (coloración, presencia de exudados, olor, pubescencia y otras particularidades que pudieran perderse durante el proceso de herborización). A cada muestra se le asignó un código único de registro.
- e) De cada ejemplar se realizó un registro fotográfico individual y posteriormente se efectuó el corte del material vegetal a un tamaño aproximado de 30 × 40 cm, utilizando tijeras podadoras. En el caso de individuos arbóreos, se empleó un trimmer para la obtención de la muestra.
- f) Las muestras recolectadas incluyeron, en lo posible, estructuras vegetales completas, con varias hojas visibles y, cuando estuvo disponible, la presencia de flores y/o frutos.
- g) Cada muestra se introdujo en una bolsa plástica sencilla, identificada con su respectivo código de colecta, el cual integró: código del sitio (La Playa – LY, Bermejala – BJ, Salinas – SS, La Gabriela – LG, La Palma – LP, Palmitas – PM, Pueblo Viejo – PV), número de parcela, tipo de muestra (Vegetal – V, Suelo – S, Microbiota – MB) y número consecutivo de muestra (por ejemplo, LY1-V-001).
- h) El procedimiento se repitió para todas las especies identificadas dentro de la parcela.
- i) En laboratorio, las muestras se extrajeron de las bolsas y se ajustaron a las dimensiones del papel periódico (aproximadamente 30 × 40 cm), disponiendo las hojas de manera que se observaran tanto el haz como el envés.
- j) Cada periódico fue rotulado con el código de la muestra, la fecha y el lugar de recolección, utilizando lápiz para evitar la pérdida de información durante el proceso de preservación.
- k) Las muestras se agruparon, aseguraron con fibra de polipropileno y se almacenaron en bolsas plásticas transparentes, las cuales fueron rociadas con alcohol al 70 % para prevenir la proliferación de hongos y otros microorganismos.
- l) Finalmente, los paquetes fueron transportados al Jardín Botánico de Medellín para su identificación taxonómica.

● Obtención de muestras de suelo

La recolección de muestras de suelo se realizó siguiendo los lineamientos técnicos proporcionados por Biofertilizar S.A.S., diferenciando el muestreo para análisis físico-químico y para análisis microbiológico.

Muestras para análisis físico y químico del suelo

- a) Dentro de la parcela se retiraron manualmente las malezas y la hojarasca superficial en un área aproximada de 40×40 cm.
- b) Se introdujo la pala a una profundidad de entre 10 y 15 cm, realizando un hueco en forma de “V”. De una de las paredes expuestas se extrajo una porción de suelo de aproximadamente $10 \times 10 \times 3$ cm, la cual se transfirió a un balde limpio.
- c) Este procedimiento se repitió en varios puntos de la parcela.
- d) Las submuestras obtenidas se mezclaron homogéneamente, desmenuzando los agregados y retirando piedras, raíces gruesas, lombrices e insectos.
- e) De la mezcla final se transfirió aproximadamente 1 kg de suelo a una bolsa limpia.
- f) La bolsa fue cerrada, etiquetada y almacenada en refrigeración hasta su envío al laboratorio.

Muestras para análisis microbiológico

- a) Se retiró la hojarasca y la materia orgánica superficial del suelo.
- b) Con ayuda de un palín se tomó una muestra a la profundidad correspondiente a las raíces absorbentes de la planta, procurando incluir una cantidad representativa de raíces finas.
- c) La muestra se depositó en un recipiente amplio previamente lavado y desinfectado con alcohol.
- d) El procedimiento se repitió en varios puntos dentro de la parcela.
- e) Una vez recolectadas todas las submuestras, estas se homogenizaron cuidadosamente.
- f) De la mezcla resultante se extrajo una porción de entre 200 y 300 g, la cual se introdujo en una bolsa plástica nueva, sellada dejando una pequeña cantidad de aire en su interior y debidamente etiquetada.
- g) Las muestras se conservaron en refrigeración, procurando que el tiempo entre la recolección y la recepción en el laboratorio no superara las 72 horas.
- h) Finalmente, las muestras fueron transportadas a Biofertilizar S.A.S., ubicado en la Cra 65 #34-120, local 102, barrio Conquistadores, Medellín, para su análisis microbiológico.

- VI. **Análisis de suelos y microbiota.** Las muestras de suelo fueron enviadas al laboratorio para el análisis de sus características físicas, químicas y biológicas. La evaluación microbiana incluirá la identificación de grupos funcionales como microorganismos celulolíticos, proteolíticos, solubilizadores de fósforo, fijadores de nitrógeno y esporas micorrízicas. Se realizará también un análisis de colonización micorrízica en raíces finas para determinar el grado de simbiosis presente. Los resultados permitirán establecer la presencia o ausencia de los principales grupos funcionales, los cuales se consideran indicadores de estabilidad y salud del suelo.
- VII. **Síntesis e interpretación de resultados.** Con la información obtenida se elaborará una síntesis comparativa entre sitios, identificando patrones de vegetación, composición microbiana y características edáficas. Esta información servirá como insumo para definir los criterios de selección de especies y microorganismos asociados, orientados al fortalecimiento de la estabilidad ecológica y estructural de las laderas.

Avances, análisis y resultados en visitas preliminares a sitios de interés para la caracterización ecológica

Con el fin de identificar zonas viables para el estudio de procesos de sucesión vegetal en movimientos en masa (MM), se realizaron tres recorridos preliminares en zonas priorizadas. A continuación, se presenta el resumen de cada recorrido, junto con las observaciones de campo y las conclusiones de viabilidad por sitio.

Recorrido 1: Caldas La Estrella y San Antonio de Prado

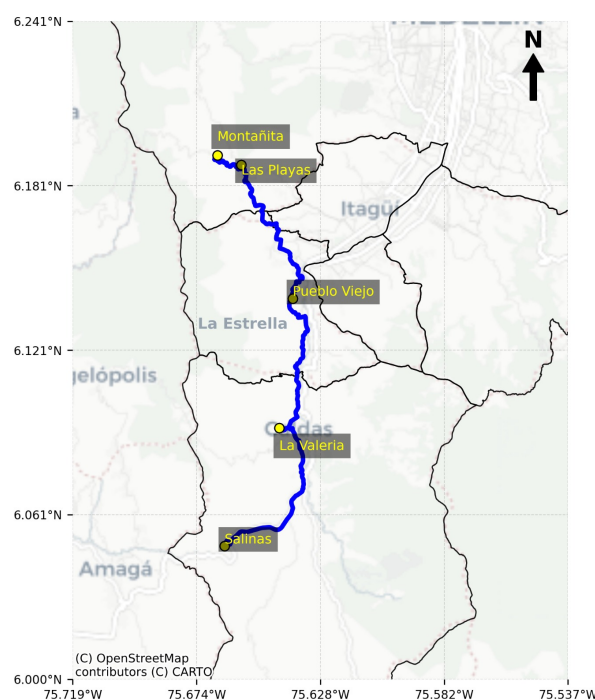


Figura 15. Recorrido 1. Sitios visitados y trazado general.

Salinas

En este sitio se observa un movimiento en masa con un proceso sucesional activo, principalmente en las partes media y baja, dominado por gramíneas y algunas especies secundarias menores a 1.5 m. Se identificó presencia de Melastomataceae, maní forrajero, chuscalito y ojo de poeta. El horizonte orgánico es delgado salvo en la parte baja. **Conclusión:** El sitio se considera **viable** para el estudio y la toma de muestras.

La Valeria

La parte alta está ocupada por una casa finca, con pasto podado y un árbol inclinado con pérdida de soporte radicular. La parte baja presenta fuerte inestabilidad, vegetación sucesional densa y grietas de gran tamaño poco visibles por la cobertura. **Conclusión:** El sitio **no es viable** para el estudio debido a las condiciones inestables del terreno.

Pueblo Viejo

Es un MM de gran extensión con claros procesos sucesionales: gramíneas y helechos en las partes alta y baja, y especies secundarias en la parte media. Se observan intervenciones antrópicas (huertas, cultivos dispersos). Existen zonas amplias con potencial para análisis. **Conclusión:** Es **viable**, pero se recomienda analizar cartografía previa para seleccionar zonas óptimas.

Montañita

Al momento de la visita se observó un nuevo desprendimiento que eliminó la vegetación sucesional previa. **Conclusión:** El sitio **no es viable** debido a la recurrencia de inestabilidad.

Las Playas

MM de gran dimensión, expuesto en su parte alta. Las zonas media y baja presentan vegetación abundante; destacan gramíneas, especies secundarias y plántulas de eucalipto, indicando condiciones edáficas favorables. El terreno estaba encharcado pese a la hora de visita (2:00 pm). **Conclusión:** Posee un proceso sucesional interesante, pero el sitio es **potencialmente inestable**. Requiere análisis cartográfico y evaluación de riesgo antes de programar muestreo.

Recorrido 2: Bello y Medellín



Figura 16. Recorrido 2. Sitios visitados y trazado general.

La Gabriela

El sitio presenta un proceso sucesional avanzado consolidado por más de 15 años. Se observaron árboles grandes (> 20 m), gramíneas, leguminosas y especies vegetales introducidas. La parte baja está en zona habitada. **Conclusión:** Es **viable**, pero requiere coordinación comunitaria y análisis histórico para seleccionar las zonas clave.

La Bermejala

Sitio con vegetación densa pese a solo 4 años de restauración natural. Dominan especies pioneras como carbonero y yarumo. Imágenes de cámaras SIATA muestran zonas clave con diferentes tasas de recuperación. **Conclusión:** Es **viable**, pero debe coordinarse la visita con la comunidad y complementarse con análisis cartográfico y de estabilidad.

Los Balsos

Movimiento de masa muy reciente con obras de contención activas. No se observan especies que indiquen inicio de sucesión vegetal. **Conclusión:** El sitio **no es viable** para el estudio.

Recorrido 3: Medellín

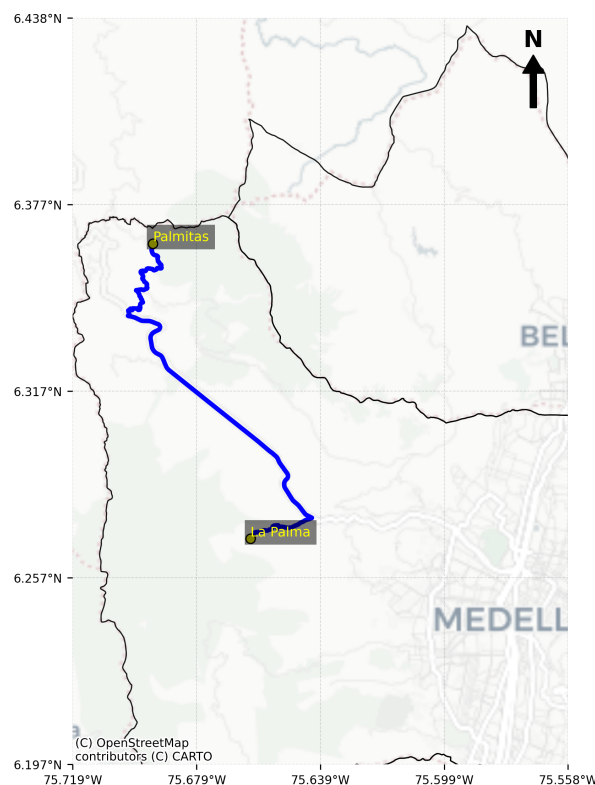


Figura 17. Recorrido 3. Sitios visitados y trazado general.

Palmitas

Zona con vegetación densa y árboles entre 5 y 20 m. Existen dudas sobre si el MM eliminó parte de la vegetación o si se trata de un movimiento rotacional con conservación parcial. Se identifican áreas con remoción total que pueden ser clave para analizar la sucesión. **Conclusión:** Viable, pero requiere análisis histórico y coordinación comunitaria.

La Palma

Zona con alta intervención antrópica y presencia predominante de pinos, ciprés y gramíneas. Podría corresponder a un MM rotacional en el que la vegetación no fue completamente removida. **Conclusión:** Requiere verificación mediante imágenes históricas para confirmar si existe proceso sucesional.

Avance en Análisis multitemporal de la cobertura vegetal a partir de imágenes.

Como parte del desarrollo del análisis multitemporal de la cobertura vegetal, se generaron productos cartográficos preliminares para algunos de los sitios evaluados durante los recorridos de campo. Estos

avances permiten contrastar las observaciones in situ con la dinámica espacial de la vegetación en el tiempo, así como apoyar la toma de decisiones respecto a la viabilidad de los sitios para la selección de puntos de muestreo.

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a todos los sitios visitados.

La Palma

El análisis multitemporal realizado para el sitio La Palma evidencia un patrón espacial *continuo* de ganancia de cobertura vegetal dentro del polígono asociado al movimiento en masa (Figura 18). En particular, se identifican múltiples sectores con *ganancia moderada* y una presencia notable de *ganancia significativa*, lo cual sugiere una dinámica de recuperación vegetal sostenida y espacialmente coherente.

Este resultado es consistente con la identificación de áreas con cobertura establecida y posibles procesos sucesionales en el sitio. La distribución continua de las ganancias observadas permite delimitar zonas prioritarias para la selección de puntos de muestreo, orientadas a capturar gradientes de recuperación (p.ej., transiciones entre ganancia moderada y significativa).

En este contexto, los productos multitemporales respaldan la priorización del sitio La Palma para análisis detallados de sucesión y suelos, y constituyen un insumo directo para la planificación del muestreo en campo.

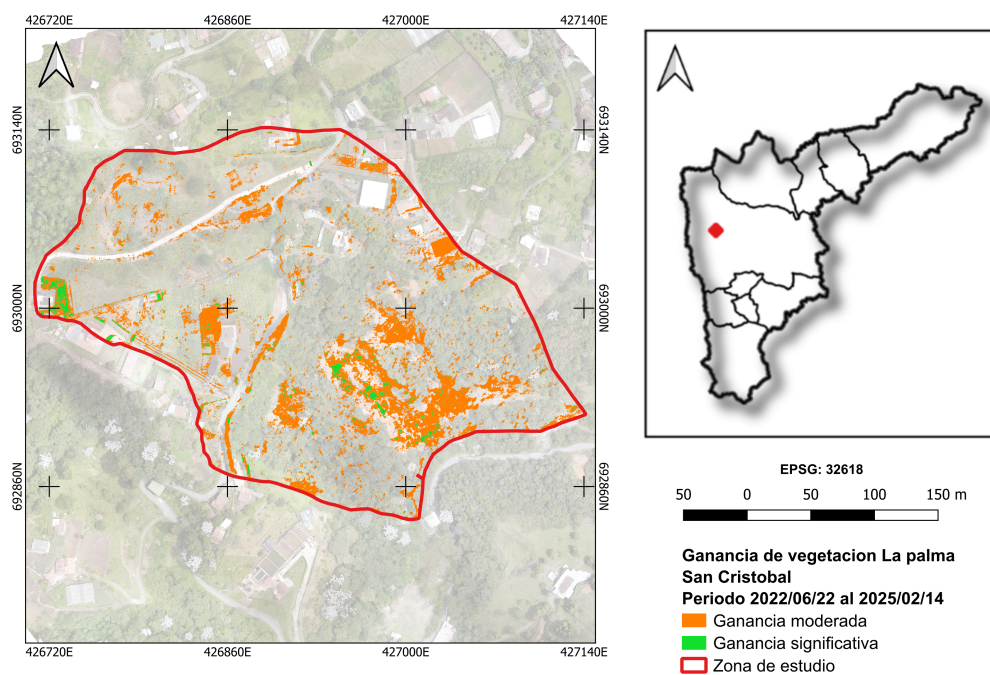


Figura 18. Ganancia de cobertura vegetal identificada mediante análisis multitemporal en el sitio La Palma.

Pueblo Viejo

En el sitio Pueblo Viejo, el análisis multitemporal muestra una presencia *limitada* de áreas con *ganancia moderada* y no evidencia zonas de *ganancia significativa* dentro del polígono del movimiento en masa (Figura 19). Las zonas detectadas son escasas y presentan una distribución fragmentada, lo cual sugiere que, para el período analizado, la dinámica de recuperación vegetal no es dominante o no es claramente capturada por el indicador utilizado.

Estos resultados indican que la delimitación de zonas óptimas de muestreo no puede basarse únicamente en la señal de ganancia de cobertura vegetal, y que se requiere complementar el análisis con (i) revisión de ortofotos históricas adicionales, (ii) contraste directo con observaciones de campo y (iii) verificación de posibles efectos de intervención antrópica, sombreado o condiciones de adquisición de las imágenes que puedan afectar la respuesta espectral.

En consecuencia, el sitio Pueblo Viejo se mantiene como un caso que requiere análisis cartográfico complementario para sustentar la selección de zonas de muestreo y la interpretación sucesional.

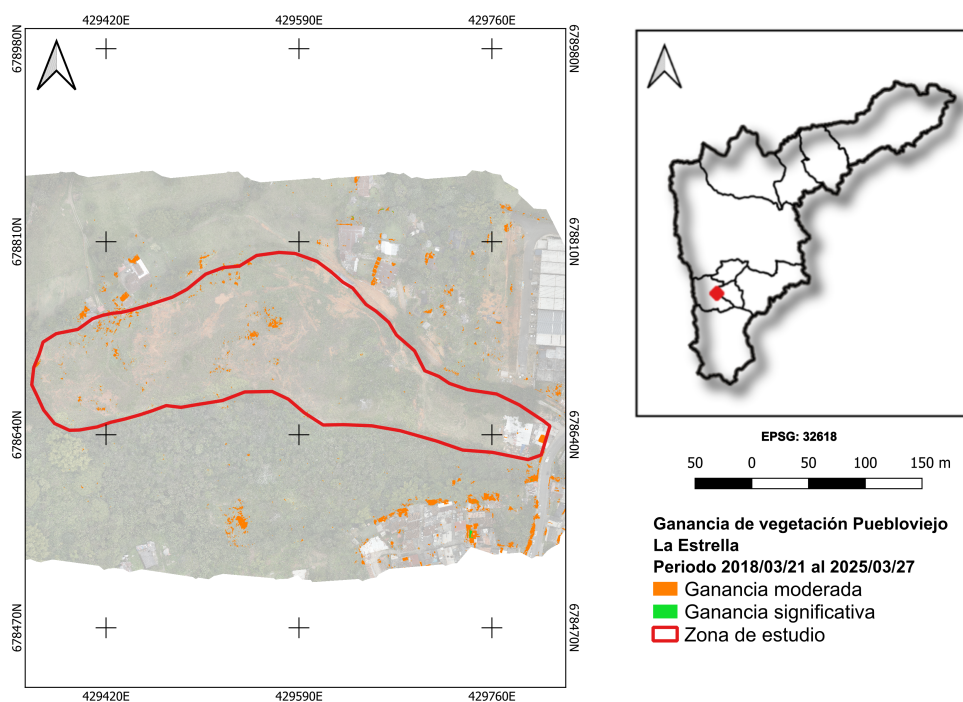


Figura 19. Ganancia de cobertura vegetal identificada mediante análisis multitemporal en el sitio Pueblo Viejo.

La Bermejala

El análisis multitemporal de la cobertura vegetal para el sitio La Bermejala muestra una *amplia y continua presencia de ganancia moderada* distribuida de forma relativamente homogénea dentro del polígono del movimiento en masa (Figura 20). No se identifican áreas extensas con *ganancia significativa*.

La continuidad espacial de la ganancia moderada sugiere un proceso de recuperación vegetal activo y sostenido, coherente con un escenario de sucesión temprana a intermedia, en concordancia con las observaciones de campo que reportan una cobertura dominada por especies pioneras.

En este contexto, el sitio La Bermejala se considera adecuado para la selección de puntos de muestreo orientados a evaluar etapas iniciales de sucesión vegetal, priorizando sectores con mayor continuidad espacial de la señal de ganancia.

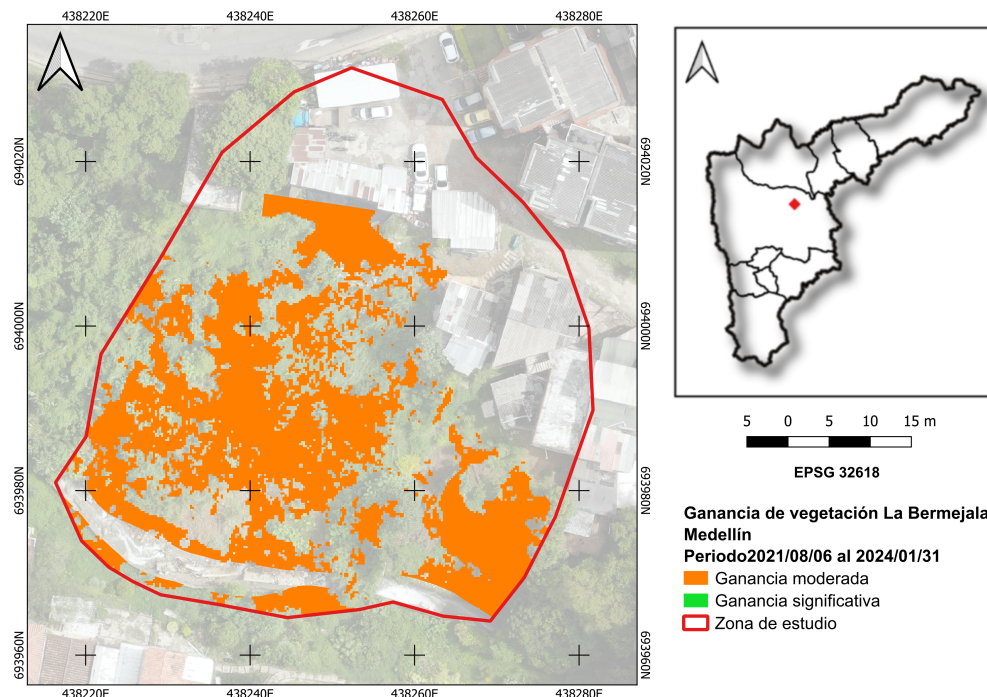


Figura 20. Ganancia de cobertura vegetal identificada mediante análisis multitemporal en el sitio La Bermejala.

La Gabriela

El producto multitemporal del sitio La Gabriela evidencia una *alta dominancia de ganancia moderada* ampliamente distribuida dentro del polígono del movimiento en masa (Figura 21), con una señal densa y persistente en la mayor parte del área analizada.

Este patrón es consistente con un proceso sucesional avanzado, en el cual la cobertura vegetal ya se encuentra establecida y las variaciones detectadas corresponden principalmente a incrementos graduales de biomasa o densidad vegetal, más que a procesos de colonización reciente. La señal homogénea sugiere estabilidad relativa del terreno y continuidad en la dinámica ecológica del sitio.

En consecuencia, La Gabriela constituye un sitio apropiado para estudios comparativos entre etapas avanzadas de sucesión, así como para la evaluación de suelos y estructuras vegetales consolidadas, considerando siempre las restricciones asociadas a la cercanía de zonas habitadas.

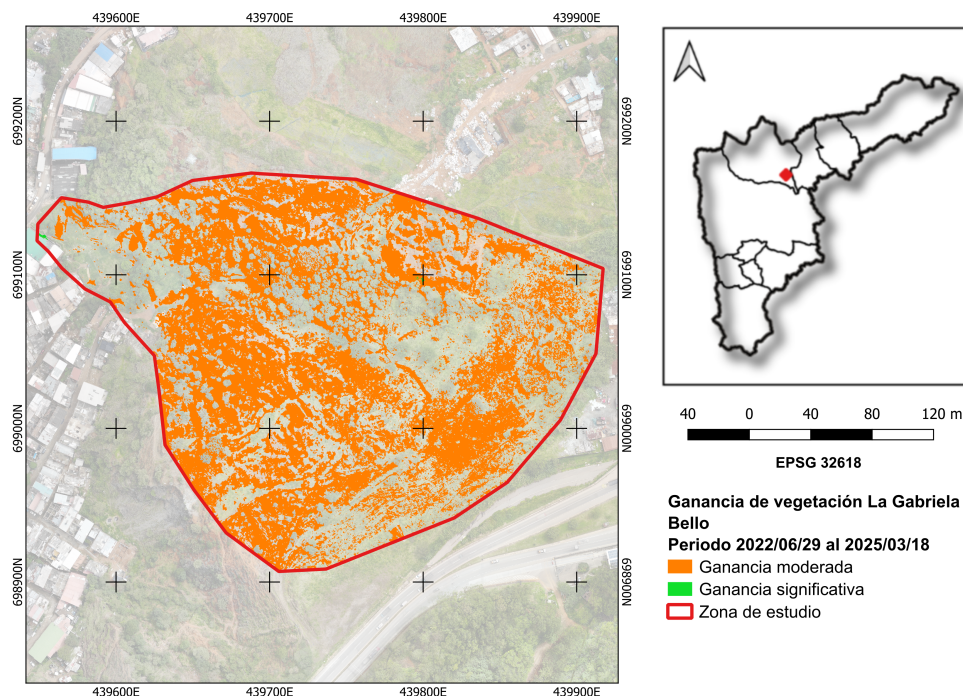


Figura 21. Ganancia de cobertura vegetal identificada mediante análisis multitemporal en el sitio La Gabriela.

Las Playas

El análisis multitemporal del sitio Las Playas revela un patrón espacial contrastante, caracterizado por la coexistencia de *ganancia moderada* ampliamente distribuida y sectores continuos con *ganancia significativa*, principalmente a lo largo del eje longitudinal del movimiento en masa (Figura 22).

La presencia de corredores con ganancia significativa sugiere zonas donde la recuperación vegetal ha sido más intensa, posiblemente asociada a acumulación de humedad, deposición de material fino o menor perturbación posterior al evento inicial. Este patrón indica un proceso sucesional activo, pero espacialmente heterogéneo, lo que puede reflejar diferencias locales en estabilidad y condiciones edáficas.

Si bien el sitio presenta un alto interés desde el punto de vista sucesional, la marcada elongación del movimiento y la intensidad variable de la señal de ganancia refuerzan la necesidad de evaluar cuidadosamente la estabilidad del terreno antes de definir puntos de muestreo, priorizando sectores con continuidad espacial y menor riesgo geomorfológico.

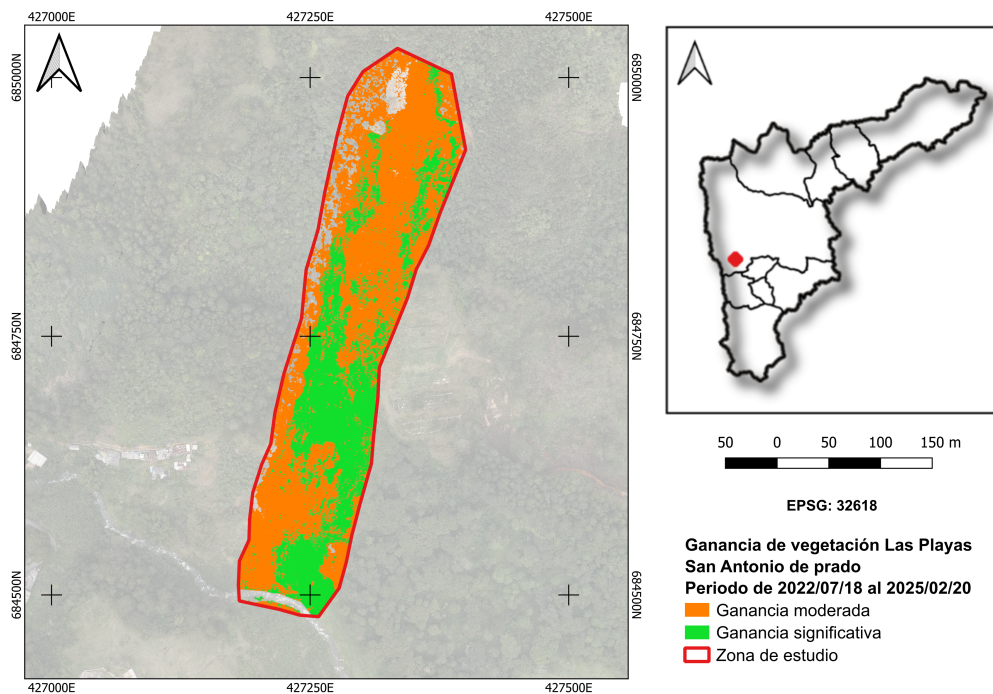


Figura 22. Ganancia de cobertura vegetal identificada mediante análisis multitemporal en el sitio Las Playas.

Palmitas

En el sitio Palmitas, el análisis multitemporal muestra una *predominancia de ganancia moderada* distribuida de manera amplia dentro del polígono del movimiento en masa, acompañada por parches aislados de *ganancia significativa* concentrados principalmente en sectores centrales y de transición (Figura 23).

La distribución fragmentada de las áreas con mayor ganancia sugiere un proceso de recuperación vegetal no homogéneo, posiblemente condicionado por la geometría del movimiento, la preservación parcial de la cobertura original y variaciones locales en la remoción de material. Este comportamiento es coherente con la hipótesis de un movimiento rotacional con remoción diferencial de la vegetación.

Estos resultados respaldan la viabilidad del sitio para estudios sucesionales, aunque resaltan la importancia de integrar información histórica adicional para diferenciar zonas de recolonización reciente frente a áreas de vegetación remanente.

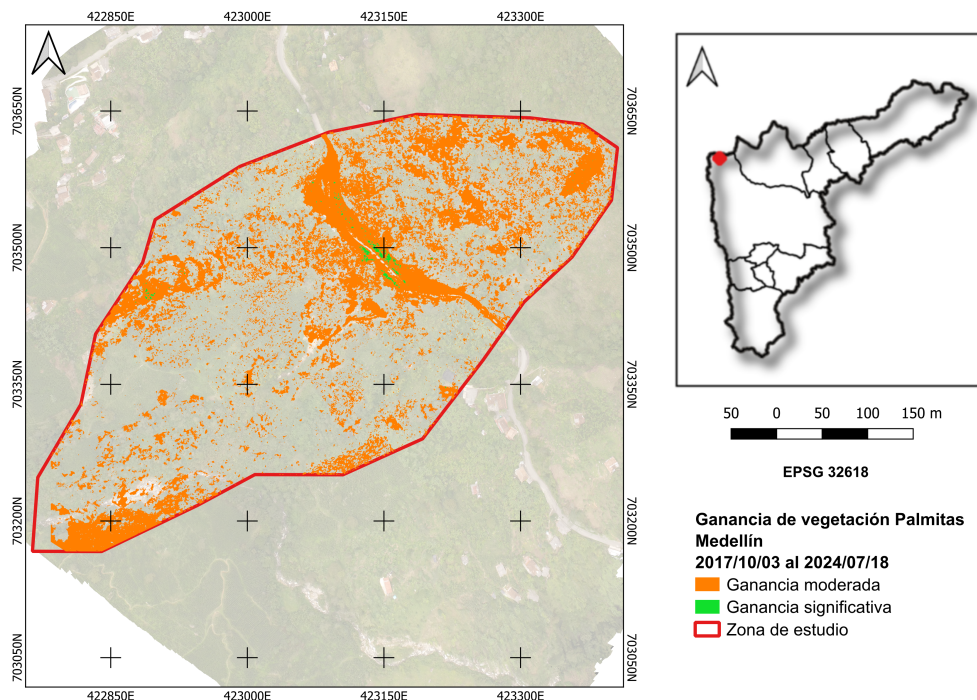


Figura 23. Ganancia de cobertura vegetal identificada mediante análisis multitemporal en el sitio Palmitas.

Salinas

El producto multitemporal correspondiente al sitio Salinas muestra una *ganancia moderada dominante* distribuida a lo largo de casi todo el polígono del movimiento en masa (Figura 24), con una presencia muy limitada de *ganancia significativa*, restringida a pequeños parches aislados.

Este patrón indica un proceso de recuperación vegetal activo pero de intensidad moderada, compatible con etapas tempranas de sucesión dominadas por coberturas herbáceas y especies pioneras. La señal relativamente homogénea sugiere estabilidad suficiente para el establecimiento vegetal, aunque sin evidencias de una recuperación estructural avanzada.

En conjunto, el análisis multitemporal respalda la viabilidad del sitio Salinas para la toma de muestras orientadas a caracterizar procesos iniciales de sucesión vegetal y su relación con las condiciones del suelo.

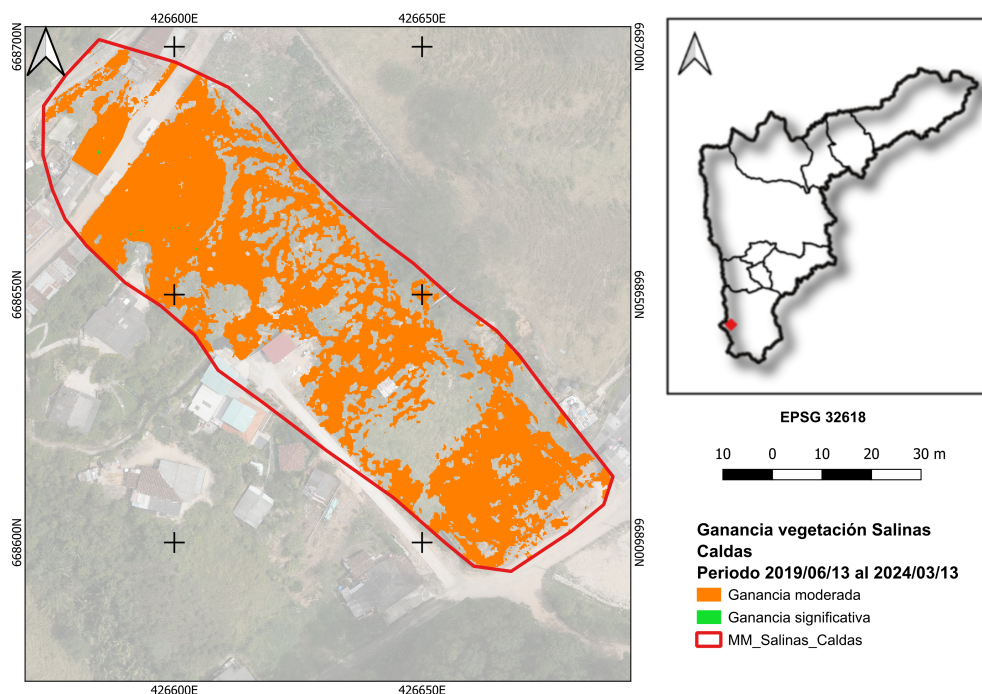


Figura 24. Ganancia de cobertura vegetal identificada mediante análisis multitemporal en el sitio Salinas.

Avances en la selección de puntos viables y toma de muestras

Como resultado de las etapas previas de análisis multitemporal de la cobertura vegetal y de la revisión cartográfica de los eventos de movimientos en masa, se determinaron inicialmente puntos potenciales de muestreo para cada uno de los sitios priorizados. Estos puntos fueron definidos con base en criterios espaciales y temporales asociados a la dinámica de la cobertura vegetal, particularmente en zonas donde se evidenciaron procesos de sucesión vegetal activa.

No obstante, durante las visitas de campo se identificó que, en la mayoría de los casos, los puntos potenciales definidos en gabinete debieron ser ajustados. Dichos ajustes fueron realizados directamente en campo, atendiendo a condiciones reales del terreno que no eran completamente capturables a partir del análisis remoto. Entre los principales factores considerados para la redefinición de los puntos de muestreo se incluyeron la estabilidad local del terreno, la accesibilidad segura al sitio, las pendientes presentes y condiciones particulares donde se observó un mejor desarrollo de la vegetación y una mayor representatividad de los procesos sucesionales.

Cabe resaltar que el sitio correspondiente a **La Palma** fue finalmente descartado como punto de muestreo. Se evidenció que las zonas donde se observaban procesos sucesionales presentaban condiciones de acceso altamente restrictivas, con pendientes muy elevadas y una topografía que no permitía realizar el muestreo de manera segura ni técnicamente adecuada. Por esta razón, y con el fin de no comprometer la integridad del equipo ni la calidad de las muestras, se tomó la decisión de excluir este sitio del proceso de toma de muestras.

La información detallada de cada salida de campo, incluyendo las actividades realizadas, fechas, sitios

visitados, personal asistente y observaciones relevantes, se encuentra consignada en los formatos de salida de campo debidamente diligenciados, los cuales se presentan en la sección de **Anexos**. Así mismo, en dicha sección se incluye el **permiso de colecta vegetal** que fue gestionado y aprobado para el desarrollo de las actividades de muestreo descritas en este estudio.

A continuación, se presentan los insumos cartográficos correspondiente a los sitios que ya fueron visitados en campo, específicamente **Salinas, Pueblo Viejo y Las Playas**. En estos se muestran los puntos potenciales de muestreo definidos inicialmente, los puntos reales finalmente seleccionados en campo y registros fotográficos representativos de cada uno de los sitios.

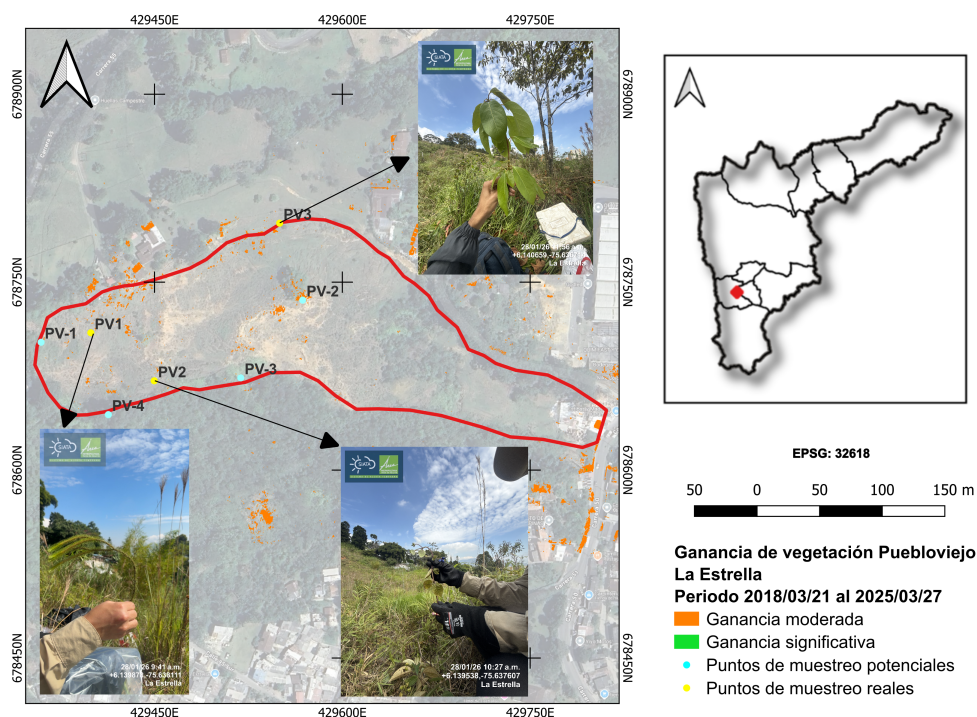


Figura 25. Sitio Pueblo Viejo. Comparación entre los puntos potenciales de muestreo definidos en gabinete y los puntos reales seleccionados en campo, junto con registros fotográficos representativos de los puntos de muestreo.

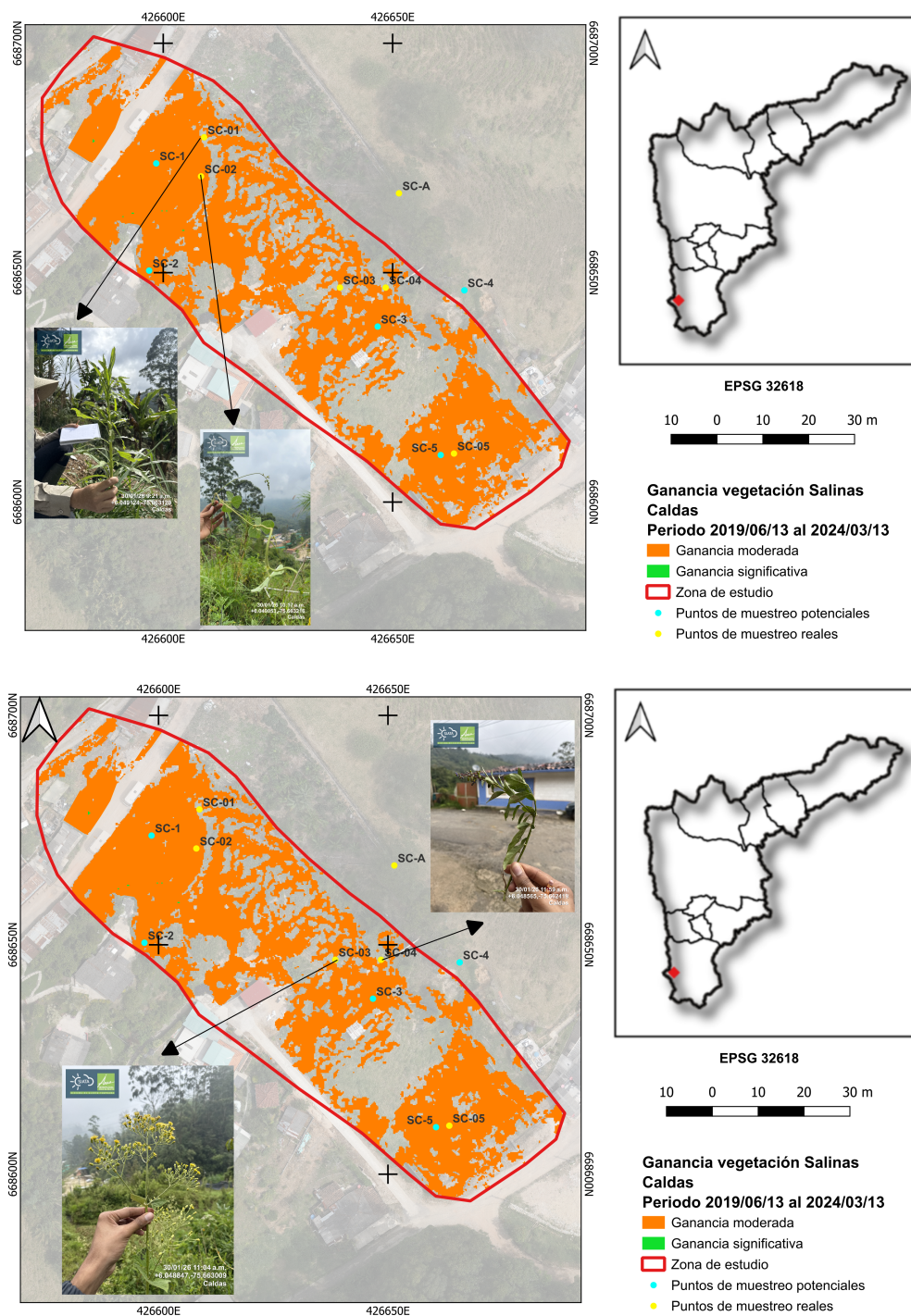


Figura 26. Sitio Salinas. Mapa de puntos potenciales y puntos reales de muestreo definidos durante la visita de campo. Las subfiguras incluyen registros fotográficos de los puntos reales seleccionados.

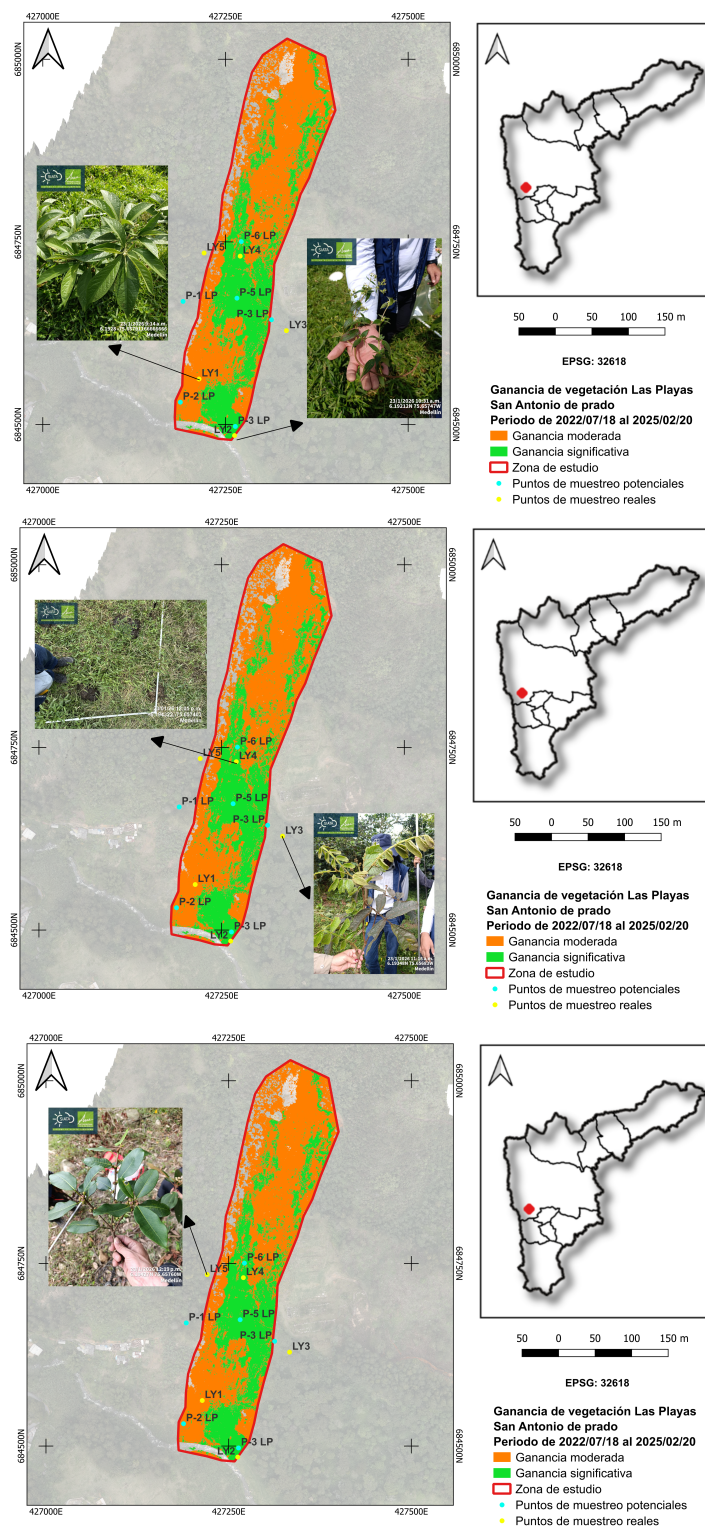


Figura 27. Sitio Las Playas. Mapa de puntos potenciales y puntos reales de muestreo definidos durante la visita de campo. Las subfiguras presentan registros fotográficos de los puntos reales seleccionados.

Sección 3.2 Análisis de la implementación

En esta sección del documento se consolidan los criterios técnicos, físicos y ambientales necesarios para evaluar la viabilidad de implementación de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN). En esta sección se presenta la estructuración de una matriz cualitativa, la cual funcionará como herramienta para el análisis comparativo y la toma de decisiones en la selección e implementación de alternativas SbN.

Desarrollo de criterios para la selección de sitios adecuados para la aplicación de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) y/o soluciones híbridas.

Los sitios inestables con síntomas de movimientos en masa deben estudiarse detalladamente considerando factores socioeconómicos, geotécnicos, científicos y de riesgo, con el fin de comprender las condiciones sociales, el nivel de amenaza y el mecanismo de falla antes de implementar SbN o soluciones híbridas. Estas soluciones son más adecuadas para deslizamientos superficiales y de movimiento lento, y generalmente no son efectivas en casos de caída de rocas o deslizamientos profundos o rápidos. Por ello, es necesario establecer criterios para la preselección de sitios, que permitan identificar las ubicaciones más apropiadas para la implementación de SbN e híbridas.

Descripción de los criterios de selección

Los siguientes criterios de selección se basan en las directrices establecidas en el *Guidance Document on the Use of Nature-Based Solutions for Landslide Risk Reduction* (Asian Disaster Preparedness Center, 2019), donde se recomienda emplear un conjunto de criterios técnicos, ambientales y sociales para priorizar sitios adecuados para la implementación de SbN y soluciones híbridas en la gestión del riesgo por movimientos en masa.

Se emplean seis criterios principales para la preselección de sitios destinados a la aplicación de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) y soluciones híbridas. A cada criterio se le asigna un factor de ponderación según su contribución a la implementación efectiva de estas soluciones en la gestión del riesgo por movimientos en masa.

La ponderación utiliza una escala de 0 a 5. La Tabla 7 presenta los factores de ponderación asignados a cada criterio.

Tabla 7. Factores de ponderación asignados a los criterios de selección de sitios.

Nombre del criterio	Factor de ponderación
Profundidad del plano de falla	5
Tasa de movimiento potencial	5
Inclinación (en grados)	5
Idoneidad para el establecimiento de cobertura vegetal	5
Desafíos de sostenibilidad y mantenimiento	3
Pérdida probable considerando los elementos expuestos en la zona de impacto	5

Profundidad del plano de falla

Este criterio se divide en cinco categorías, a cada una de las cuales se asigna una puntuación entre 0 y 4, tal como se muestra en la Tabla 8. La categoría “profunda” recibe la puntuación más baja, ya que la aplicación de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) resulta poco efectiva en este tipo de sitios. No obstante, las SbN pueden emplearse de forma complementaria para reducir la erosión del suelo y evitar la formación de cárcavas.

Tabla 8. Puntuaciones asignadas según la profundidad del plano de falla.

Nombre de la categoría	Posibilidad de implementar SbN	Puntuación
Superficial (<0.5 m)	Muy alta	4
Somera (0.5 – 3 m)	Alta	3
Media (3 – 8 m)	Media	2
Profunda (8 – 15 m)	Baja	1
Muy profunda (>15 m)	Muy baja	0

Tasa de movimiento potencial

Las soluciones basadas en la naturaleza son más favorables para zonas de deslizamientos que se mueven lentamente.

Tabla 9. Puntuaciones asignadas según la tasa de movimiento.

Nombre de la categoría	Posibilidad de implementar SbN	Puntuación
Lento (efecto de reptación; observaciones en el sitio incluyen inclinación de árboles)	Alta	3

Continúa en la siguiente página

Tabla 9 – Continuación de la página anterior.

Nombre de la categoría	Posibilidad de implementar SbN	Puntuación
Moderado a rápido	Muy baja	0

Inclinación (en grados)

La vegetación puede emplearse como cobertura superficial en la mejora o estabilización de taludes siempre que las pendientes no sean demasiado pronunciadas. A medida que el ángulo de la pendiente aumenta, el espesor del suelo tiende a reducirse, lo cual representa un factor desfavorable para el crecimiento de la vegetación. Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, se asignan puntuaciones para cada categoría de pendiente, tal como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Puntuaciones asignadas según la inclinación.

Nombre de la categoría	Posibilidad de implementar SbN	Puntuación
Categoría de inclinación I ($>40^\circ$)	Muy baja	0
Categoría de inclinación II ($31-40^\circ$)	Baja	1
Categoría de inclinación III ($17-31^\circ$)	Media	2
Categoría de inclinación IV ($11-17^\circ$)	Alta	3
Categoría de inclinación V ($0-10^\circ$)	Muy alta	4

Idoneidad para la creación de cobertura vegetal

Al asignar puntuaciones a cada categoría, se consideran factores como el espesor del suelo, la presencia de rocas o bloques y las condiciones climáticas del ecosistema existente.

Tabla 11. Puntuaciones asignadas según la idoneidad para la creación de cobertura vegetal.

Nombre de la categoría	Posibilidad de implementar SbN	Puntuación
Categoría I (Mayor parte del terreno cubierta por rocas)	Muy baja	0
Categoría II (Espesor del suelo menor a 0.5 m y periodos secos prolongados)	Baja	1
Categoría III (Espesor del suelo mayor a 0.5 m y ecosistema con lluvia promedio)	Media	2
Categoría IV (Espesor del suelo mayor a 0.5 m y ecosistema con lluvia razonable)	Alta	3

Desafíos de sostenibilidad y mantenimiento

Es fundamental adoptar un enfoque que priorice la construcción acompañada de seguimiento, evaluación y mantenimiento continuo, en lugar de limitarse a ejecutar la obra y abandonarla una vez finalizada. La efectividad de una intervención basada en la naturaleza depende en gran medida de su monitoreo posterior y de la capacidad para realizar ajustes a lo largo del tiempo.

Cuando una medida requiere altos costos de mantenimiento o su sostenibilidad está condicionada por factores externos —como la presión antrópica, la falta de gestión local o condiciones ambientales adversas—, su aplicación puede resultar poco viable, reduciendo su calificación dentro del proceso de selección.

Asimismo, debe analizarse si la intervención propuesta puede generar beneficios económicos o sociales adicionales, por ejemplo, mediante la recuperación de suelos, la producción forestal sostenible o el fortalecimiento de medios de vida comunitarios.

Tabla 12. Puntuaciones asignadas según desafíos de sostenibilidad y mantenimiento.

Nombre de la categoría	Posibilidad de implementar SbN	Puntuación
Categoría I (Sostenibilidad muy baja, requiere mantenimiento alto y no genera beneficios económicos)	Muy baja	0
Categoría II (Sostenibilidad baja, mantenimiento moderado y beneficios económicos mínimos)	Baja	1
Categoría III (Sostenibilidad razonable, mantenimiento manejable y algunos beneficios económicos)	Media	2
Categoría IV (Buena sostenibilidad, bajo mantenimiento y beneficios económicos claros)	Alta	3
Categoría V (Alta sostenibilidad, mínimo mantenimiento y beneficios económicos significativos)	Muy alta	4

Pérdida probable considerando los elementos expuestos en la zona de impacto

Se deben asignar puntuaciones considerando la magnitud de la pérdida potencial en función de los elementos expuestos dentro de la zona de impacto. Esto incluye aspectos socioeconómicos, ambientales y culturales, como el tamaño de la comunidad, el número de viviendas, comercios e instituciones.

Tabla 13. Puntuaciones asignadas según la pérdida probable considerando los elementos expuestos en la zona de impacto.

Nombre de la categoría	Puntuación
Categoría I (Pérdida muy baja: pocos elementos expuestos, impacto limitado a la comunidad)	0
Categoría II (Pérdida baja: algunos edificios residenciales o comercios afectados, impacto local)	1
Categoría III (Pérdida media: número moderado de viviendas e instituciones, impacto considerable)	2
Categoría IV (Pérdida alta: gran número de edificios y comercios afectados, impacto importante)	3
Categoría V (Pérdida muy alta: comunidad extensa y muchos elementos expuestos, impacto crítico)	4

Método para calcular la puntuación final de cada sitio

Las puntuaciones asignadas en cada subcategoría deben multiplicarse por el factor de ponderación correspondiente que se muestra en la Tabla 7. La puntuación final se obtiene calculando el promedio ponderado:

$$\text{Puntuación Final} = \frac{\sum_{i=1}^n [W_i \times S_i]}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

donde:

n – número de criterios

W – peso asignado a cada criterio

S – puntuación asignada a cada criterio

La puntuación final se basa en una escala de 4. El sitio con la puntuación más alta, respecto a un valor umbral de 2.0, se considera adecuado para la implementación de SbN y soluciones híbridas.

Avances en Metodología para la selección de técnicas de bioingeniería

La siguiente tabla presenta una síntesis de medidas de bioingeniería y soluciones basadas en vegetación aplicables a distintos procesos de inestabilidad del terreno, como el movimiento en masa y la erosión. Su objetivo principal es servir como herramienta de apoyo para la selección de la obra o técnica más adecuada, en función del fenómeno identificado, su tipo, la pendiente del terreno, la tasa de movimiento y el material predominante. Para ello, se relacionan estas variables con diferentes alternativas constructivas —como fajinas, capas de ramas, muros vegetados o trinchos vivos— y se incluye la fuente bibliográfica que respalda cada intervención, facilitando una toma de decisiones técnica y contextualizada según las condiciones específicas del sitio.

Tabla 14. Matriz para la selección de técnicas de bioingeniería.

Fenómeno	Tipo	Pendiente	Tasa de movimiento	Material	Obra	Fuente
Movimiento en masa	Superficial	II-III-IV-V		Arena/Arcilla Rocas	Fajinas vivas	Lopez (2002) Norris et al. (2008) Lewis (2000)
		III-IV-V		Arena/Arcilla	Empaquetado de ramas	Lopez (2002) Ministry of Agriculture Food and Fisheries (2004) Norris et al. (2008)
		III-IV-V		Arena/Arcilla	Capas de ramas	Ministry of Agriculture Food and Fisheries (2004) Rodríguez et al. (2019) Norris et al. (2008)
				Arena/Arcilla	Plantación conjunta	Campbell et al. (2008)
		I-II		Arena/Arcilla	Cercas de mimbre	Atkins (2001) Norris et al. (2008)
				Arcilla	Estacas vivas (Estaquillado)	
		I-II		Arena/Arcilla	Terrazas	
		I-II		Arena/Arcilla	Trinchos vivos escalonados o de ladera	CAR (2015) Suarez (2001)
		I-II		Arcilla	Pantallas	CAR (2015)
				Arena/Arcilla	Capas de ramas	Ministry of Agriculture Food and Fisheries (2004) Rodríguez et al. (2019a) Norris et al. (2008)
		I-II-III		Arena/Arcilla	Muro de cribas	Ministry of Agriculture Food and Fisheries (2004) Rodríguez et al. (2019a) Norris et al. (2008)
		I-II-III		Arena/Arcilla	Muro de gaviones con vegetación	Lopez (2002) Campbell et al. (2008) Rodríguez et al. (2019a) Norris et al. (2008)

Continúa en la siguiente página

Tabla 14 – Continuación de la página anterior.

Fenómeno	Tipo	Pendiente	Tasa de movimiento	Material	Obra	Fuente
	Somera			Arena/Arcilla	Capas de ramas	Ministry of Agriculture Food and Fisheries (2004) Rodríguez et al. (2019) Norris et al. (2008)
		I–II–III		Arena/Arcilla	Muro de cribas	Ministry of Agriculture Food and Fisheries (2004) Rodríguez et al. (2019) Norris et al. (2008)
		I–II–III		Arena/Arcilla	Muro de gaviones con vegetación	Lopez (2002) Campbell et al. (2008) Rodríguez et al. (2019a) Norris et al. (2008)
	Reptación	Baja		Arena/Arcilla	Capas de ramas	Ministry of Agriculture Food and Fisheries (2004) Norris et al. (2008)
		II–III–IV–V		Arena/Arcilla	Fajinas	Lopez (2002) Norris et al. (2008)
	Grietas	NA		Arcilla	Taponamiento	CAR (2015)
Erosión	Escorrentía superficial			Arena/Arcilla	Capas de ramas	Ministry of Agriculture Food and Fisheries (2004) Rodríguez et al. (2019) Norris et al. (2008)
		II–III–IV–V		Arena/Arcilla Rocas	Fajinas vivas	Lopez (2002) Norris et al. (2008) Lewis (2000)
		IV–V		Preferiblemente en arcilla	Colchón de ramas	Ministry of Agriculture Food and Fisheries (2004) Norris et al. (2008)
		IV–V		Arena/Arcilla	Escalonado de matorral	Lopez (2002)
		II–III–IV–V		Arena/Arcilla	Biorrollos	AOPJA (2014)

Continúa en la siguiente página

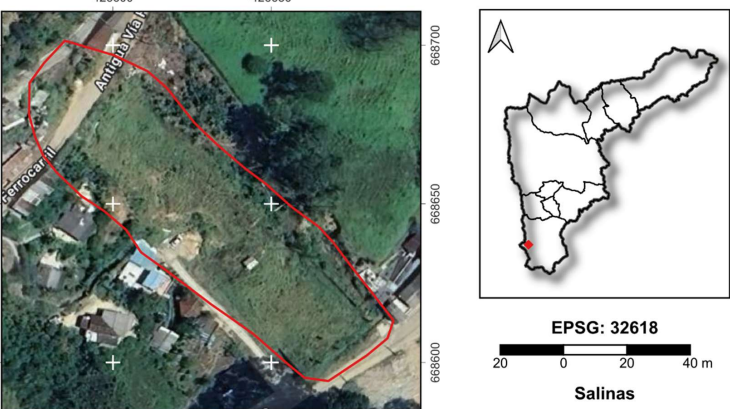
Tabla 14 – Continuación de la página anterior.

Fenómeno	Tipo	Pendiente	Tasa de movimiento	Material	Obra	Fuente
		V		Arena/Arcilla	Acolchonado	AOPJA (2014) Lopez (2002) Suarez (2001) Norris et al. (2008)
		II–III–IV–V		Arena/Arcilla	Plantación vegetal en barrera	AOPJA (2014)
				Arcilla	Filtros vivos – Biofiltros	CAR (2015)
	Erosión lateral y fondo			Arena	Trinchos vivos en vertedero	CAR (2015)

Para determinar la pendiente se debe revisar la Tabla 10 de la sección 3.2 Análisis de la implementación – Inclinación.

Anexos

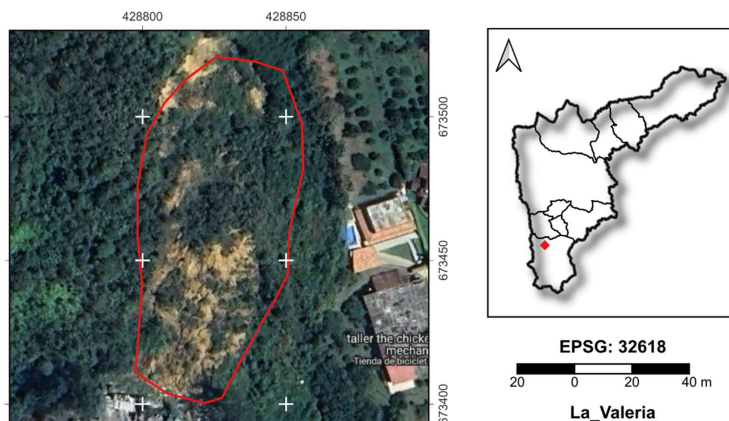
Fichas asociadas a recorridos
preliminares

Nombre del MM	SALINAS
Ubicación geográfica	
	
Descripción general	
Fecha de visita: 27 de octubre de 2025	
Se observa un movimiento en masa en el que se ha iniciado un proceso sucesional, especialmente en las partes baja y media.	
La vegetación está dominada por diferentes especies de gramíneas, aunque se observan algunas especies con crecimiento secundario, que no superan los 1.5 m de altura. Se logró identificar la presencia de individuos de la familia Melastomataceae, maní forrajero, chuscalito y ojo de poeta.	
No se observa un horizonte orgánico considerable, exceptuando en la parte baja, donde se observan gramíneas de mayor porte.	
Conclusión: se observa viable para el estudio y la toma de muestras.	
Registro fotográfico	
	

Nombre del MM

LA VALERIA

Ubicación geográfica



Descripción general

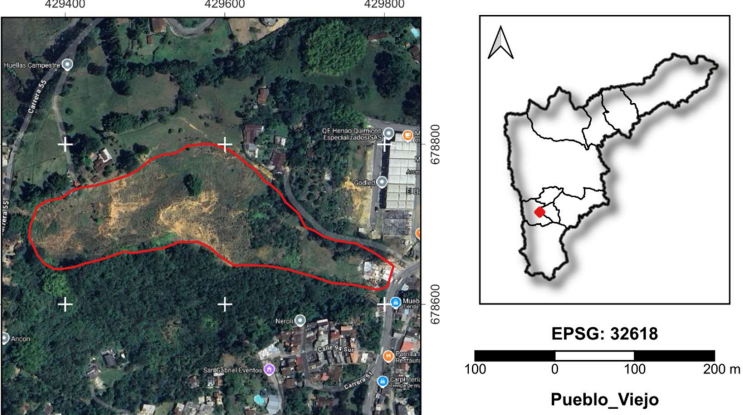
Fecha de visita: 27 de octubre de 2025

La parte alta de la zona de interés, corresponde a una casa finca privada. No se observa vegetación sucesional, solo el pasto de la finca, se infiere que es podado constantemente, y un árbol (posiblemente un balso) inclinado hacia la pendiente, ya que más de la mitad de sus raíces han perdido el suelo que lo rodeaba. El acceso a la parte baja del MM resulta complicado. La zona parece ser muy inestable, tiene vegetación sucesional, no solo de gramíneas sino también de especies secundarias de alto porte. Se observa que el suelo presenta grietas de gran tamaño, no son evidentes a primera vista debido al pasto que hay. Aunque hay un proceso sucesional muy interesante, el ingreso y reconocimiento al área no es fácil.

Conclusión: No resulta viable para el estudio y la toma de muestras debido a las condiciones inestables del terreno.

Registro fotográfico

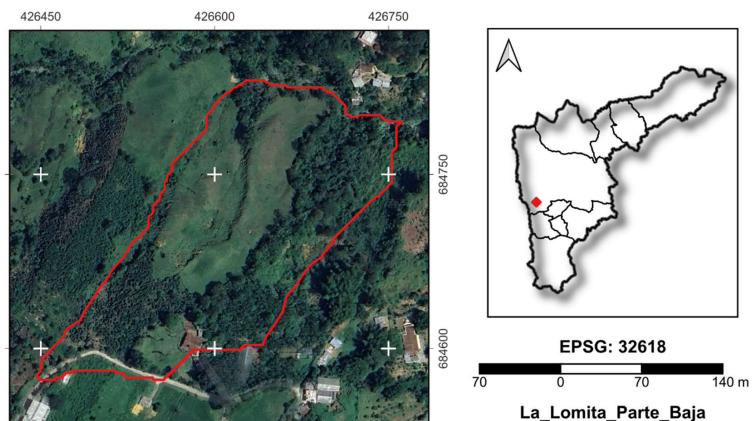


Nombre del MM	PUEBLO VIEJO
Ubicación geográfica	
	
Descripción general	
Fecha de visita: 27 de octubre de 2025	
Es un MM de gran tamaño, que muestra un proceso de sucesión vegetal, caracterizado en la parte alta y baja por gramíneas y helechos, mientras que, en la parte media, se observan especies de crecimiento secundario. Alrededor del MM se encuentran varias viviendas, quienes han utilizado parte del lugar analizado, como huerta y establecido cultivos de pan coger, razón por la cual, se observan algunos individuos de plátano disperso.	
Bordeando el MM, se observan árboles de porte muy alto, entre ellos Eucalipto, sin embargo, no se observa crecimiento de estas especies al interior del MM (debido a la dispersión natural de las semillas), lo que indica que el suelo, tiene características que no permiten el desarrollo natural de especies que no son pioneras.	
Conclusión: en el lugar se encuentran zonas que pueden analizarse para estudiar el proceso sucesional. Puesto que el lugar es tan grande, se sugiere revisar el material cartográfico que posee para determinar las zonas con mejor desempeño.	
Registro fotográfico	
	

Nombre del MM

LA LOMITA PARTE ALTA Y BAJA

Ubicación geográfica



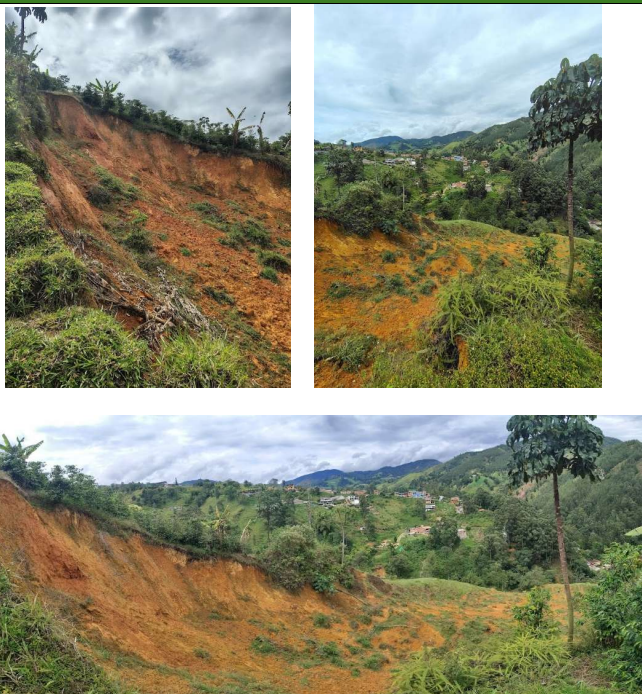
Descripción general

Fecha de visita: 27 de octubre de 2025

Al llegar a la zona, se observó que el MM había cedido nuevamente, perdiendo la vegetación que a la fecha se hubiera podido establecer.

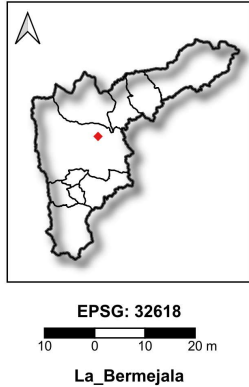
Conclusión: No se observa viable para el estudio y la toma de muestras.

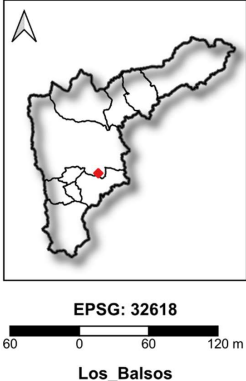
Registro fotográfico



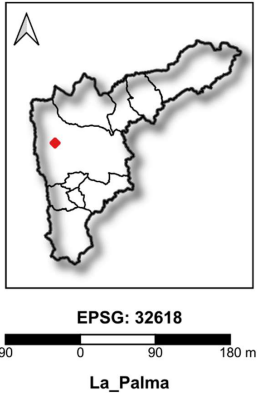
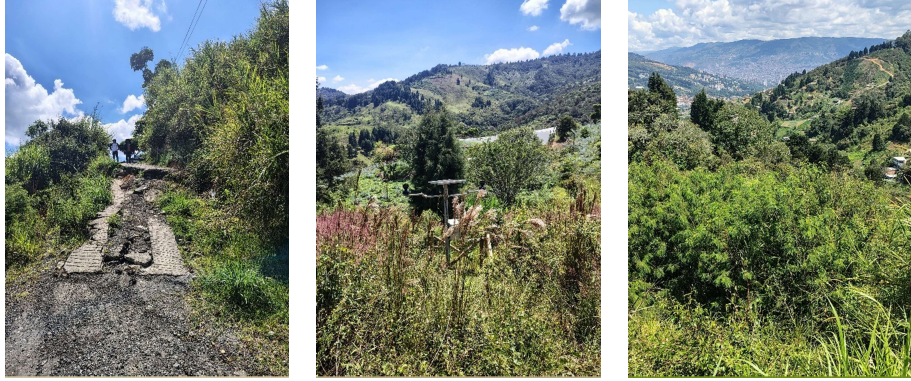
Nombre del MM	LAS PLAYAS
Ubicación geográfica	
	
	
Descripción general	
Fecha de visita: 27 de octubre de 2025	
Es un MM de gran magnitud, la parte alta se encuentra expuesta debido a sus altas pendientes y material parental exhibido, que dificulta la colonización por especies vegetales. Sin embargo, las partes media y alta presentan cobertura vegetal. Es llamativo el proceso que se ha dado en la zona, ya que es un MM registrado en 2022, que removió completamente la capa orgánica de la zona. No obstante, actualmente se encuentra totalmente cubierto de vegetación, especialmente de gramíneas, que permiten el pastoreo de algunos bovinos que se encontraban en la zona. Por otro lado, se observa el desarrollo de especies de crecimiento secundario, pero es llamativo el desarrollo de un buen número de plántulas de eucalipto que han llegado a la zona por la dispersión de sus semillas, lo que hace pensar que el suelo posee propiedades para que especies con requerimientos más altos que los de las pioneras puedan establecerse. A pesar de revisar la zona después de las 2:00 pm, se encontró muy encharcada, posiblemente por las lluvias de los últimos días; lo que hace inferir, que la escorrentía e infiltración del agua no son pronunciadas, y esto favorece el desarrollo vegetal.	
Conclusión: Es un área con un proceso de sucesión vegetal muy interesante; sin embargo, el lugar se observa inestable, especialmente tras los eventos de precipitación registrados en los últimos días. Se recomienda realizar primero una revisión del material cartográfico disponible, y revisar con el equipo el riesgo que presenta esta zona.	
Registro fotográfico	
	

Nombre del MM	LA GABRIELA
Ubicación geográfica	
	
 EPSG: 32618 La_Gabriela	
Descripción general	
Fecha de visita: 6 de noviembre de 2025	
Es un movimiento en masa en el que se observa un proceso de restauración vegetal avanzado, establecido durante los últimos 15 años. La observación realizada en la parte alta y media del MM muestra la presencia de árboles de gran tamaño, superiores a los 20 m, cuyas fuentes semilleras posiblemente se encuentran alrededor de la zona afectada. Se destaca la alta presencia de gramíneas y leguminosas, dominadas por carboneros. En la parte baja también se observa la presencia de vegetación, algunas de ellas introducidas de manera antrópica, ya que se evidencia intervención en el lugar. Nuevamente, domina la presencia de gramíneas, y otras especies como eucalipto, pencas, gramíneas, posiblemente higuierillas, carboneros, entre otros.	
Conclusión: Es un sitio adecuado para realizar estudios; sin embargo, se debe hablar primero con la comunidad, ya que en la parte baja hay un barrio que hace uso del lugar. Posiblemente no sea seguro, por lo que se debe manifestar primero la intención. Igualmente, revisar las imágenes históricas para determinar cómo se inició el proceso de sucesión vegetal y cuáles serían las zonas determinantes.	
Registro fotográfico	
	

Nombre del MM		LA BERMEJALA
Ubicación geográfica		 
Descripción general		Fecha de visita: 6 de noviembre de 2025 El sitio se observa con una vegetación muy densa a pesar de llevar solo 4 años de proceso de restauración natural. En el lugar se observan árboles pioneros de gran tamaño como carbonero y yarumo, con alturas que pueden superar los 10 m. En la visita informaron que después de ocurrido el MM la alcaldía taló todos los especímenes vegetales, dejándolo totalmente descubierto. Por otro lado, en el video registrado con las cámaras del SIATA se observa que hay zonas claves en el proceso de sucesión vegetal, algunas se han recuperado más rápido que otras. Conclusión: Es un sitio adecuado para realizar estudios; sin embargo, se debe hablar primero con la comunidad, ya que está rodeado de un barrio que puede ser inseguro si se intenta realizar una actividad sin su conocimiento. Igualmente, revisar las imágenes históricas para trazar los polígonos de las zonas clave y recopilar muestras; así como los datos que permitan establecer si el terreno es inestable o no.
Registro fotográfico		 Ver: Video_cambios temporales.mp4

Nombre del MM	LOS BALSOS
Ubicación geográfica	
	
	
Descripción general	
Fecha de visita: 6 de noviembre de 2025	
Es un movimiento de masa muy reciente, en el que se observa la generación de obras civiles de contención. Debido al poco tiempo transcurrido desde el evento, no se observan especies vegetales que indiquen el inicio de un proceso de sucesión vegetal. Alrededor existen plantas de alto porte, especialmente eucalipto, a las que se les puede hacer seguimiento a lo largo del tiempo para revisar su influencia en el proceso de sucesión vegetal.	
Conclusión: No se considera viable para el estudio.	
Registro fotográfico	
	
	

Nombre del MM		PALMITAS
Ubicación geográfica		
Descripción general		
Fecha de visita: 7 de noviembre de 2025		
Es un lugar con vegetación exuberante, alta diversidad y árboles que se encuentran entre 5 m y 20 m. Surge la duda si el MM ocurrido, devastó con la vegetación de manera parcial y/o total, o fue un movimiento rotacional que mantuvo la vegetación, caso en el cual el proceso de restauración es diferente. No obstante, actualmente se observan zonas donde sí hay una remoción total de la vegetación y pueden ser base para el análisis de los procesos de sucesión vegetal.		
Conclusión: Es un sitio viable para el estudio; se deben verificar las imágenes históricas para determinar las zonas clave. Igualmente hablar con la comunidad ya que por las altas pendientes del terreno, se deben verificar los caminos de ingreso.		
Registro fotográfico		

Nombre del MM	LA PALMA
Ubicación geográfica	
	
	
Descripción general	
Fecha de visita: 7 de noviembre de 2025	
Es un lugar con una alta intervención antrópica que, al igual que en Palmitas, no parece ser un movimiento en el que haya desaparecido la vegetación, sino un MM rotacional. Se observa una alta presencia de pinos, ciprés y gramíneas; así como actividades agrícolas bajo invernadero.	
Conclusión: Es importante revisar las imágenes históricas para determinar si se ha generado o no un proceso de sucesión vegetal en la zona.	
Registro fotográfico	
	

Anexos

Fichas asociadas a salidas de campo para toma de muestras

	SALIDA A CAMPO	Código: F-GAA-SIATA-28
		Versión: 01
		Fecha: 2026-01-20

Salida N°	2	Fecha	Año: 2026	Mes: 01	Día: 23
		Hora Inicio:	7:30 a.m.	Hora Fin:	3:00 p.m.

Entidad que solicita la visita:	SIATA
Ubicación:	Las Playas, San Antonio de Prado
Municipio:	Medellín

Propósito de la Salida:	
--------------------------------	--

Equipo responsable de la salida (Diligencia este formato):	Toma de muestras vegetales y de suelo para análisis de laboratorio.
Equipos que participan en la salida	Geotecnia

Asistentes:			
N°	Nombre y Apellido	Cédula	Entidad
1	Adriana Isabel Osorio Mosquera	43985504	SIATA
2	Brayan Camilo Gaviria Benjumea	1040759044	SIATA
3	José Daniel Giraldo Gómez	1006993185	SIATA
4	Oscar Ivan Sánchez Patiño	1152691754	SIATA
5	Juan Sebastian Evans Arrieta	1192916907	SIATA

Descripción detallada del desarrollo de la salida
(Agregar temas desarrollados, compromisos, resultados y registro fotográfico)
La salida de campo se desarrolló en el marco de la elaboración del Estudio sobre el manejo y control de deslizamientos mediante Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN). Durante la jornada se realizó la recolección de muestras vegetales correspondientes a las especies que se han establecido de manera natural en la zona afectada por el deslizamiento ocurrido en el sitio de estudio. Adicionalmente, se tomaron muestras de suelo y de suelo con raíces, con el fin de identificar sus características y confirmar la presencia o ausencia de micorrizas. La salida se llevó a cabo de la siguiente manera:



SALIDA A CAMPO

Código: F-GAA-SIATA-28

Versión: 01

Fecha: 2026-01-20

1. Con base en el análisis previo de revegetación realizado a partir de información obtenida mediante sobrevuelos, se identificaron zonas con alto grado de revegetación para la selección de los puntos de muestreo.
2. En campo, se seleccionaron puntos accesibles y cercanos a las zonas previamente identificadas. En cada punto se estableció una parcela de **2 x 2 m**, realizando el correspondiente **registro fotográfico**.
3. Se procedió a la recolección de muestras vegetales de todas las especies presentes dentro de cada parcela. Cada muestra fue rotulada indicando **fecha, lugar, coordenadas, código del punto y nombre del recolector**.
4. Posteriormente, se realizó un despeje parcial del área para la extracción de muestras de **raíces con suelo asociado**, las cuales se almacenaron en bolsas con aire. Estas muestras fueron rotuladas con la información correspondiente y conservadas en una **nevera de icopor**, con el fin de mantener condiciones adecuadas de temperatura y humedad.
5. Adicionalmente, se tomaron muestras de **suelo sin raíces (suelo limpio)**, las cuales fueron rotuladas siguiendo el mismo procedimiento y almacenadas bajo las mismas condiciones de conservación.
6. Este procedimiento se repitió en un total de **cinco (5) puntos de muestreo**. En los puntos posteriores, únicamente se recolectaron muestras de especies vegetales no registradas previamente, dejando constancia de la presencia de especies ya identificadas en las notas de campo.

De acuerdo con el criterio técnico de la experta responsable, en algunos puntos se decidió **no realizar muestreo de suelo**, debido a la similitud de sus características con las observadas en otros puntos o a la relevancia del sitio dentro del alcance del proyecto.

Finalmente, las muestras recolectadas fueron **trasladadas al laboratorio** correspondiente para la realización de los análisis respectivos.



	SALIDA A CAMPO	Código: F-GAA-SIATA-28
		Versión: 01
		Fecha: 2026-01-20



Elaborada por:	Juan Sebastian Evans Arrieta	Revisada y Aprobada por:	
------------------------------	-------------------------------------	--	--

	SALIDA A CAMPO	Código: F-GAA-SIATA-28
		Versión: 01
		Fecha: 2026-01-20

Salida N°	3	Fecha	Año: 2026	Mes: 01	Día: 28
		Hora Inicio:	7:30 a.m.	Hora Fin:	2:30 a.m.

Entidad que solicita la visita:	SIATA
Ubicación:	Vereda Pueblo Viejo
Municipio:	La Estrella

Propósito de la Salida:	Toma de muestras vegetales y de suelo para análisis de laboratorio.
--------------------------------	---

Equipo responsable de la salida (Diligencia este formato):	Geotecnia
Equipos que participan en la salida	Geotecnia

Asistentes:			
N°	Nombre y Apellido	Cédula	Entidad
1	Adriana Isabel Osorio Mosquera	43985504	SIATA
2	Brayan Camilo Gaviria Benjumea	1040759044	SIATA
3	Mauricio Felipe Revelo Aristizabal	1006662905	SIATA
4	Juan Sebastian Evans Arrieta	1192916907	SIATA

Descripción detallada del desarrollo de la salida (Agregar temas desarrollados, compromisos, resultados y registro fotográfico)
La salida de campo se desarrolló en el marco de la elaboración del Estudio sobre el manejo y control de deslizamientos mediante Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN). Durante la jornada se realizó la recolección de muestras vegetales correspondientes a las especies que se han establecido de manera natural en la zona afectada por el deslizamiento ocurrido en el sitio de estudio. Adicionalmente, se tomaron muestras de suelo y de suelo con raíces, con el fin de identificar sus características y confirmar la presencia o ausencia de micorrizas. La salida se llevó a cabo de la siguiente manera:



SALIDA A CAMPO

Código: F-GAA-SIATA-28

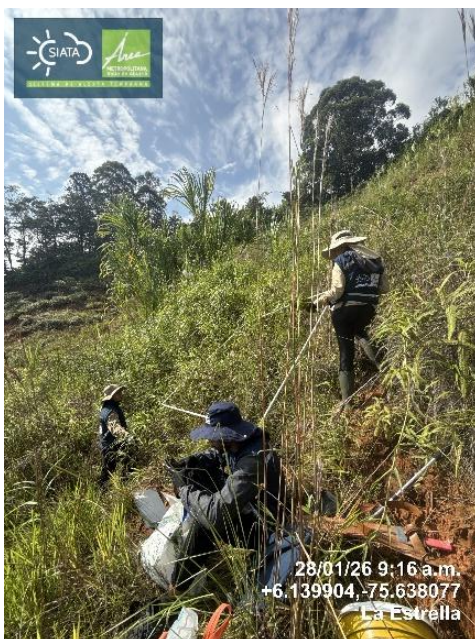
Versión: 01

Fecha: 2026-01-20

1. Con base en el análisis previo de revegetación realizado a partir de información obtenida mediante sobrevuelos, se identificaron zonas con alto grado de revegetación para la selección de los puntos de muestreo.
2. En campo, se seleccionaron puntos accesibles y cercanos a las zonas previamente identificadas. En cada punto se estableció una parcela de **2 x 2 m**, realizando el correspondiente **registro fotográfico**.
3. Se procedió a la recolección de muestras vegetales de todas las especies presentes dentro de cada parcela. Cada muestra fue rotulada indicando **fecha, lugar, coordenadas, código del punto y nombre del recolector**.
4. Posteriormente, se realizó un despeje parcial del área para la extracción de muestras de **raíces con suelo asociado**, las cuales se almacenaron en bolsas con aire. Estas muestras fueron rotuladas con la información correspondiente y conservadas en una **nevera de icopor**, con el fin de mantener condiciones adecuadas de temperatura y humedad.
5. Adicionalmente, se tomaron muestras de **suelo sin raíces (suelo limpio)**, las cuales fueron rotuladas siguiendo el mismo procedimiento y almacenadas bajo las mismas condiciones de conservación.
6. Este procedimiento se repitió en un total de **cuatro (4) puntos de muestreo**. En los puntos posteriores, únicamente se recolectaron muestras de especies vegetales no registradas previamente, dejando constancia de la presencia de especies ya identificadas en las notas de campo.

De acuerdo con el criterio técnico de la experta responsable, en algunos puntos se decidió **no realizar muestreo vegetal**, debido a la similitud de sus características con las observadas en otros puntos o a la relevancia del sitio dentro del alcance del proyecto.

Finalmente, las muestras recolectadas fueron **trasladadas al laboratorio** correspondiente para la realización de los análisis respectivos.



	SALIDA A CAMPO	Código: F-GAA-SIATA-28
		Versión: 01
		Fecha: 2026-01-20



Elaborada por:	Juan Sebastian Evans Arrieta	Revisada y Aprobada por:	
----------------	------------------------------	--------------------------	--

	SALIDA A CAMPO	Código: F-GAA-SIATA-28
		Versión: 01
		Fecha: 2026-01-20

Salida N°	4	Fecha	Año: 2026	Mes: 01	Día: 30
		Hora Inicio:	7:30 a.m.	Hora Fin:	2:30 p.m.

Entidad que solicita la visita:	SIATA
Ubicación:	Vereda Salinas
Municipio:	Caldas

Propósito de la Salida:	Toma de muestras vegetales y de suelo para análisis de laboratorio.
--------------------------------	---

Equipo responsable de la salida (Diligencia este formato):	Geotecnia
Equipos que participan en la salida	Geatecnia

Asistentes:			
N°	Nombre y Apellido	Cédula	Entidad
1	Adriana Isabel Osorio Mosquera	43985504	SIATA
2	Brayan Camilo Gaviria Benjumea	1040759044	SIATA
3	José Daniel Giraldo Gómez	1006993185	SIATA
4	Juan Sebastian Evans Arrieta	1192916907	SIATA
5	Urbey de Jesús Flórez Holguin	71393581	Secretaría de infraestructura física - Caldas

Descripción detallada del desarrollo de la salida
(Agregar temas desarrollados, compromisos, resultados y registro fotográfico)
La salida de campo se desarrolló en el marco de la elaboración del Estudio sobre el manejo y control de deslizamientos mediante Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN). Durante la jornada se realizó la recolección de muestras vegetales correspondientes a las especies que se han establecido de manera natural en la zona afectada por el deslizamiento ocurrido en el sitio de estudio. Adicionalmente, se tomaron muestras de suelo y de suelo con raíces, con el fin de identificar sus características y confirmar la presencia o ausencia de micorrizas.



SALIDA A CAMPO

Código: F-GAA-SIATA-28

Versión: 01

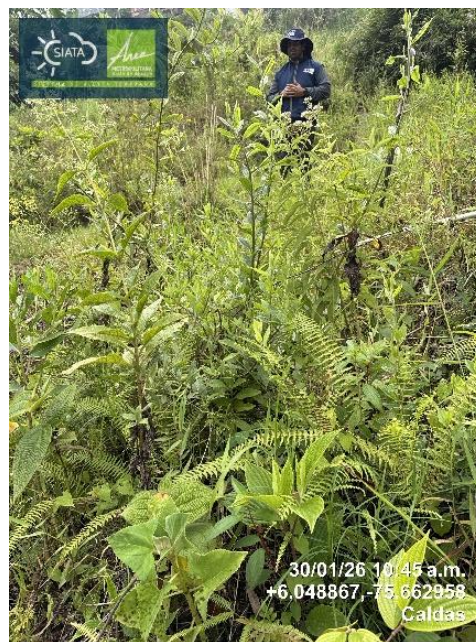
Fecha: 2026-01-20

La salida se llevó a cabo de la siguiente manera:

1. Con base en el análisis previo de revegetación realizado a partir de información obtenida mediante sobrevuelos, se identificaron zonas con alto grado de revegetación para la selección de los puntos de muestreo.
2. En campo, se seleccionaron puntos accesibles y cercanos a las zonas previamente identificadas. En cada punto se estableció una parcela de **2 x 2 m**, realizando el correspondiente **registro fotográfico**.
3. Se procedió a la recolección de muestras vegetales de todas las especies presentes dentro de cada parcela. Cada muestra fue rotulada indicando **fecha, lugar, coordenadas, código del punto y nombre del recolector**.
4. Posteriormente, se realizó un despeje parcial del área para la extracción de muestras de **raíces con suelo asociado**, las cuales se almacenaron en bolsas con aire. Estas muestras fueron rotuladas con la información correspondiente y conservadas en una **nevera de icopor**, con el fin de mantener condiciones adecuadas de temperatura y humedad.
5. Adicionalmente, se tomaron muestras de **suelo sin raíces (suelo limpio)**, las cuales fueron rotuladas siguiendo el mismo procedimiento y almacenadas bajo las mismas condiciones de conservación.
6. Este procedimiento se repitió en un total de **seis (6) puntos de muestreo**. En los puntos posteriores, únicamente se recolectaron muestras de especies vegetales no registradas previamente, dejando constancia de la presencia de especies ya identificadas en las notas de campo.

De acuerdo con el criterio técnico de la experta responsable, en un punto se decidió no realizar muestreo de suelo y en otro no realizar muestreo vegetal, debido a la similitud de sus características con las observadas en otros puntos o a la relevancia del sitio dentro del alcance del proyecto.

Finalmente, las muestras recolectadas fueron **trasladadas al laboratorio** correspondiente para la realización de los análisis respectivos.



	SALIDA A CAMPO	Código: F-GAA-SIATA-28
		Versión: 01
		Fecha: 2026-01-20



Elaborada por:	Juan Sebastian Evans Arrieta	Revisada y Aprobada por:	
------------------------------	-------------------------------------	--	--



AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES

- ANLA -

RESOLUCIÓN N° 000548 (28 MAR. 2025)

“Por la cual se otorga un Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial y se toman otras determinaciones”

EL SUBDIRECTOR DE INSTRUMENTOS, PERMISOS Y TRÁMITES AMBIENTALES DE LA AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES (ANLA)

En uso de sus facultades legales y, en especial, de las conferidas en la Ley 99 de 1993, los Decretos - Ley 2811 de 1974 y 3573 de 2011, modificado por el Decreto 376 de 2020, el Decreto 1076 de 2015, las Resoluciones 2665 de 2022 y 2795 de 2022, y

CONSIDERANDO QUE:

La Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), mediante Auto 1107 del 27 de febrero de 2025, inició trámite administrativo ambiental de Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial, conforme a la solicitud presentada por la Universidad EAFIT, con NIT 890.901.389-5 y aprobación del Ministerio de Educación Nacional (SNIES) número 1712, mediante las comunicaciones de radicados 20256200109682 del 31 de enero de 2025, con número VITAL 6400089090138925001, y 20256200192742 del 21 de febrero de 2025.

El referido acto administrativo fue notificado a la mencionada institución universitaria el día 28 de febrero de 2025, quedando con constancia de ejecutoria y publicado en la Gaceta de esta Autoridad el 3 de marzo de la misma anualidad, en cumplimiento del artículo 70 de la Ley 99 de 1993¹.

La Subdirección de Instrumentos, Permisos y Trámites Ambientales de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), adelantó el estudio técnico de la solicitud y, en consecuencia, emitió el Concepto Técnico 1411 del 13 de marzo de 2025, el cual sirve como insumo del presente acto administrativo y en el que se concluyó sobre la viabilidad de otorgar a la Universidad EAFIT, el Permiso Marco de Recolección de Especímenes de

¹“Por 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 renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.”

“Por la cual se otorga un Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial y se toman otras determinaciones”

Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial, en los términos y condiciones que se señalarán en la parte resolutive del presente acto administrativo.

CONSIDERACIONES JURÍDICAS

El artículo 51 del Decreto Ley 2811 del 18 de diciembre de 1974² señala que el derecho a usar los recursos naturales renovables puede ser adquirido por ministerio de la ley, permiso, concesión y asociación.

El artículo 12 de la Ley 165 de 1994³ señala que los Estados Parte deben promover y fomentar la investigación que contribuya a la conservación y a la utilización sostenible de la diversidad biológica.

El Decreto 1076 de 2015⁴, mediante el cual se unificaron las normas de carácter reglamentario que rigen el sector ambiental y del desarrollo sostenible, regula en el Libro 2, Parte 2, Título 2, Capítulo 8, el permiso de recolección de especímenes de especies silvestres de la diversidad biológica con fines de investigación científica no comercial.

El artículo 2.2.2.8.1.4 del Decreto en cita fija la competencia de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), para el otorgamiento del Permiso, en caso de que las actividades de recolección se desarrollen en jurisdicción de dos o más autoridades ambientales.

El artículo 2.2.2.8.1.5 del referido Decreto, señala las modalidades bajo las cuales puede otorgarse un Permiso de Recolección, encontrándose entre estas, el Permiso Marco de Recolección.

El artículo 2.2.2.8.2.1 ibidem determina, respecto del Permiso Marco de Recolección, que las Instituciones Nacionales de Investigación que pretendan recolectar especímenes de especies silvestres de la diversidad biológica, para adelantar proyectos de investigación científica no comercial, deberán solicitar a la autoridad ambiental competente la expedición de un Permiso Marco de Recolección que ampare todos los programas de investigación científica, que realicen los investigadores vinculados a la respectiva institución.

De igual manera, el párrafo de la citada norma prevé que la recolección de especímenes para fines docentes y educativos a nivel universitario deberá estar amparada por un Permiso Marco de Recolección vigente.

El artículo 2.2.2.8.2.2 del Decreto 1076 de 2015 fija las condiciones que deberán cumplir las Instituciones Nacionales de Investigación que pretendan obtener un Permiso Marco de Recolección.

El artículo 2.2.2.8.2.3 del Decreto en cita establece los documentos que deben aportarse

² “Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente”.

³ “Por medio de la cual se aprueba el “Convenio sobre la Diversidad Biológica”, hecho en Río de Janeiro el 5 de junio de 1992”

⁴ “Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible”.

“Por la cual se otorga un Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial y se toman otras determinaciones”

a la solicitud de Permiso Marco de Recolección.

El artículo 2.2.2.8.2.4 del citado Decreto establece las obligaciones del titular del Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial.

El artículo 2.2.2.8.4.1 del referido Decreto establece que los investigadores extranjeros que pretendan adelantar actividades de recolección de especímenes con fines de investigación científica no comercial deberán estar vinculados a una Institución Nacional de Investigación que cuente con un Permiso Marco de Recolección o a una institución extranjera que tenga un acuerdo de cooperación vigente con una Institución Nacional de Investigación que cuente con dicho permiso.

El artículo 2.2.2.8.6.5 del precitado Decreto establece que, como estímulo a la investigación científica, no se realizará ningún cobro por concepto de los servicios de evaluación y seguimiento a los Permisos de Recolección.

Teniendo en cuenta que el Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial, solicitado por la Universidad EAFIT, se va a desarrollar en todo el territorio nacional, es la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) la competente para otorgar el permiso en mención.

Dadas las anteriores consideraciones y como resultado de la evaluación efectuada en el Concepto Técnico 1411 del 13 de marzo de 2025, fundamento del presente acto administrativo, esta Autoridad considera viable otorgar a la Universidad EAFIT, Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial, el cual incluye la autorización para la movilización de los especímenes a ser recolectados, en los términos que se indicarán en la parte resolutive del presente acto administrativo.

La Universidad EAFIT, como titular del Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial, deberá tener en cuenta que los investigadores extranjeros que pretendan adelantar actividades de recolección de especímenes con fines de investigación científica no comercial deberán estar vinculados a la Institución en mención o a una institución extranjera que tenga un acuerdo de cooperación vigente con dicho centro de investigación, de acuerdo con lo estipulado en el artículo 2.2.2.8.4.1 del Decreto 1076 de 2015.

La Universidad EAFIT, como titular del Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial, deberá dar cumplimiento a las obligaciones contempladas en el artículo 2.2.2.8.2.4. del Decreto 1076 de 2015, tal como se expondrá en la parte resolutive del presente acto administrativo.

De igual manera, la Universidad EAFIT sólo podrá hacer uso del Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines

“Por la cual se otorga un Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial y se toman otras determinaciones”

de Investigación Científica No Comercial otorgado, una vez se encuentre en firme⁵ el presente acto administrativo, para lo cual deberá tener en cuenta lo estipulado en el artículo 87⁶ de la Ley 1437 de 2011⁷.

Finalmente se advierte a la Universidad EAFIT que la inobservancia de los términos, condiciones y obligaciones señalados en el presente acto administrativo, y demás pronunciamientos emitidos en el expediente RCM0005-00-2025, podrá dar lugar a la imposición de las medidas preventivas y sanciones que sean aplicables, según el caso, de conformidad con lo establecido en la Ley 1333 de 2009⁸, modificada por la Ley 2387 de 2024⁹.

COMPETENCIA DE ESTA AUTORIDAD

El Decreto Ley 3573 del 27 de septiembre de 2011 creó la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), y en su artículo 2º, señala que es la encargada de que los proyectos, obras o actividades sujetos de licenciamiento, permiso o trámite ambiental cumplan con la normativa ambiental, de tal manera que contribuyan al desarrollo sostenible ambiental del país.

El numeral 1º del artículo 3º del Decreto Ley 3573 del 27 de septiembre de 2011 establece dentro de las funciones de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), la de otorgar o negar las licencias, permisos y trámites ambientales de competencia del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MINAMBIENTE), de conformidad con la Ley y los reglamentos.

El numeral 1º del artículo 11º del Decreto 376 del 11 de marzo de 2020¹⁰, que modificó el Decreto 3573 del 27 de septiembre de 2011, asigna como una de las funciones de la Subdirección de Instrumentos, Permisos y Trámites Ambientales de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), la de evaluar las solicitudes de permisos, autorizaciones, certificaciones y trámites ambientales para definir la viabilidad ambiental de los proyectos, obras o actividades de su competencia.

El numeral 2º del artículo 9º de la Resolución 2795 del 25 de noviembre de 2022 delega, por parte de la Dirección General de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales

⁵ “Consejo de Estado, Sala de lo Contencioso Administrativo, Sección Cuarta, Radicación número: 9453, Ref.: 25000-23-24-000-8635-01, Santafé de Bogotá, D. C., noviembre 19 de 1999, consejero ponente: Daniel Manrique Guzmán. “(...) El fenómeno procesal de la firmeza implica en principio, que la decisión se torna incuestionable en sede administrativa, lo que a su vez conlleva su ejecutoriedad. Y acaece, para este caso, ante la ocurrencia de cualquiera de dos condiciones: El transcurso del plazo sin mediar la interposición del recurso, o la notificación de la providencia definitoria, de conformidad con lo establecido en el artículo 62 numerales 2º y 3º del Código Contencioso Administrativo. (...)”.

⁶ “Los actos administrativos quedarán en firme: 1. Cuando contra ellos no proceda ningún recurso, desde el día siguiente al de su notificación, comunicación o publicación según el caso. 2. Desde el día siguiente a la publicación, comunicación o notificación de la decisión sobre los recursos interpuestos. 3. Desde el día siguiente al del vencimiento del término para interponer los recursos, si estos no fueron interpuestos, o se hubiere renunciado expresamente a ellos. (...)”

⁷ “Por la cual se expide el Código de Procedimiento Administrativo y de lo Contencioso Administrativo”

⁸ “Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones”

⁹ “Por medio de la cual se modifica el procedimiento sancionatorio ambiental, Ley 1333 de 2009, con el propósito de otorgar herramientas efectivas para prevenir y sancionar a los infractores y se dictan otras disposiciones”

¹⁰ “Por el cual se modifica la estructura de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA)”.

“Por la cual se otorga un Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial y se toman otras determinaciones”

(ANLA) a la Subdirección de Instrumentos, Permisos y Trámites Ambientales, la función de otorgar o negar los permisos de recolección y de investigación de diversidad biológica.

En mérito de lo expuesto,

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO. Otorgar a la Universidad EAFIT, con NIT 890.901.389-5 y aprobación del Ministerio de Educación Nacional (SNIES) número 1712, Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial, a nivel nacional, el cual incluye la autorización para la movilización de los especímenes a ser recolectados y deberá ser desarrollado conforme a las obligaciones generales y específicas establecidas en el Concepto Técnico 1411 del 13 de marzo de 2025, y en el presente acto administrativo

PARÁGRAFO PRIMERO. El Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial que se otorga en este acto administrativo tendrá una vigencia de diez (10) años no prorrogables, contados a partir de la ejecutoria del presente acto administrativo.

PARÁGRAFO SEGUNDO. La Universidad EAFIT sólo podrá hacer uso del Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial, una vez se encuentre en firme el presente acto administrativo, en concordancia con el artículo 87 del Código de Procedimiento Administrativo y de lo Contencioso Administrativo, conforme a lo enunciado en la parte considerativa del presente proveído.

ARTÍCULO SEGUNDO. El Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial, ampara todas las actividades de recolección de especímenes de especies silvestres de la diversidad biológica que sean realizadas para adelantar proyectos de investigación científica no comercial dentro del territorio nacional, bajo los programas académicos, líneas de investigación, grupos de investigación e investigadores responsables que aparecen relacionados en las siguientes tablas, y que fueron relacionados por la Universidad EAFIT en el *Formato de Solicitud de Permiso Marco de Recolección*.

Tabla 1. Programas Académicos autorizados en el Permiso Marco de Recolección otorgado a la Universidad EAFIT

Nombre del Programa Académico	No. Aprobación Min. Educación (SNIES)
Biología	101947
Diseño Urbano y Gestión del Hábitat	109454
Geología	1251
Ingeniería Agronómica	107709
Ingeniería de Procesos	2923
Maestría en Biociencias	108453
Maestría en Ingeniería	19886
Maestría en Procesos Urbanos y Ambientales	102721
Maestría en Ciencias de la Tierra	9301
Doctorado en Ingeniería	52668
Doctorado en Ciencias de la Tierra	102140

“Por la cual se otorga un Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial y se toman otras determinaciones”

Tabla 2. Programas Académicos, Líneas de Investigación y Grupos de Investigación autorizados en el Permiso Marco de Recolección otorgado a la Universidad EAFIT.

Programa Académico	Línea de Investigación	Grupo de Investigación	Código Colciencias	Descripción
Biología, Ingeniería Agronómica, ingeniería de Procesos, Geología, Maestría en Biociencias, Maestría en ingeniería, Maestría en Ciencias de la Tierra, Doctorado en Ingeniería, Doctorado en Ciencias de la Tierra	Bioprocesos, Biotecnología y Bioinnovación, Sistemas Moleculares y Celulares, Biociencias, Agrotecnología, Ciencias Ambientales, Bioeconomía	Biociencias y Tecnología (TECHLIFE)	COL0143589	Techlife Desarrollará actividades de investigación científica no comercial y docencia, entre estas salidas de campo con fines de recolección de especímenes de especies silvestres de la diversidad biológica del territorio Nacional, colectando material vegetal, animales silvestres, mamíferos y pequeños mamíferos, microorganismos, virus, bacterias, hongos y parásitos, según el objetivo de cada una de las líneas de investigación en bioprocesos, biotecnología e innovación, sistemas moleculares y celulares, biociencias, agro, ciencias ambientales y bioeconomía.
Biología, Maestría en Biociencias, Maestría en Ingeniería, Doctorado en Ingeniería	Enfermedades Infecciosas, Medicina Interna y Epidemiología	Grupo de Investigación en Enfermedades Cardiovasculares y Pulmonares	COL0218298	Este grupo de investigación es un grupo multidisciplinario que desarrolla trabajos de investigación científica no comercial y docencia en sus líneas de medicina interna/epidemiología y enfermedades infecciosas, en caso de que lo requiera, realizará actividades de recolección de especímenes de especies silvestres de la diversidad biológica de Colombia tales como microorganismos, macroorganismos, entre estos: virus, hongos, bacterias, levaduras, parásitos.
Biología, Ingeniería de Procesos, Geología, Maestría en Biociencias, Maestría en Ingeniería, Maestría en Ciencias de la Tierra, Doctorado en Ingeniería, Doctorado en Ciencias de la Tierra	Ambiente, Biodiversidad, y Conservación, Recurso Hídrico, Recursos Minerales Energéticos y Cambio Climático	Geociencias y Biodiversidad GEBI	COL0000185	El grupo de investigación GEBI contempla la biodiversidad en sus líneas de investigación de Ambiente, biodiversidad y conservación, recurso hídrico y cambio climático en las cuales se realizarán actividades de recolección de especímenes de especies silvestres de la diversidad biológica Nacional, tales como mamíferos, pequeños mamíferos, microorganismos, virus, bacterias, hongos, levaduras, protozoos, microalgas y parásitos, especies vegetales y animales silvestres, de la diversidad biológica. Sea con fines de recolección, extracción temporal o definitiva, identificación y/o captura, integración de inventarios y/o caracterizaciones e incremento de los acervos de las colecciones biológicas institucionales.
Biología, Diseño Urbano y Gestión del Hábitat, Maestría en Biociencias, Maestría en Ingeniería, Maestría en Ciencias de la Tierra, Doctorado en Ingeniería y Doctorado en Ciencias de la Tierra	Ambiente y Biodiversidad, Diseño con la Naturaleza, Urbanismo y Paisaje	Naturaleza y Ciudad	COL0137298	El grupo de investigación Naturaleza y Ciudad, abordará la complejidad de las ciudades y los territorios, mediante un enfoque transdisciplinario que integre conocimientos especializados, en sus líneas de investigación en ambiente y biodiversidad, diseño con la naturaleza, urbanismo y paisaje, realizando actividades de recolección de especímenes de especies silvestres de la diversidad biológica con fines de investigación científica no comercial, captura, remoción, extracción y/o identificación del impacto de la biodiversidad de las especies vegetales, animales silvestres y microorganismos considerados Cosmopolitan del entorno Nacional, cuando sea necesario para el desarrollo de la investigación o actividad científica/académica.

“Por la cual se otorga un Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial y se toman otras determinaciones”

Programa Académico	Línea de Investigación	Grupo de Investigación	Código Colciencias	Descripción
Ingeniería de Procesos, Maestría en Biociencias, Maestría en Ingeniería, Maestría en Ciencias de la Tierra, Doctorado en Ingeniería, Doctorado en Ciencias de la Tierra	Control y Prevención de la Contaminación, Sostenibilidad Industrial y Ciclo de Vida	Ingeniería para la Sostenibilidad, Energía y Cambio Climático	COL0037569	El grupo de investigación Ingeniería para la sostenibilidad, energía y cambio climático gestionará las actividades de investigación científica y docencia, asociado a los impactos ambientales en sus líneas de investigación científica no comercial en control y prevención de la contaminación, gestión eficiente y uso sostenible de los recursos naturales, realizando actividades de campo de recolección, caracterización y monitoreo de especies vegetales, microorganismos, tratamientos biológicos con microalgas, biomasa vegetal, y demás especímenes de especies silvestres de la diversidad biológica Nacional, de interés científico y académico.

Tabla 3. Investigadores aprobados en el Permiso Marco de Recolección otorgado a la Universidad EAFIT

No.	Nombre	Identificación	Grupo de Investigación
1	Luis Alejandro Gómez Ramírez	70878570	Biociencias y Tecnología (TECHLIFE)
2	Diego Fernando Villanueva Mejía	2235459	Biociencias y Tecnología (TECHLIFE)
3	Alex Armando Sáez Vega	78701558	Biociencias y Tecnología (TECHLIFE)
4	Juan Felipe Restrepo Arias	71756752	Biociencias y Tecnología (TECHLIFE)
5	Javier Correa Álvarez	71265950	Biociencias y Tecnología (TECHLIFE)
6	Laura Sierra Zapata	1037572584	Biociencias y Tecnología (TECHLIFE)
7	María Isabel Hernández Pérez	43206732	Biociencias y Tecnología (TECHLIFE)
8	Valeska Villegas Escobar	43627268	Biociencias y Tecnología (TECHLIFE)
9	Catalina Giraldo Estrada	43865234	Biociencias y Tecnología (TECHLIFE)
10	Luz Deisy Marín Palacio	42825773	Biociencias y Tecnología (TECHLIFE)
11	Águeda Lucia Valencia Deossa	43749450	Grupo de Investigación en Enfermedades Cardiovasculares y Pulmonares
12	Maria Eugenia Puerta Yepes	42896274	Grupo de Investigación en Enfermedades Cardiovasculares y Pulmonares
13	Alejandra María Carmona Duque	43977073	Geociencias y Biodiversidad GEBI
14	Camila Martínez Aguillón	1019011421	Geociencias y Biodiversidad GEBI
15	Juan Fernando Díaz Nieto	80093887	Geociencias y Biodiversidad GEBI
16	Nicolas Pinel Peláez	2969177	Geociencias y Biodiversidad GEBI
17	Juan Pablo Ospina Zapata	71779670	Naturaleza y Ciudad
18	Adriana Aristizábal Castrillón	32208960	Ingeniería para la Sostenibilidad, Energía y Cambio Climático

ARTÍCULO TERCERO. La Universidad EAFIT, como Institución Nacional de Investigación, deberá informar por escrito a la ANLA de manera previa acerca de los especímenes que serán objeto de recolección y movilización en cada uno de los proyectos realizados en el Permiso de Recolección otorgado. Dicha comunicación, junto con la copia del Permiso Marco de Recolección, deberá ser portada por los investigadores que realicen las actividades de recolección en campo durante la ejecución de cada salida o proyecto de investigación.

PARÁGRAFO PRIMERO. Siempre que se notifique o informe a esta Autoridad sobre el desarrollo de actividades de recolección, deberá relacionar, como mínimo, el nombre del grupo de investigación y proyecto de investigación bajo los cuales se realiza la colecta, los especímenes que serán objeto de recolección y movilización, las fechas y localidades de recolección/movilización y los investigadores responsables del proyecto (debidamente autorizados) y/o recolección/movilización de especímenes.

“Por la cual se otorga un Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial y se toman otras determinaciones”

PARÁGRAFO SEGUNDO. Para la movilización de especímenes amparados por el Permiso Marco de Recolección otorgado en el territorio nacional no se requiere de salvoconducto adicional alguno, conforme lo establecido en el parágrafo del artículo 2.2.2.8.6.6. del Decreto del Decreto 1076 de 2015.

ARTÍCULO CUARTO. La Universidad EAFIT, en desarrollo de las actividades descritas en el artículo segundo del presente acto administrativo, deberá dar cumplimiento a las siguientes obligaciones, de conformidad con lo establecido en el artículo 2.2.2.8.2.4. del Decreto 1076 de 2015, durante la vigencia del permiso otorgado:

1. Presentar informes semestrales (cada seis [6] meses), contados a partir de la fecha de ejecutoria del presente acto administrativo, los cuales deberán ser presentados máximo dentro de los 15 primeros días de cada semestralidad, en formato físico, digital editable y PDF, en los que deberá relacionar:
 - 1.1. La información de todos los proyectos de investigación realizados por programa y grupo de investigación en el *“Formato para la Relación de Proyectos Desarrollados en el Permiso Marco de Recolección”*.
 - 1.2. Para cada proyecto, deberá reportar el material recolectado, según lo establecido en el *“Formato Único Nacional Relación del Material Recolectado Permiso de Recolección con Fines de Investigación Científica No Comercial”*, de conformidad a lo establecido en el literal a) del artículo 2.2.2.8.2.4 del Decreto 1076 de 2015.
2. Una vez finalizado cada proyecto, se deberán depositar los especímenes recolectados en una colección nacional registrada ante el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos *“Alexander von Humboldt”*, de conformidad con lo dispuesto por la normatividad que regula la materia. En el caso de que los especímenes no tengan que ser sacrificados o que se mantengan vivos, tratándose de flora y fauna silvestre, durante el desarrollo de la investigación científica, la autoridad competente podrá autorizar su liberación al medio natural o su entrega a centros de conservación ex situ, tales como zoológicos, acuarios, jardines botánicos, entre otros. Como soporte para el cumplimiento de esta obligación se deberán adjuntar al informe las constancias de depósito de los especímenes, emitidas por la colección biológica correspondiente, en consideración de lo expuesto en el literal b) del artículo 2.2.2.8.2.4. del Decreto 1076 de 2015.

En caso de que las colecciones manifiesten que no estén interesadas en recibir los especímenes, el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos *“Alexander von Humboldt”* orientará al depositante conforme a su solicitud, sobre el destino final de dichos especímenes, en concordancia con lo establecido en el parágrafo del artículo 2.2.2.9.1.8 del Decreto 1076 de 2015. El titular del permiso deberá presentar a esta Autoridad, evidencia de las actividades realizadas al respecto.
3. Presentar, una vez finalizado cada proyecto, el informe final de las actividades de recolección relacionadas dentro de cada investigación adscrita a los programas de

“Por la cual se otorga un Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial y se toman otras determinaciones”

investigación. Este informe deberá ser presentado en formato físico, digital editable y PDF, junto con los informes semestrales e incluir el Formato para la Relación del Material Recolectado del Medio Silvestre, de conformidad a lo establecido en el literal c) del artículo 2.2.2.8.2.4. del Decreto 1076 de 2015.

4. La Universidad EAFIT será responsable de realizar los muestreos de forma adecuada en términos del número total de muestras, frecuencia de muestreo, sitios de muestreo, entre otros aspectos, de manera que no se afecten las especies o los ecosistemas, debido a la sobre-colecta, impactos en lugares críticos para la reproducción, afectación de ciclos biológicos, dieta, entre otras, de conformidad a lo establecido en el literal d) del artículo 2.2.2.8.2.4. del Decreto 1076 de 2015.
5. De manera semestral, contado a partir de la ejecutoria del presente Permiso, se deberá suministrar la información asociada a los especímenes recolectados al Sistema de Información en Biodiversidad de Colombia (SiB). Como soporte para el cumplimiento de esta obligación se deberá entregar a esta Autoridad copia de la plantilla del formato Excel y constancia de reporte emitida por el Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia - SiB, de conformidad con lo establecido en el literal e) del artículo 2.2.2.8.2.4. del Decreto 1076 de 2015.
6. Para proyectos en los que se pretenda recolectar especímenes de especies amenazadas, vedadas o endémicas, la Universidad EAFIT deberá contar previamente con la respectiva autorización. Para dicha autorización deberá presentar la respectiva solicitud y diligenciar y tramitar el *“Formato de Solicitud de Autorización de Recolección de Especies Amenazadas, Endémicas o Vedadas”*. El cumplimiento de dicho requisito es obligatorio, previo al inicio de la ejecución del proyecto implicado, y deberá ser reportado en los informes de seguimiento semestrales y en el informe final, de conformidad con lo establecido en el parágrafo 1° del artículo 2.2.2.8.2.4 del Decreto 1076 de 2015.
7. Para proyectos en los que se pretenda recolectar especímenes al interior de un área del Sistema de Parques Nacionales Naturales, la Universidad EAFIT deberá obtener previamente la autorización de la Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales de Colombia, para lo cual deberá presentar la respectiva solicitud y diligenciar y tramitar el *“Formato de Solicitud de Permiso de Recolección en Parques Nacionales Naturales”*. El cumplimiento de este requisito es obligatorio, previo al inicio de la ejecución del proyecto implicado y deberá ser reportado en los informes de seguimiento (semestrales y final) que sean presentados ante esta Autoridad, de conformidad con lo establecido en el parágrafo 2° del artículo 2.2.2.8.2.4. del Decreto 1076 de 2015.
8. La Universidad EAFIT deberá brindar a esta Autoridad la información y apoyo logístico necesario para efectuar el seguimiento de las obligaciones establecidas en el presente Permiso Marco de Recolección, incluyendo la consulta del sistema de información interno de registro y seguimiento de proyectos.

“Por la cual se otorga un Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial y se toman otras determinaciones”

9. En caso de requerirse exportación de especímenes o muestras amparadas por un Permiso Marco de Recolección, se deberá atender las disposiciones señaladas para la obtención de un permiso CITES y/o NO CITES.
10. Los especímenes o muestras obtenidas en ejercicio del Permiso Marco de Recolección no podrán ser aprovechados con fines comerciales.

ARTÍCULO QUINTO. La Universidad EAFIT, en caso de presencia de comunidades indígenas y/o afrocolombianas en el área de recolección, deberá, previamente al inicio de ejecución de actividades, cumplir con las actuaciones y trámites correspondientes ante la Dirección de la Autoridad Nacional de Consulta Previa, con el fin de obtener pronunciamiento de la entidad competente sobre la procedencia o no de Consulta Previa y lo demás que esta disponga; en concordancia con lo dispuesto en el artículo 330 de la Constitución Política, el artículo 7 de la Ley 21 de 1991¹¹, el artículo 76 de la Ley 99 de 1993 y el Capítulo 1, Título 3, Parte 5, Libro 2 del Decreto 1066 de 2015¹².

PARÁGRAFO PRIMERO. El cumplimiento de este requisito es obligatorio en caso de presencia de comunidades indígenas y/o afrocolombianas en el área de recolección, previo al inicio de ejecución de las actividades, y deberá ser reportado en los informes que presente ante la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA).

PARÁGRAFO SEGUNDO. La Universidad EAFIT será la única responsable de adelantar las actuaciones respectivas ante la Dirección de la Autoridad Nacional de Consulta Previa, hasta la obtención del pronunciamiento de la entidad competente y lo demás que ésta disponga, previo a la ejecución de las actividades de recolección.

PARÁGRAFO TERCERO. La Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), vía seguimiento, podrá informar a la Dirección de la Autoridad Nacional de Consulta Previa, presencia de comunidades indígenas y/o afrocolombianas en las áreas de recolección reportadas en los informes presentados por el titular del permiso, para que actúe en el marco de sus competencias.

ARTÍCULO SEXTO. Además de las obligaciones mencionadas en el presente acto administrativo, la Universidad EAFIT deberá dar cumplimiento y tener en cuenta los siguientes aspectos:

1. Cuando se realicen proyectos o actividades de recolección en el marco de investigaciones científicas o tecnológicas marinas dentro de los espacios marítimos colombianos, se debe tener en cuenta lo establecido en el Decreto 644 de 1990¹³, hoy contenido en el Título 5 “Investigaciones Científicas o Tecnológicas Marinas” del Decreto 1070 de 2015¹⁴.

¹¹ “Por medio de la cual se aprueba el Convenio número 169 sobre pueblos indígenas y tribales en países independientes, adoptado por la 76ª. reunión de la Conferencia General de la O.I.T., Ginebra 1989.”

¹² “Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo del Interior”

¹³ “Por el cual se reglamenta parcialmente el Decreto-ley 2324 de 1984, se establece el trámite de las solicitudes para realizar investigaciones científicas o tecnológicas marinas en los espacios marítimos jurisdiccionales colombianos y se dictan otras disposiciones”

¹⁴ “Por el cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Defensa”

“Por la cual se otorga un Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial y se toman otras determinaciones”

2. Para investigaciones con recursos pesqueros se deberá tener en cuenta la Ley 13 de 1990¹⁵ acerca de la competencia de la Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (AUNAP) o la entidad que haga sus veces.
3. La Universidad EAFIT será responsable de garantizar buenas prácticas en las actividades de recolección, de manera tal que no se afecten las especies y/o los ecosistemas que serán intervenidos con la ejecución del presente permiso.
4. La Vicerrectoría de Ciencia Tecnología e Innovación de la Universidad EAFIT será la dependencia responsable de la administración de los grupos de investigación científica.
5. Las investigaciones científicas básicas que se adelantan en el marco del permiso de recolección (sin fines industriales, comerciales o de prospección biológica), que involucran las actividades de sistemática molecular, ecología molecular, evolución y biogeografía, no configuran acceso a los recursos genéticos y, por tanto, son actividades amparadas por el Permiso Marco de Recolección.

La realización de dichas actividades con especímenes recolectados no exime al investigador de suministrar la información asociada al Sistema de Información en Biodiversidad de Colombia - SIB y de remitir en forma digital al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MINAMBIENTE) las publicaciones derivadas de las mismas, quien deberá respetar los derechos de propiedad intelectual correspondientes. La Universidad EAFIT deberá diligenciar la información correspondiente en el *“Formato para la Relación del Material Recolectado del Medio Silvestre”* y presentar a esta Autoridad las evidencias correspondientes de entrega de tales publicaciones al mencionado Ministerio.

ARTÍCULO SÉPTIMO. El Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial otorgado mediante el presente acto administrativo, NO incluye autorización para:

1. La recolección de especímenes de especies silvestres de la biodiversidad para efectos de adelantar estudios ambientales.
2. La recolección de especímenes de especies silvestres de la diversidad biológica con fines industriales, comerciales o de prospección biológica.
3. Acceder a los recursos genéticos y/o productos derivados de los especímenes recolectados en el marco del permiso, con fines industriales, comerciales o de prospección biológica, a menos que el interesado suscriba un contrato de acceso a recursos genéticos y/o productos derivados, de conformidad con la legislación nacional vigente. Lo anterior con sustento en lo establecido en los parágrafos 4 y 6 del artículo 2.2.2.8.1.2. del Decreto 1076 de 2015.

¹⁵ “Por la cual se dicta el Estatuto General de Pesca”

“Por la cual se otorga un Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial y se toman otras determinaciones”

4. Las investigaciones científicas o prácticas docentes que se realicen con especímenes de especies domésticas, de conformidad con lo establecido en el Parágrafo 3 del Artículo 2.2.2.8.1.2. del Decreto 1076 de 2015.

ARTÍCULO OCTAVO. Cualquier cambio, durante la vigencia del permiso, en los programas académicos, líneas de investigación, grupos de investigación o investigadores, dependencia responsable de la administración de los programas de investigación científica o Sistema de Información y Registro de proyectos vinculados a la Universidad EAFIT, constituye una modificación al presente permiso y por tanto deberá solicitarse su modificación ante la ANLA mediante el “*Formato de Modificación Permiso Marco de Recolección*”, en virtud de lo estipulado en el Artículo 2.2.2.8.2.6 del Decreto 1076 de 2015

ARTÍCULO NOVENO. La Universidad EAFIT, como titular del Permiso Marco de Recolección, no podrá ceder a otras personas el presente permiso, sus derechos y obligaciones, de conformidad con el artículo 2.2.2.8.5.4. del Decreto 1076 del 2015.

ARTÍCULO DÉCIMO. Advertir a la Universidad EAFIT que la inobservancia de los términos, condiciones y obligaciones previstos en el presente acto administrativo, y en los demás actos administrativos emitidos en el expediente RCM0005-00-2025, podrá dar lugar a la imposición de las medidas preventivas y sancionatorias de que trata la Ley 1333 de 2009, modificada por la Ley 2387 de 2024.

ARTÍCULO DÉCIMO PRIMERO. Notificar el presente acto administrativo a la Universidad EAFIT, a través de su representante legal o apoderado debidamente constituido.

PARÁGRAFO PRIMERO. En la diligencia de notificación se deberá entregar copia del Concepto Técnico No. 1411 del 13 de marzo de 2025.

PARÁGRAFO SEGUNDO. En el evento en que el titular del permiso, según el caso, sea una persona natural que se acoja al proceso de insolvencia regulado por las normas vigentes, o se trate de una sociedad comercial o de una sucursal de sociedad extranjera que entre en proceso de disolución o régimen de insolvencia empresarial o liquidación regulados por las normas vigentes, informará inmediatamente de esta situación a esta Autoridad, con fundamento, entre otros, en los artículos 8, 58, 79, 80, 81, 95 numeral 8 de la Constitución Política de 1991, en la Ley 43 de 1990, en la Ley 222 de 1995, en la Ley 1333 de 2009, modificada por la Ley 2387 de 2024, y demás normas vigentes y la jurisprudencia aplicable. Adicional a la obligación de informar a esta Autoridad de tal situación, el titular de la licencia o permiso aprovisionará contablemente las obligaciones contingentes que se deriven de la existencia de un procedimiento ambiental sancionatorio conforme con el artículo 40 de la Ley 1333 de 2009, modificado por el artículo 17 de la Ley 2387 de 2024.

ARTÍCULO DÉCIMO SEGUNDO. Comunicar el contenido del presente acto administrativo al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MINAMBIENTE); a la Dirección de la Autoridad Nacional de Consulta Previa del Ministerio del Interior; a la Unidad Administrativa Especial de Parques Nacionales Naturales de Colombia; al Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt; al Instituto Amazónico de Investigaciones

“Por la cual se otorga un Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial y se toman otras determinaciones”

Científicas (SINCHI); al Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico John Von Neumann; al Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés” (INVEMAR); al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM); a la Asociación de Corporaciones Autónomas Regionales y Desarrollo Sostenible (ASOCARS); a la Corporación Autónoma del Alto Magdalena (CAM); a la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR); a la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA); a la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER); a la Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique (CARDIQUE); a la Corporación Autónoma Regional de Sucre (CARSUCRE); a la Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS); a la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y el Oriente Amazónico (CDA); a la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDBM); al Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB); a la Corporación Autónoma Regional para el Desarrollo Sostenible del Chocó (CODECHOCÓ); al Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA); a la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA); al Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA); al Establecimiento Público Ambiental “Barranquilla Verde”; al Establecimiento Público Ambiental de Cartagena (EPA Cartagena); a la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (CORNARE); a la Corporación Autónoma Regional del Magdalena (CORPAMAG); a la Corporación Autónoma Regional de Boyacá (CORPOBOYACÁ); a la Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS); a la Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR); a la Corporación Autónoma Regional de La Guajira (CORPOGUAJIRA); a la Corporación Autónoma Regional del Guavio (CORPOGUAVIO); a la Corporación Autónoma de Chivor (CORPOCHIVOR); a la Corporación Autónoma Regional de Nariño (CORPONARIÑO); a la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR); a la Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA); a la Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ); a la Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA); a la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC); a la Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar (CSB); a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC); a la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge (CVS); a la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (CORALINA); a la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena (CORMAGDALENA); a la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonia (CORPOAMAZONIA); a la Corporación para el Desarrollo Sostenible de la Mojana y el San Jorge (CORPOMOJANA); a la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá (CORPOURABÁ); a la Corporación Autónoma Regional de la Orinoquia (CORPORINOQUIA); a la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial La Macarena (CORMACARENA); al Establecimiento Público Ambiental de Buenaventura (EPA); y al Departamento Administrativo Distrital de Sostenibilidad Ambiental (DADSA), para su conocimiento y fines pertinentes.

PARÁGRAFO. En la diligencia de comunicación se deberá entregar copia del presente acto administrativo y del Concepto Técnico 1411 del 13 de marzo de 2025.

ARTÍCULO DÉCIMO TERCERO. Publicar el contenido del presente acto administrativo en la Gaceta de esta Entidad.

“Por la cual se otorga un Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial y se toman otras determinaciones”

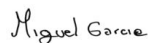
ARTÍCULO DÉCIMO CUARTO. Contra el presente acto administrativo procede el recurso de reposición, el cual podrá ser interpuesto dentro de los diez (10) días hábiles siguientes a la notificación del presente acto administrativo, con el lleno de los requisitos legales, de conformidad con lo establecido en los artículos 74, 76 y 77 de la Ley 1437 de 2011, modificada por la Ley 2080 de 2021¹⁶.

NOTIFÍQUESE, COMUNÍQUESE, PUBLÍQUESE Y CÚMPLASE

Dado en Bogotá D.C., a los 28 MAR. 2025



LUIS ENRIQUE ORDUZ VALENCIA
SUBDIRECTOR DE INSTRUMENTOS PERMISOS Y TRAMITES AMBIENTALES



MIGUEL ANGEL GARCIA SANTOS
CONTRATISTA



OSCAR DANIEL PALACIO VELEZ
CONTRATISTA

Expediente No. RCM0005-00-2025
Concepto Técnico No. 1411 del 13 de marzo de 2025
Fecha: 24 de marzo de 2025

Proceso No.: 20255000005484

Nota: Este es un documento electrónico generado desde los Sistemas de Información de la ANLA. El original reposa en los archivos digitales de la Entidad

¹⁶“Por medio de la cual se reforma El Código de Procedimiento Administrativo y de lo Contencioso Administrativo -Ley 1437 de 2011- y se dictan otras disposiciones en materia de descongestión en los procesos que se tramitan ante la jurisdicción”.

“Por la cual se otorga un Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica No Comercial y se toman otras determinaciones”

Referencias

- Aristizábal, É. (2008). Características, dinámica y causas del movimiento en masa del barrio el socorro (31 de mayo de 2008) en medellín. *Revista EIA*, (10):19–29.
- Arrogante-Funes, P., Bruzón, A. G., Álvarez-Ripado, A., Arrogante-Funes, F., Martín-González, F., and Novillo, C. J. (2024). Assessment of the regeneration of landslides areas using unsupervised and supervised methods and explainable machine learning models. *Landslides*, 21(2):275–290.
- Asian Disaster Preparedness Center (2019). Guidance document on the use of nature-based solutions for landslide risk reduction. Technical report, Asian Disaster Preparedness Center, SM Tower, 24th Floor, 979/59 Phaholyothin Road, Nai Phayathai, Bangkok 10400, Thailand. Nature-Based Landslide Risk Management Project in Sri Lanka. Financed by The World Bank.
- Atkins, R. (2001). *Best Management Practices Handbook: Hillslope Restoration in British Columbia*. British Columbia Ministry of Forests, British Columbia. Watershed Restoration Program, Resource Tenures and Engineering Branch.
- Begon, M., Townsend, C. R., and Harper, J. L. (2006). *Ecology: From Individuals to Ecosystems*. Blackwell Publishing, Oxford, UK, 4 edition.
- Bloom, A. L. (1998). *Geomorphology: A Systematic Analysis of Late Cenozoic Landforms*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 3rd edition.
- Browder, G., Ozment, S., Rehberger Bescos, I., Gartner, T., and Lange, G.-M. (2019). *Integrating Green and Gray: Creating Next Generation Infrastructure*. World Resources Institute and World Bank, Washington, D.C.
- Campbell, S. D. G., Shaw, R., Sewell, R. J., and Wong, J. C. F. (2008). *Guidelines for Soil Bioengineering Applications on Natural Terrain Landslide Scars*. Government of British Columbia.
- Cruden, D. M. and Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. In Turner, A. and Schuster, R., editors, *Landslides: Investigation and Mitigation*. National Academy Press, Washington, D.C.
- Dang, K. B., Nguyen, H. V., Pham, B. T., et al. (2024). Comparison between u-shaped structural deep learning models to detect landslide traces. *Science of the Total Environment*, 912:169113.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP) (2024). Guía con lineamientos y orientaciones para gestionar fenómenos asociados a la variabilidad climática a partir de soluciones basadas en la naturaleza (sbn). <https://www.dnp.gov.co>. Gobierno de Colombia.
- Eggermont, H., Balian, E., Azevedo, J. M. N., Beumer, V., Brodin, T., Claudet, J., Fady, B., Grube, M., Keune, H., Lamarque, P., Reuter, K., Smith, M., van Ham, C., Weisser, W. W., and Le Roux, X. (2015a). Nature-based solutions: New influence for environmental management and research in europe. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 24(4):243–248. Open Access.

- Eggermont, H., Balian, E., Azevedo, J. M. N., et al. (2015b). Nature-based solutions: New influence for environmental management and research in europe. *GAIA: Ökologische Perspektiven in Natur-, Geistes- und Wirtschaftswissenschaften*, 24(4):243–248.
- El Colombiano (2025). Movimientos en masa en antioquia han dejado 3.000 muertos y ahora buscan prevenir desastres con inteligencia artificial. Periódico El Colombiano.
- Garcés Mesa, D. (2022). Modelo predictivo para identificar zonas potenciales de deslizamientos influenciados por precipitación en la ciudad de medellín. Trabajo de grado, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Envigado, Colombia.
- Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2):96–99.
- Holdridge, L. R. (1967). *Life Zone Ecology*. Tropical Science Center, San José, Costa Rica.
- Instituto de Agricultura Sostenible (2014). *Manual de técnicas de estabilización biotécnica en taludes de infraestructuras de obras civiles*. Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía.
- INVIAS (2022). *Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022*. Instituto Nacional de Vías.
- Lewis, L., Hagen, S., and Salisbury, S. L. (2001). Soil bioengineering for upland slope stabilization. Research Report WA-RD 491.1, Washington State Department of Transportation. Soil Bioengineering for Slopes, Research Project WA-RD 491.1.
- Li, J., Zhang, W., Liu, X., et al. (2025). Topographic slope effects on soil bacterial assembly and ecosystem functions. *Science of the Total Environment*.
- Londoño Torres, N. (2021). Evaluación de la vulnerabilidad social por movimientos en masa y avenidas torrenciales en el corregimiento de san cristóbal, medellín. Tesis de maestría, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.
- Montero Olarte, J. (2017). *Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia*. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia. Imprenta Nacional de Colombia.
- Nakata, Y., Hayamizu, M., and Ishiyama, N. (2023). Assessing primary vegetation recovery from earthquake-induced landslide scars: A real-time kinematic unmanned aerial vehicle approach. *Ecological Engineering*, 193:107019.
- Osman, N. (2011). The effect of plant succession on slope stability. *Ecological Engineering*, 37:139–147.
- Rivera, J. H., Rivera Posada, H., Sánchez, J. F., Zapata, S., Osorio, A., and Franco, L. E. (2015). *Manual de procedimientos para el manejo de procesos denudativos con obras de bioingeniería*. Universidad de Caldas.
- Sharma, M. (2025). Advances in nature-based and nature-inspired solutions for ground improvement. *Indian Geotechnical Journal*.
- Sittadewi, E. H., Tejakusuma, I. G., Mulyono, A., Handayani, T., Tohari, A., and Zakaria, Z. (2024). Post-landslide restoration through multistrata agroforestry-based land management in the west bogor area of indonesia. *Trees, Forests and People*, 16:100593.
- Suárez, J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales*. Universidad Industrial de Santander.
- Terzaghi, K. (1950). *Mechanism of Landslides, Application of Geology to Engineering Practice*. Geological Society of America, New York.

- Thapa, P. S., Daimaru, H., and Yanai, S. (2024). Analyzing vegetation recovery and erosion status after a large landslide at mt. hakusan, central japan. *Ecological Engineering*, 198:107144.
- United Nations Environment Programme (2022). *Nature-based Solutions: Opportunities and Challenges for Scaling Up*. UNEP, Nairobi, Kenya.
- Wang, L., Zhang, Y., Zhang, W., et al. (2023). Active permanent greening – a new slope greening technology based on mineral-solubilizing microorganisms. *Frontiers in Plant Science*, 14:1219139.
- Yousefi, S., Imaizumi, F., Hasui, R., Nishii, R., and Hayakawa, Y. S. (2025). Quantitative analysis of landslide impact on vegetation: Insights from field surveys and uav imagery. *Ecological Engineering*, 214:107581.