



Informe mensual de actividades

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

Noviembre de 2025



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
	Introducción	2
	Alcance y naturaleza del Manual	3
	Objetivo general	3
	Objetivos específicos	3
1	Estado del arte	5
1.1	Marco de procesos físicos	5
	¿Qué son los movimientos en masa?	5
	¿Qué tipos de movimientos en masa existen?	5
	Contexto de los movimientos en masa en el trópico	11
	Movimientos en masa más comunes en el Valle de Aburrá	12
1.2	Marco de Soluciones basadas en la Naturaleza	13
	Tipos de soluciones basadas en la naturaleza	14
	Bioingeniería del suelo	15
	Soluciones híbridas	15
1.3	Marco ecológico y biológico	16
	Clasificación funcional de especies vegetales	19
	Interacción suelo-vegetación-microbiota	20
	Papel de la sucesión vegetal en la recuperación de laderas	20
	Concepto de zonas de vida y su uso para la selección de especies	21
2	Metodologías para la obtención de resultados	22
2.1	Metodología para la caracterización de la cobertura vegetal y suelos	22
2.2	Metodología para la clasificación por zonas de vida	23
	Variables y fuentes de información	23
	Procedimiento	23
3	Avances	26
3.1	Avance en la delimitación de zonas de vida	26
	Método de Holdridge	26
	Método alternativo: clasificación basada en altitud, temperatura y precipitación	27
3.2	Avance en visitas preliminares a sitios de interés	30
	Recorrido 1: Caldas La Estrella y San Antonio de Prado	30
	Recorrido 2: Bello y Medellín	32
	Recorrido 3: Medellín	33
3.3	Desarrollo de criterios para la selección de sitios adecuados para la aplicación de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) y/o soluciones híbridas.	34
	Descripción de los criterios de selección	34

Método para calcular la puntuación final de cada sitio	38
4 Anexos	39
4.1 Fichas asociadas a recorridos preliminares	39
Referencias	50

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)

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.

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.

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.

Capítulo 1

Estado del arte

1.1. Marco de procesos físicos

¿Qué son los 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).

¿Qué tipos de movimientos en masa existen?

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 desciende 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 1.1. 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 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

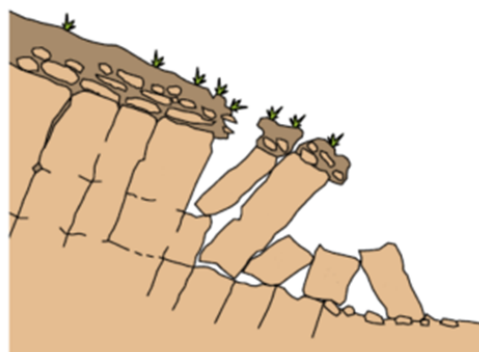


Figura 1.2. Esquema del volcamiento de bloques.

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 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

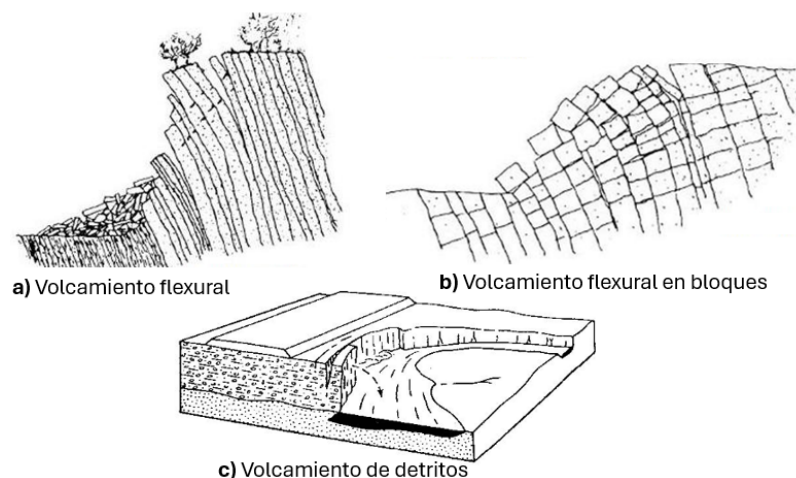


Figura 1.3. Tipos de volcamiento.

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.
- **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.

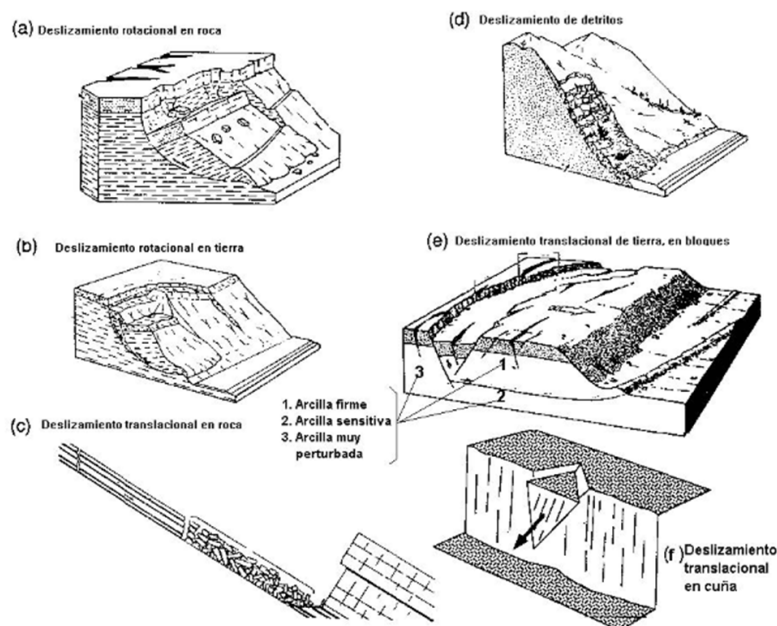


Figura 1.4. Deslizamientos rotacionales y traslacionales.

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.

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

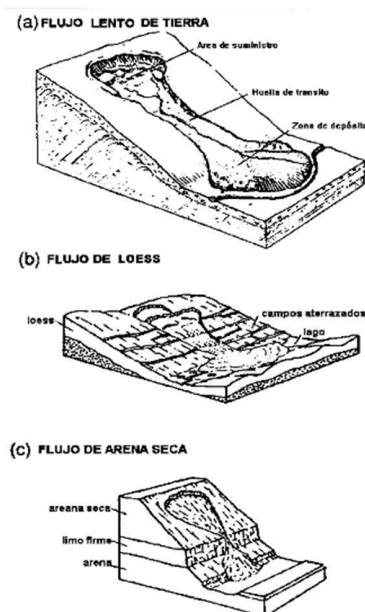


Figura 1.5. Ejemplos de flujos: a) lento de tierra, b) de Loess, y c) de arena seca.

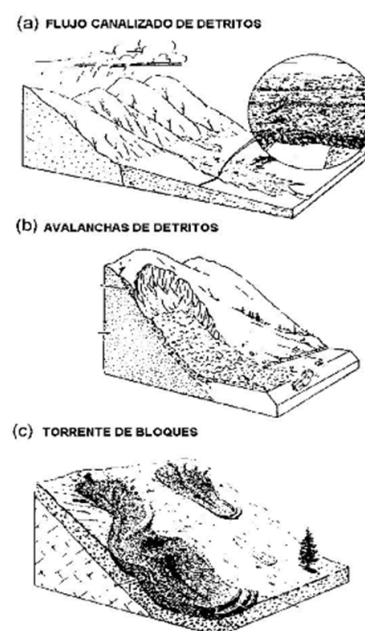


Figura 1.6. Flujos canalizados: a) de detritos, b) avalancha de detritos, y c) torrente de bloques.

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 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

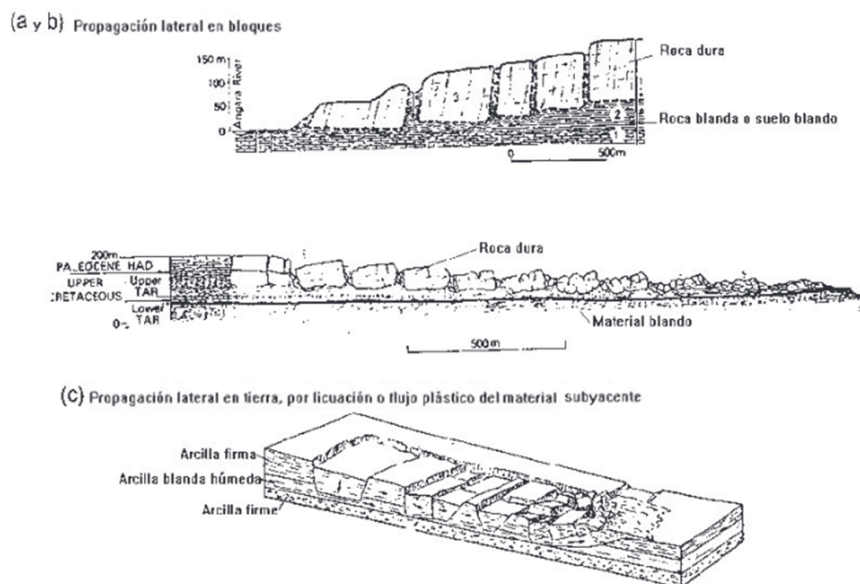


Figura 1.7. Casos de propagación lateral

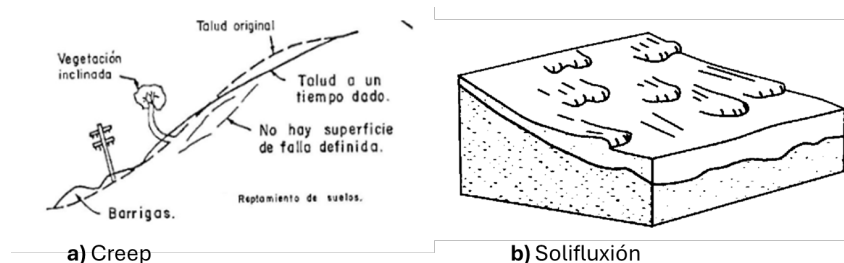


Figura 1.8. Esquema de creep y solifluxión

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.

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 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 2.1).

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.

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

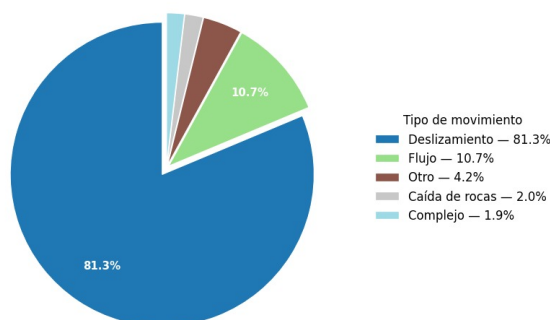


Figura 1.9. Distribución por tipo de movimiento en masa (inventario SIATA 2010 - 2025)

1.2. 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 radicales 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:

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

En el contexto nacional, es importante considerar:

- **INVÍAS (2013–2020):** Manuales de bioingeniería y guías técnicas para estabilización de taludes en proyectos viales.
- **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.

1.3. 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.

Capítulo 2

Metodologías para la obtención de resultados

2.1. Metodología para la caracterización de la cobertura vegetal y suelos

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 imágenes de sitios de interés.** Teniendo en cuenta las conclusiones del punto anterior, se realizará un análisis multitemporal de los históricos de ortofotos RGB y, cuando exista disponibilidad, de imágenes multiespectrales provistas por el equipo de Teledetección de SIATA para los sitios viables. Este análisis permitirá identificar las zonas dentro de cada punto de interés donde se han presentado procesos de sucesión vegetal, con el propósito de georreferenciarlas.
- 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. **Análisis de suelos y microbiota.** Las muestras de suelo serán 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.
- vi. **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.

2.2. 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 mediante el método empírico de Hargreaves and Samani (1985), a partir de los registros diarios de temperatura máxima y mínima.

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).

- i. **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:

$$BT = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{bio,i} \quad (2.1)$$

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) se estimó mediante el método empírico de Hargreaves and Samani (1985), el cual requiere únicamente datos de temperatura y radiación solar. La ecuación general es:

$$ETP = 0,0023 \times (T_{med} + 17,8) \times (T_{max} - T_{min})^{0,5} \times R_a \quad (2.2)$$

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 obtiene sumando los valores diarios o mensuales, según la resolución de los datos climáticos de las estaciones SIATA.

Relación de evapotranspiración potencial.

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

$$RH = \frac{P}{ETP} \quad (2.3)$$

donde:

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

Valores de $RH > 1$ indican condiciones húmedas, $RH \approx 1$ equilibrio hídrico y $RH < 1$ 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 2.1).

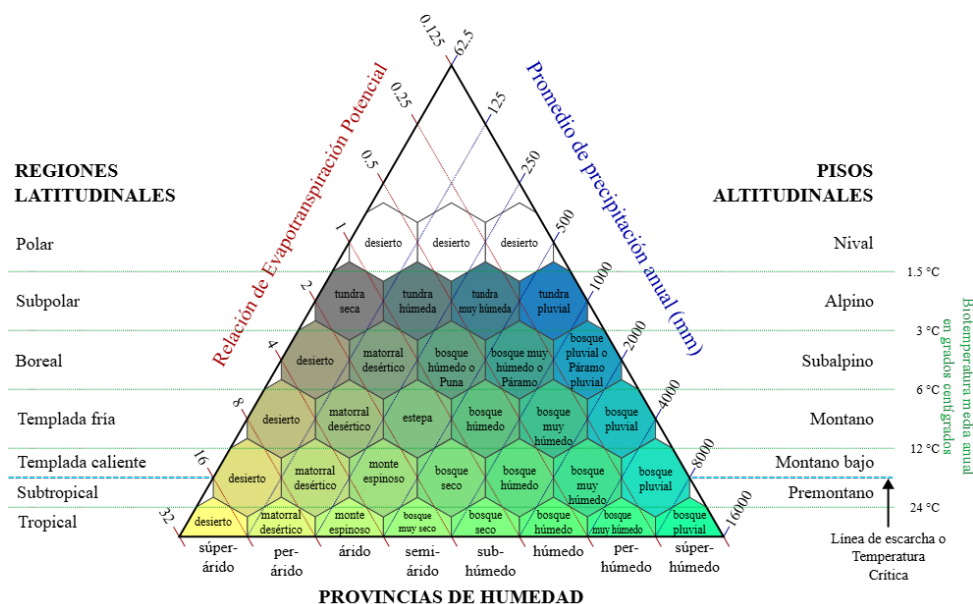


Figura 2.1. Sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge

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)*.

Capítulo 3

Avances

3.1. Avance en la delimitación de zonas de vida

En esta etapa se avanzó en la evaluación de diferentes metodologías para la delimitación de zonas de vida en el Valle de Aburrá, usando como referencia el mapa oficial de zonas de vida del IGAC y los campos climáticos derivados de la información de estaciones SIATA.

Método de Holdridge

Se generaron los mapas de temperatura media anual, precipitación anual y evapotranspiración potencial (ETP), a partir de los cuales se construyó una primera aproximación de zonas de vida. Al comparar este resultado con el mapa del IGAC se observó que la ETP no reproduce adecuadamente los gradientes esperados en el Valle de Aburrá, lo que afecta la coherencia de la clasificación bioclimática.

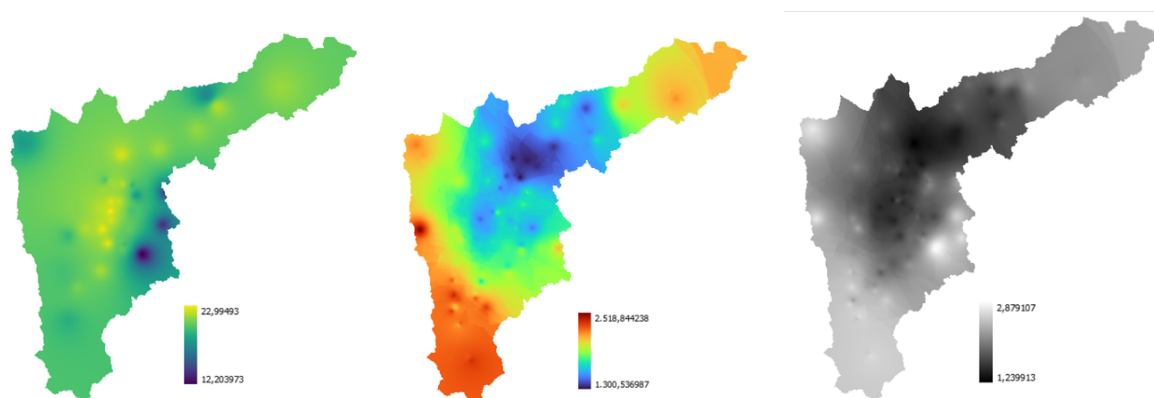


Figura 3.1. Mapas de temperatura media anual, precipitación anual y evapotranspiración potencial (ETP) empleados en la primera aproximación de zonas de vida.

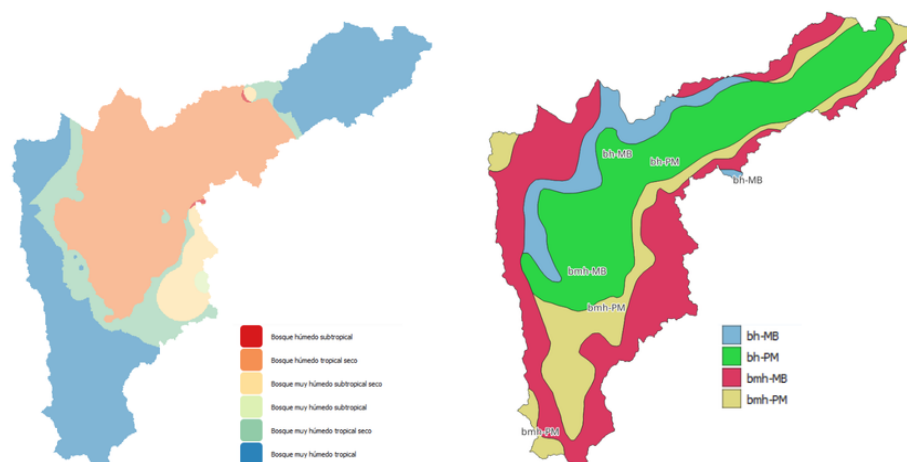


Figura 3.2. Comparación entre las zonas de vida obtenidas con la primera aproximación (izquierda) y las zonas de vida oficiales del IGAC (derecha). Se observan inconsistencias asociadas al campo de ETP.

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 3.1 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 3.1. 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

Continúa en la siguiente página

Tabla 3.1 – Continuación de la página anterior.

Rango	Descripción	Altitud msnm	Precipitación	Temperatura
bp-PM	Bosque pluvial premontano	1000–2000	4000–8000	17–24
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 le 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 3.2 se resumen los rangos empleados para la clasificación.

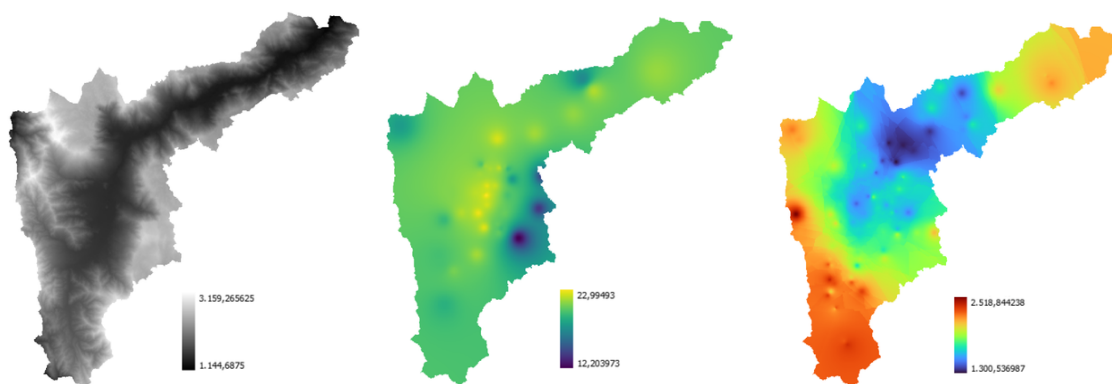


Figura 3.3. Mapas de altitud (DEM), temperatura y precipitación empleados en la clasificación de zonas de vida según la “Clasificación de suelos de Antioquia”.

Tabla 3.2. 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 3.1 se asignaron las Zonas de vida correspondientes. en la Tabla 3.3 tal está el resumen de los resultados obtenidos

Tabla 3.3. 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 3.3 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.

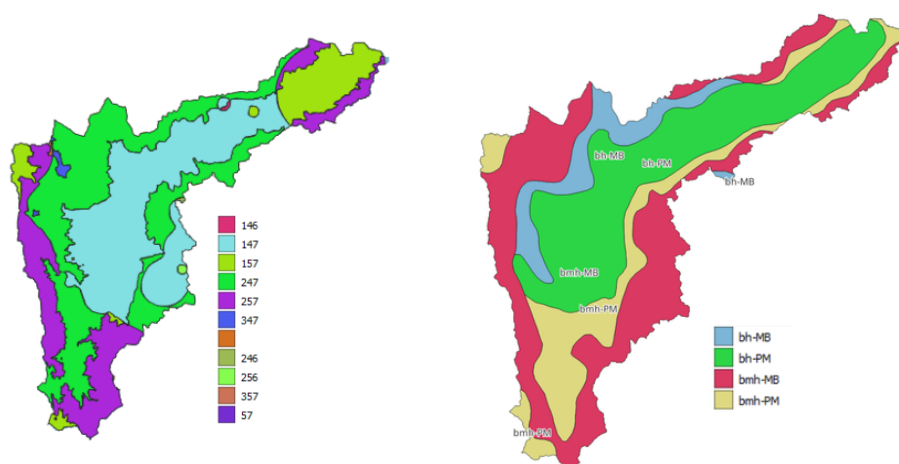


Figura 3.4. Comparación entre las zonas de vida obtenidas con el método alternativo (izquierda) y las zonas de vida oficiales del IGAC (derecha). Se observan inconsistencias.

Actualmente, se está evaluando el uso del método de Hargreaves para el cálculo de la evapotranspiración potencial, el cual requiere datos diarios de temperatura, con el fin de verificar si los valores obtenidos coinciden o se ajustan mejor a los hexágonos de Holdridge obtenidos previamente.

3.2. Avance en visitas preliminares a sitios de interés

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

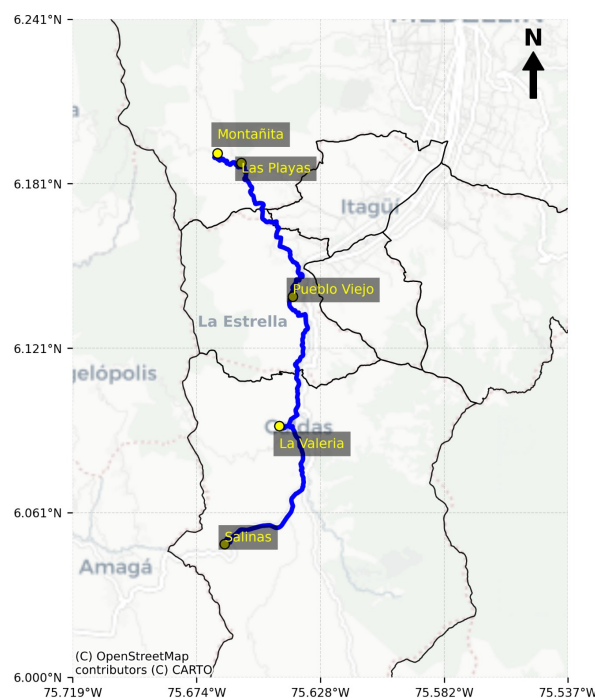


Figura 3.5. Recorrido 1. Sitios visitados y trazado general.

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 3.6. 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

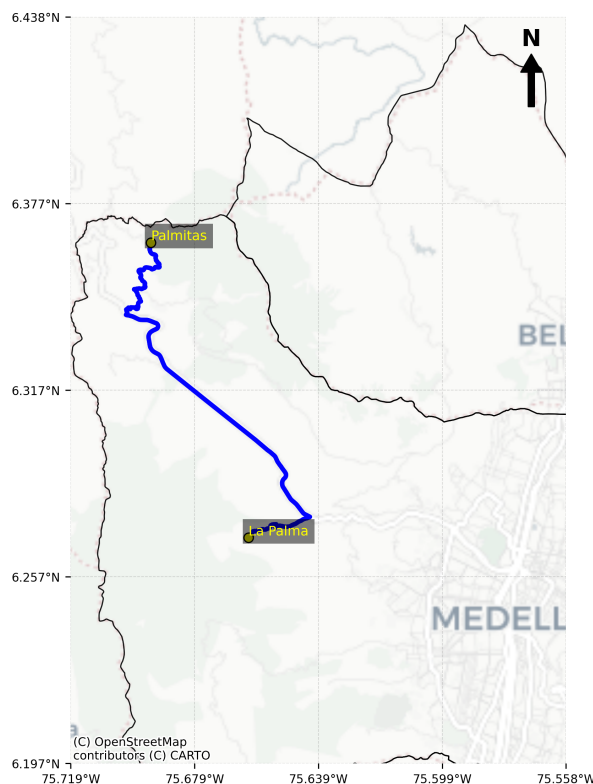


Figura 3.7. Recorrido 3. Sitios visitados y trazado general.

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.

3.3. 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 3.4 presenta los factores de ponderación asignados a cada criterio.

Tabla 3.4. 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 3.5. 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 3.5. 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 3.6. 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
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 3.7.

Tabla 3.7. Puntuaciones asignadas según la inclinación.

Nombre de la categoría	Posibilidad de implementar SbN	Puntuación
Categoría de inclinación I (>40°)	Muy baja	0

Continúa en la siguiente página

Tabla 3.7 – Continuación de la página anterior.

Nombre de la categoría	Posibilidad de implementar SbN	Puntuación
Categoría de inclinación II (31–40°)	Baja	1
Categoría de inclinación III (17–31°)	Media	2
Categoría de inclinación IV (11–17°)	Alta	3
Categoría de inclinación V (0–10°)	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 3.8. 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 3.9. 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 3.10. 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 3.4 . 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

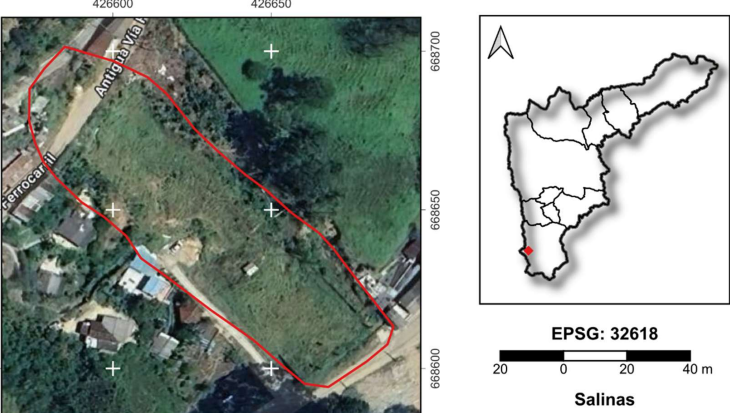
S – puntuación asignada a cada criterio

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.

Capítulo 4

Anexos

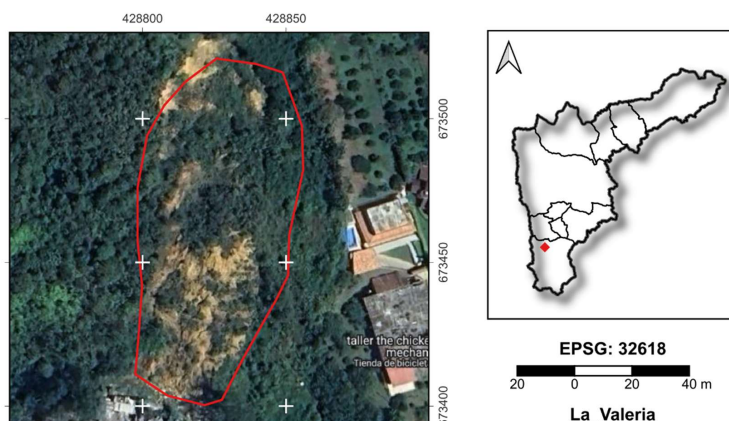
4.1. Fichas asociadas a recorridos preliminares

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

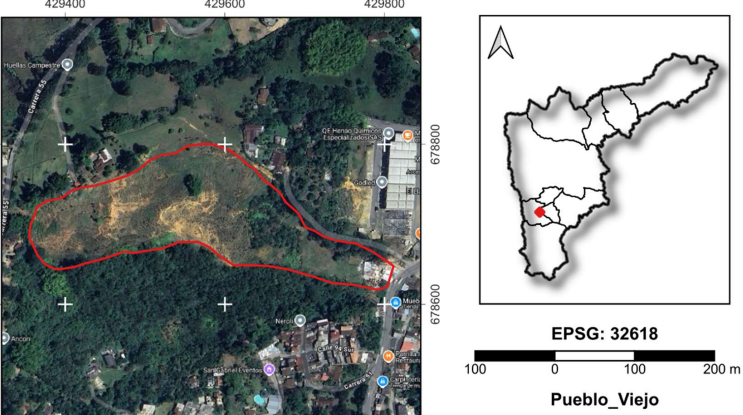
Fecha de visita: 27 de octubre de 2025

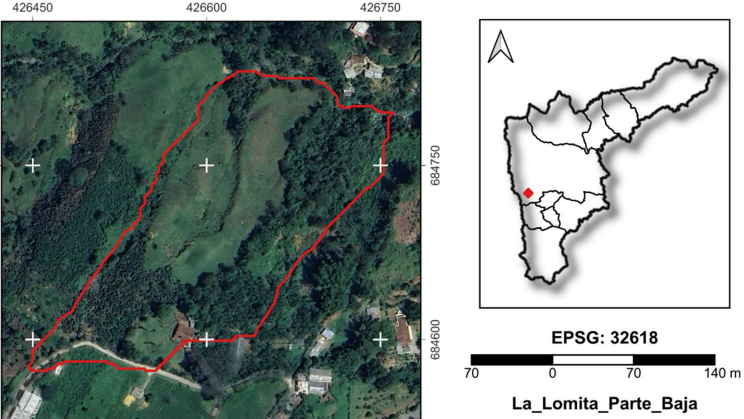
La parte alta de la zona de interés, corresponde a una casa finca privada. No se observa vegetación sucesional, solo el pasto de la finca, se infiere que es podado constantemente, y un árbol (posiblemente un balso) inclinado hacia la pendiente, ya que más de la mitad de sus raíces han perdido el suelo 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.

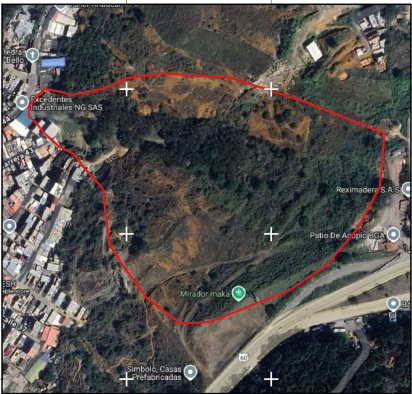
Registro fotográfico

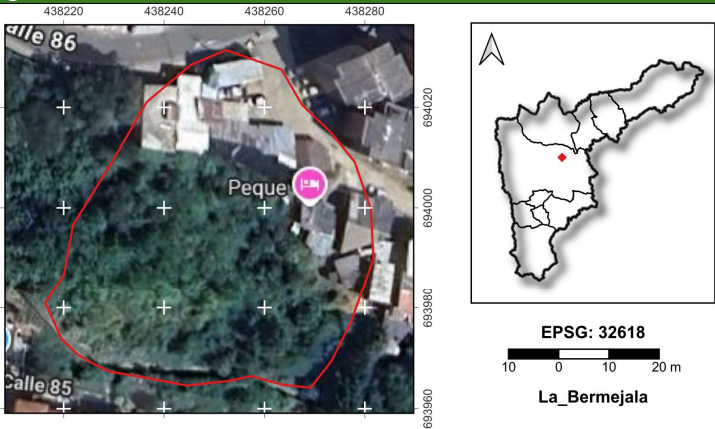


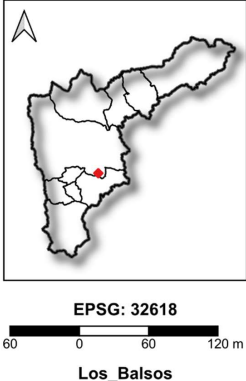
Nombre del MM	PUEBLO VIEJO
Ubicación geográfica	
	
Descripción general	
Fecha de visita: 27 de octubre de 2025	
Es un MM de gran tamaño, que muestra un proceso de sucesión vegetal, caracterizado en la parte alta y baja por gramíneas y helechos, mientras que, en la parte media, se observan especies de 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	
	

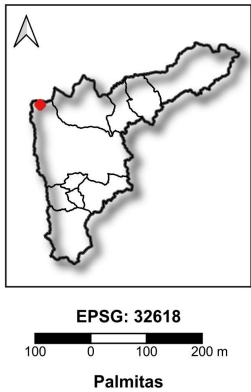
Nombre del MM	LA LOMITA PARTE ALTA Y BAJA
Ubicación geográfica	
	
Descripción general	
Fecha de visita: 27 de octubre de 2025	
Al llegar a la zona, se observó que el MM había cedido nuevamente, perdiendo la vegetación que a la fecha se hubiera podido establecer.	
Conclusión: No se observa viable para el estudio y la toma de muestras.	
Registro fotográfico	
	

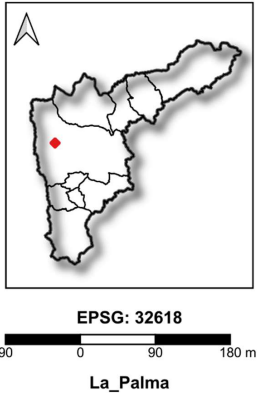
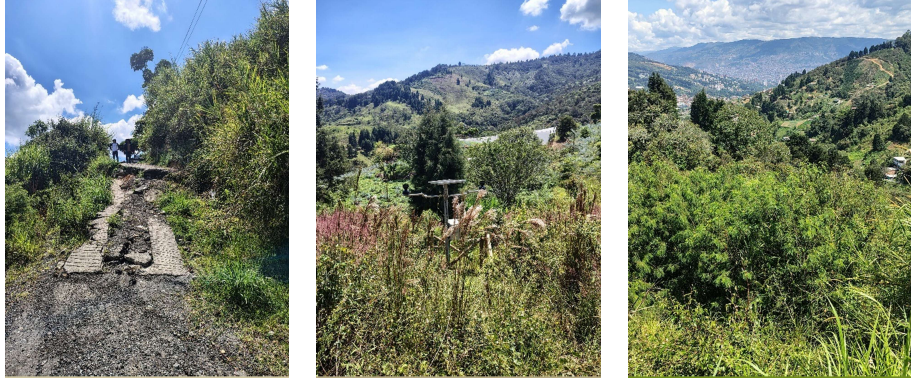
Nombre del MM	LAS PLAYAS
Ubicación geográfica	
	
 EPSG: 32618 100 0 100 200 m Las_Playas	
Descripción general	
Fecha de visita: 27 de octubre de 2025	
Es un MM de gran magnitud, la parte alta se encuentra expuesta debido a sus altas pendientes y material parental exhibido, que dificulta la colonización 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	
	
	
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	
	

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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.