

Capítulo 2.5

Degradación de suelos en Colombia y soluciones de bioingeniería: perspectivas transversales de recuperación a largo plazo

Juan Camilo Pineda Herrera¹
Jorge Arturo Pineda Jaimes²
Sherley Catheryne Larrañaga-Rubio³

<https://doi.org/10.61728/AE24004329>



¹ Profesor de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. *e-mail:* pineda_j@javeriana.edu.co

² Profesor de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. *e-mail:* japinedaj@udistrital.edu.co

³ Integrante de DICEÍN S.A.S, Ingenieros Consultores, Bogotá, Colombia *e-mail:* sclaranagar@diceinsas.com

Introducción

Procesos erosivos profundos en Suelos Colombia

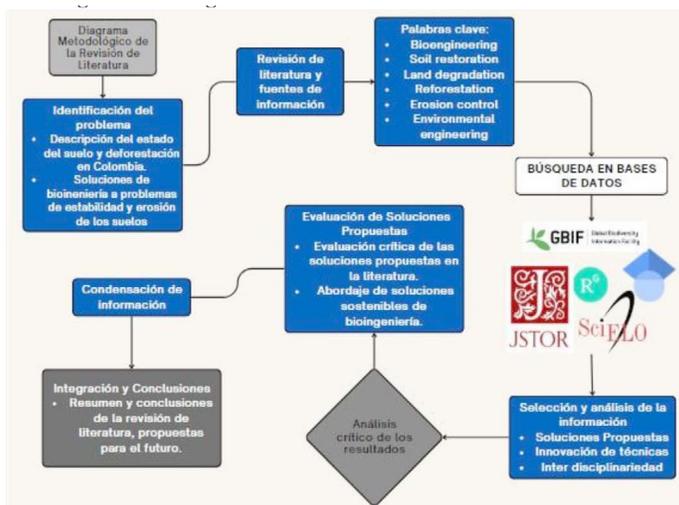
La degradación de la cobertura del suelo en Colombia por fenómenos erosivos profundos debido a la deforestación, la minería ilegal, y la expansión agrícola y ganadera genera un cambio acelerado del uso del suelo que tiene consecuencias negativas en la sostenibilidad del territorio, la conservación de la biodiversidad y la mitigación de los efectos del cambio climático. Causando una significativa degradación de los ecosistemas, pérdida de biodiversidad, y alteraciones en los ciclos hidrológicos, aumentando la vulnerabilidad a desastres naturales como deslizamientos e inundaciones.

Con la finalidad de llevar a cabo procesos de recuperación ecológica de zonas deterioradas, surgen las estrategias de bioingeniería como soluciones innovadoras y transversales. Estas estrategias incluyen el uso de biomantos, estructuras de trincho, y el terraceo con plantas nativas, que siendo métodos económicos y funcionales contribuyen a la estabilización de taludes y la restauración de la vegetación para controlar la erosión.

Se presenta una revisión general de estrategias enfocadas a la recuperación ecológica de suelos. En el contexto de esta investigación sobre la intersección entre la biología y la ingeniería, representada a través de la bioingeniería en relación con la deforestación y los procesos de erosión en Colombia, se presenta a continuación un diagrama metodológico que ilustra el proceso de revisión de literatura llevado a cabo, en la figura 1 el diagrama desglosa las etapas fundamentales de la investigación.

Figura 1

Estructura metodológica de la investigación



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Colombia, siendo un país megadiverso enfrenta un acelerado cambio en el uso de su suelo, con consecuencias significativas para el medioambiente y la sociedad. Esto genera una serie de problemas ambientales que ponen en riesgo la sostenibilidad del país, donde la tasa de deforestación ha aumentado en los últimos años, principalmente por fenómenos socioeconómicos como la minería ilegal, expansión de terrenos destinados a la agricultura y pastizales para la ganadería, fenómenos impulsados frecuentemente por grupos armados ilegales. Esta pérdida de cobertura forestal y cambio de uso del suelo tiene graves consecuencias, entre las que se encuentra la pérdida de biodiversidad, la captura de carbono y la alteración del ciclo hidrológico (IGAC, 2022).

Según el Ministerio de Ambiente de Colombia (Minambiente, 2024): “La deforestación se redujo en 36 % en 2023, pasando de 123.517 ha deforestadas en 2022 a 79.256 ha en el año anterior”. Sin embargo, también advirtió sobre una preocupante tendencia ascendente de la deforestación en lo que va a julio de 2024, según reportes, esta situación se debe a la intensificación de actividades ilegales por parte de grupos armados y al impacto del fenómeno de El Niño.

En el último trimestre de 2023, los departamentos del Meta, Guaviare y Caquetá, localizados en la Amazonía Colombiana (Figura 2) concentraron la mayor parte de esta pérdida, con un total de 18.400 ha, impulsada por la expansión de la frontera agropecuaria y la tala ilegal, junto con la colonización dirigida y la llegada de personas externas impulsadas por grupos armados ilegales. Esta situación no solo reduce la capacidad de los ecosistemas de absorber carbono, sino que también fragmenta hábitats y amenaza la supervivencia de numerosas especies, afectando dinámicas ecosistémicas y propiciando la pérdida de biodiversidad en las áreas afectadas (Minambiente, 2024).

Figura 2

Mapa de Colombia con límites de la Amazonia Colombiana (rojo), y los departamentos que concentran la mayor pérdida de coberturas vegetales por deforestación



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Esta transformación acelerada de los paisajes colombianos impulsada por la deforestación y la minería causa consecuencias devastadoras para los ecosistemas, entre las que se encuentran la pérdida de cobertura vegetal y la fragmentación de hábitats alteran los ciclos hidrológicos, erosionando

los suelos y aumentando la vulnerabilidad de los mismos a eventos extremos como deslizamientos e inundaciones (García-García y Díaz-Timoté, 2022).

Junto con los fenómenos ya conocidos, se estima que cerca del 40 % del territorio colombiano está afectado por la erosión y pérdida de suelo orgánico, lo que equivale a aproximadamente 45 millones de hectáreas. Como se mencionó previamente, las regiones más afectadas incluyen los departamentos de Meta, Caquetá y Guaviare, donde la deforestación para la expansión ganadera y la tala ilegal han acelerado la pérdida de suelo y su capa orgánica (IGAC, 2022).

En la gran escala, la capa de suelo orgánico desempeña un papel crucial en la regulación del clima y los procesos de captura de carbono, al perderse, se reduce la capacidad del suelo para actuar como sumidero de carbono, lo que genera alteraciones climáticas y contribuye al aumento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, impulsando el calentamiento global. La implementación de prácticas agrícolas sostenibles y la restauración de ecosistemas degradados son medidas esenciales para incrementar los niveles de materia orgánica en el suelo y mitigar los efectos del cambio climático (Lal, 2003; Smith, 2008).

Así, el cambio de uso del suelo en Colombia ha inducido una serie de procesos degradativos, entre los que destacan fuertes procesos erosivos del suelo, donde la pérdida de la cubierta vegetal expone el suelo a la acción de los agentes erosivos, favoreciendo el arrastre de partículas y la pérdida de la capa superficial fértil. En casos de actividades extractivas, la contaminación por metales pesados agrava la situación, reduciendo la calidad del suelo y limitando gravemente su capacidad de recuperación. Tanto la erosión hídrica como la erosión eólica se intensifican en áreas deforestadas, acelerando la degradación de los suelos y la pérdida de nutrientes (Minambiente, 2015; Sklenicka et al., 2020).

Ante la gravedad de estas situaciones, existen métodos desarrollados y preestablecidos por la biología y la ecología para iniciar procesos de restauración ecológica, realizando principalmente procesos de revegetación con especies nativas o mantenimiento de áreas revegetadas según el caso, dichas acciones pueden ser enmarcadas en conceptos de restauración, rehabilitación o recuperación, tal como se explican en la tabla 1, según la si-

tuación y las posibilidades reales de llevar el ecosistema a un estado similar al estado inicial, o completamente diferente, pero funcional (hablando en términos de servicios ecosistémicos), (Minambiente, 2015).

Tabla 1
Intervención ecológica según el objetivo

Procedimiento	Objetivos para el ecosistema
Restauración ecológica	Partir de un área degradada, destruida o dañada para iniciar un proceso de restablecimiento, busca recuperar su estructura, composición y función.
Rehabilitación ecológica	Restablecer atributos funcionales o estructurales, junto con la recuperación de servicios ecosistémicos en general
Recuperación ecológica	Retomar la utilidad del ecosistema degradado para la prestación de servicios ambientales que pueden ser diferentes a los servicios del ecosistema Original, siendo integrado y paisajísticamente a su entorno. ecológica

Fuente: Adaptado de Vargas et al., 2007.

Perspectivas para la recuperación ecológica de zonas deterioradas a partir de soluciones de bioingeniería

Siendo conscientes del impacto que han tenido los cambios de uso del suelo y las profundas afectaciones de las actividades antrópicas en el ambiente, la biología y la ingeniería han desarrollado un punto de intersección que propone de forma innovadora y transversal un nuevo curso de acción para aportar soluciones a dichos problemas: la bioingeniería, cuyos desarrollos para la estabilización de taludes inclinados por medio de biomantos y estructuras tipo trincho (ver figura 4) junto con el uso de plantas para procesos de revegetación, con el uso en conjunto de enmiendas orgánicas han desembocado en nuevas soluciones para la recuperación de ecosistemas afectados por efectos antrópicos y procesos erosivos.

La bioingeniería busca aprovechar los procesos naturales y materiales biológicos para apoyar el proceso restauración ecológica que, según el SER (Society for Ecological Restoration) es la acción de asistir el proceso de recuperación de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido para llegar a un estado de mejora que bien puede ser similar al anterior y prestar servicios ecosistémicos siendo autosostenible, o retomando la utilidad de un ecosistema, llegando a obtener la prestación de servicios ecosistémicos diferentes a los del ecosistema original, pero adaptado en el paisaje (SER, 2004). Así, a bioingeniería establece una sinergia entre los procesos naturales y materiales biológicos junto con métodos y herramientas propias de la ingeniería para diseñar, construir y operar sistemas para estabilizar suelos, controlar la erosión y restaurar la vegetación en áreas afectadas (Schiechtel, 1980).

Entre las soluciones desarrolladas por la bioingeniería para la recuperación del suelo y zonas afectadas por erosión e inestabilidad se encuentran: la restauración de la cubierta vegetal y estabilización de terreno por medio del uso de técnicas y materiales biodegradables según la necesidad, sea esta dictada por la afectación como en los casos de estabilización de taludes, zonas con deslizamiento, o pérdida de la cobertura vegetal, atacando procesos erosivos por socavación, desprendimiento, erosión fluvial, laminar y lineal (Li y Eddleman, 2002).

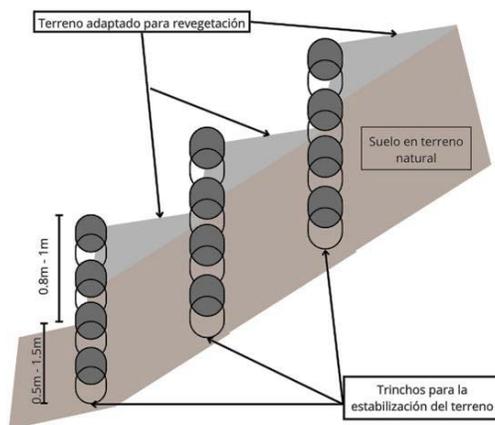
Son múltiples los casos en los que ha sido imperativa la articulación de los conceptos previamente mencionados y manejados por la restauración ecológica, que, junto con procesos geotécnicos como lo son el cálculo de coeficientes de cohesión y análisis de estabilidad para los suelos han proporcionado una visión holística y más completa de los fenómenos erosivos hídricos o gravitatorios (ya sea por socavación o desprendimiento), en casos donde en zonas de afluencia de agua se ve afectada la profundidad y estabilidad del suelo se desarrollan problemas de inestabilidad, afectando la variación de los niveles de los ríos, cambios en la velocidad del cauce y por consiguiente cambios en la capacidad de transporte de sedimentos que tiene el cauce en estado de equilibrio, igualmente visto en casos donde por fenómenos gravitatorios en ambientes terrestres se desarrollan profundos problemas de inestabilidad en el suelo (Peláez y Correa, 2004).

Para el manejo transversal a este tipo de procesos erosivos se ha dado el desarrollo y aplicación estribos o fajinas vivas (Rojas, Castro, y Basto,

2015), basados en los principios de disipación de la energía y equilibrio en la retención de sedimentos mientras se estabilizan los suelos superficiales por medio de la integración de ramificaciones en la superficie del terreno, reforzando las capas de suelo y logrando así una retención y eventual recuperación en el mismo (Benitez Moreno y Sarmiento Colmenares, 2014).

De la misma forma, en los casos donde los fenómenos erosivos se dan en taludes con alto grado de inclinación, y suponen un riesgo de estabilidad al punto de generar movimientos en masa por su forma abrupta, se opta como solución integral el establecimiento de terraceo con trinchos (ver figura 4), modificando la pendiente con una serie de taludes en escalera como se muestra en la figura 3, donde integrando tratamientos de vegetación y realizando un manejo óptimo de aguas superficiales por medio del remodelado del terreno y la incorporación de material vegetal herbáceo y arbustivo, siendo la primera defensa contra la erosión en el suelo, afianzando y aprovechando el crecimiento rápido y las ramificaciones extensas y profundas del sistema radicular de las mismas terreno (Yabar Delgado, 2021). Ahora bien, existen múltiples casos en los que se puede integrar el uso de trinchos y biomantos para estabilizar el terreno (figura 3).

Figura 3
Diagrama de trinchos en escalera para recuperación ecológica de taludes



Fuente: Elaboración propia, 2024.

En los casos donde no existe un grado de inclinación abrupto, y por consiguiente no existe un peligro latente de deslizamiento, es posible optar por el uso de biomantos, los cuales surgen como una solución menos intrusiva en el proceso de recuperación de la capa vegetal y estabilización del terreno, realizado previamente con geomantos (Figura 4) (estructuras en malla formadas por materiales inorgánicos), como mallas metálicas o material sintético, los cuales, según el caso pueden ser adaptados con trinchos para procesos de estabilización de taludes de forma complementaria.

Figura 4

Articulación de trinchos y geomantos para la estabilización de un talud inestable en la vía Bogotá – Fusagasugá, Cundinamarca, Colombia



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Los biomantos, por otro lado, se basan en el uso de material orgánico o vegetal que proporcionan una mejor absorción de nutrientes en el suelo (Figura 5) y que a su vez funcionan como anclajes para el mismo, siendo amigables con el medioambiente por su naturaleza biodegradable, se utilizan fibras vegetales (principalmente fibra de coco), que disminuyen la huella de carbono y la contaminación remanente en el suelo luego de dichos procesos de estabilización. Mientras las raíces de las plantas ayudan a

anclar el suelo, la cobertura vegetal reduce el impacto de las gotas de lluvia, el viento y el flujo de agua superficial. (Lewis, Hagen, y Salisbury, 2001).

Figura 5
Biomanto en estabilización talud

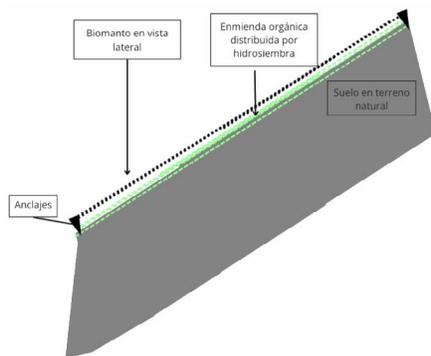


Fuente: Aquanea, (sf).

Si bien los biomantos son una técnica bioingenieril efectiva para revegetar taludes y laderas de manera rápida y económica (Lewis, Hagen, y Salisbury, 2001). Se ha desarrollado la posibilidad de adicionar fertilizantes o enmiendas orgánicas (Figura 6) mediante procesos manuales o de hidrosiembra (Figura 7) una vez establecidos los biomantos, mostrados en la figura 4, dichas adiciones mejoran la fertilidad del suelo y contribuyen al proceso de revegetación, donde predominan gramíneas y vegetaciones arbustivas bajas, dichas enmienda han mostrado tener resultados positivos en la recuperación del suelo apoyando las condiciones para que las plantas introducidas proliferen exitosamente.

Figura 6

Diagrama de un biomanto con dosificación de enmienda orgánica de hidrosiembra en zona de talud erosionado en vista horizontal



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Figura 7

Proceso de hidrosiembra en geomantos sintéticos



Fuente: TDM Colombia (sf).

Algunas mezclas de dichas agregaciones ya son conocidas en el mercado y establecidas en la industria (principalmente norteamericana), existen estudios recientes (Pineda Herrera, Pineda, y Larrañaga, 2022) en los cuales se investiga la posibilidad de articular biomantos con material orgánico compuesto por biocarbón junto con el efecto nutritivo de EM (Microorganismos eficientes) en el crecimiento de plantas *Lupinus sp.* Bajo condiciones controladas en Bogotá, Colombia. Existen beneficios en el crecimiento de las plantas comparado con casos de control en los que solo se utilizó la fibra de coco como sustrato, si bien las agregaciones experimentales

requieren mayor investigación, tienen el potencial de ampliar la gama de productos disponibles para la industria, generando una mayor adaptabilidad de las mezclas agregadas a casos específicos, evitando así el uso de especies generalistas y no nativas en los casos de acción.

Otros estudios realizados previamente soportan el uso de enmiendas orgánicas, tales como López Nuñez, (2020), Bashan, Salazar, Moreno, Lopez y Linderman (2012) y Soler Perez, (2023), Zhang et al., (2013), donde en diferentes casos de erosión, y junto con el uso de biomantos con agregados han mostrado un aumento de disponibilidad de nutrientes en el suelo, sin embargo, en ciertos casos con aumentos inesperados de ciertos elementos como el hierro hasta niveles tóxicos.

Ahora bien, la revegetación de los taludes en terrazas y biomantos es un proceso de suma importancia para la estabilización del terreno, sin embargo, el uso de especies nativas adaptadas a las condiciones climáticas y edáficas de los sitios afectados es fundamental para recuperar la cobertura vegetal y proteger el suelo de la erosión sin afectar negativamente las dinámicas ecosistémicas previamente perdidas (Swaine et al., 2017).

En este contexto, la selección de especies vegetales juega un papel fundamental en el éxito a largo plazo de la restauración. La utilización de especies nativas, adaptadas a las condiciones climáticas y edáficas del sitio es fundamental por múltiples razones ecológicas y sostenibles, entre las cuales se encuentran beneficios en la conservación de la biodiversidad y un mantenimiento de los ciclos bioquímicos y la adaptación al ecosistema (FAO y UNEP, 2020).

Por otro lado, si bien el uso indebido de especies no nativas pueden resultar en un rápido crecimiento poblacional, o teniendo características deseables para la revegetación en el corto plazo, su uso puede llegar generar consecuencias negativas para el ecosistema en el largo plazo, entre las cuales se encuentran el desplazamiento de las especies nativas y alteraciones a los ciclos bioquímicos del ecosistema, afectando la disponibilidad de agua y de nutrientes, el ciclo del agua e inevitablemente, la calidad del suelo, junto con impactos en la fauna y flora local, con el riesgo latente de hibridación de especies nativas y no nativas (en caso de cercanía filogenética), causando un deterioro genético de las poblaciones locales y una eventual pérdida de la biodiversidad en el largo plazo (Zuazo y Pleguezuelo, 2009) (Figura 8).

Figura 8

Proceso de recolonización vegetal en geomanto de fibra sintética, comparado con un manto sin vegetación, en la vía Bogotá – Melgar, Cundinamarca, Colombia



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Teniendo esto en cuenta, es importante tener conocimiento acerca de la distribución de especies nativas de cada zona donde se busque realizar un proceso de revegetación con técnicas bioingenieriles, y según esto, utilizar plantas nativas para este propósito, por lo cual es importante tener conocimiento acerca de los grupos de plantas más utilizados en los procesos de recuperación del suelo en Colombia, entre los que se encuentran las gramíneas, leguminosas, ciperáceas, solanáceas y asteráceas (Figura 9).

a) Gramíneas (*Poaceae*): Los pastos poseen una amplia distribución en diversos ecosistemas, tienen una alta tolerancia a la sequía y al estrés salino, junto con crecimiento rápido y vigoroso tienen la capacidad de formar una red de raíces eficiente que favorece la agregación del suelo y la retención de agua. Han sido ampliamente usadas en el control de la erosión hídrica y eólica, junto con revegetación de taludes y laderas, restauración de áreas degradadas por pastoreo o agricultura, creación de praderas y pastizales (ver figura 8) (García-García y DíazTimoté, 2022).

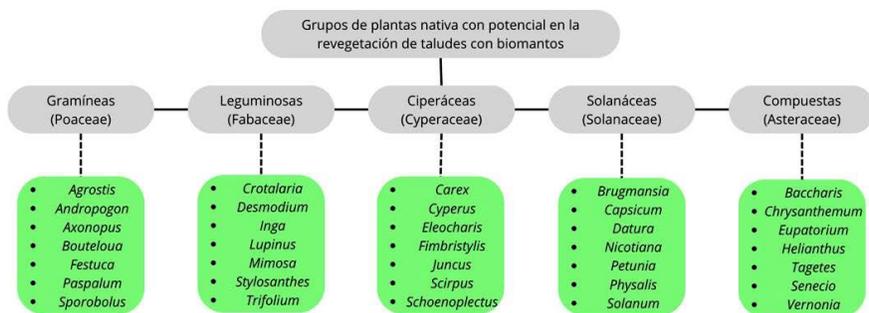
b) Leguminosas (*Fabaceae*): Las legumbres poseen la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico al suelo mediante interacciones simbióticas con bacterias, su aplicación mejora la fertilidad del suelo, gracias a su crecimiento rápido y producción de biomasa. Se aplica en la revegetación de áreas degradadas y permite un positivo control de la erosión y recuperación de la fertilidad del suelo (Gómez Ruiz, 2011).

c) Ciperáceas (*Cyperaceae*): Tienen una amplia distribución en ecosistemas húmedos y acuáticos, alta tolerancia a la inundación y al estrés salino, poseen un crecimiento en mechones densos que favorecen la retención del suelo y la filtración de agua. Son ampliamente utilizadas en el control de la erosión en riberas y márgenes de ríos, revegetación de áreas húmedas y pantanosas, fitorremediación de suelos contaminados, y creación de biofiltros (Lovera y Cuenca, 1996).

d) Solanáceas (*Solanaceae*): Varias especies son pioneras en la sucesión ecológica, junto con su amplia distribución y resistencia, crecimiento rápido y producción de biomasa. Son controladoras de erosión, recuperación de la fertilidad en el suelo y creación de coberturas vegetales para la protección del suelo (Saavedra, Vallarino, Mejía, y Centella, 2021).

e) Compuestas (*Asteraceae*): Su alta diversidad de especies con diferentes adaptaciones, resistencia a gran variedad de ecosistemas y estrés, junto con crecimiento rápido permiten un control de la erosión, revegetación y restauración de la fertilidad del suelo, creando eficazmente coberturas vegetales para la protección del suelo (Morales Meza, 2020; Herrera Torres, 2022). En Colombia existen aproximadamente 200 especies distribuidas en 120 géneros, todos con potencial de recuperación vegetal en biomantos (García-García y Díaz-Timoté, 2022).

Figura 9
Grupos de plantas con potencial de revegetación de biomantos en Colombia



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Las plantas pertenecientes a los grupos previamente expuestos han sido utilizadas en diversos estudios en Colombia y en América, donde han mostrado resultados positivos en la recuperación de biomantos. Ahora bien, existe la posibilidad de apoyar el crecimiento vegetal y añadir especies a las previamente utilizadas, tal como Pineda Herrera, Pineda, y Larrañaga (2022), donde encontraron un crecimiento positivo en plantas del género *Lupinus* bajo el crecimiento de un biomanto de fibra de coco junto con el efecto en conjunto de microorganismos eficientes (EM) y biochar en condiciones controladas.

Dichos estudios base abren la posibilidad de realizar investigaciones adicionales que permitan un óptimo desarrollo de metodologías más avanzadas y versátiles a la hora de estabilizar terrenos con las técnicas mencionadas en este trabajo. De la misma forma, la articulación de varias especies vegetales en terrenos expuestos permite explorar procesos de revegetación integrales, como se muestra en la figura 10, donde en un manto ubicado en la vía Bogotá – Fusagasugá se evidencia el crecimiento en conjunto de Poáceas del género *Agrostis*, junto con calabazas enredaderas de la familia *Cucurbitaceae* (género *Cucúrbita*), sembradas por la comunidad de la zona, generando un aprovechamiento social y una optimización de los recursos disponibles en la tierra.

Figura 10

Proceso de revegetación en manto de estabilización donde se articulan Poáceas y Cucurbitáceas en la vía Bogotá – Fusagasugá, Cundinamarca, Colombia



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Es importante el continuo monitoreo de los ecosistemas para obtener información en el tiempo que permita obtener conclusiones contundentes, (Bustamante et al., 2016) para los eventos en los que se aplican soluciones de bioingeniería, el monitoreo a largo plazo es necesario para comprender mejor los efectos de las soluciones integrales para la deforestación y la erosión. Permitiendo desarrollar eventualmente estrategias más efectivas para la recuperación del suelo y la restauración de la biodiversidad (Paneiva, 2024). Igualmente, la colaboración entre instituciones académicas, gubernamentales y organizaciones no gubernamentales es clave para avanzar en este campo.

Si bien la problemática de la deforestación y la erosión del suelo no es exclusiva de Colombia, es un desafío global, pues la colaboración internacional es fundamental para compartir conocimientos, recursos y experiencias en la lucha contra estos problemas. Iniciativas académicas conjuntas

pueden fortalecer los esfuerzos de conservación y restauración a nivel local y global (Muñoz Ávila, 2022).

De la igual manera, es importante tomar acción respecto la educación y concienciación sobre la importancia de la conservación del suelo, pues son fundamentales para abordar esta problemática. Es crucial involucrar a las comunidades locales en la gestión sostenible de los recursos naturales y fomentar prácticas que protejan el medioambiente, pues la participación comunitaria tiene la potencialidad de ser un motor de cambio hacia un uso más responsable del suelo (Rico Calvano y Rico Fontalvo, 2014). Esto, junto con la implementación de políticas públicas efectivas es esencial para abordar la deforestación y la erosión del suelo en Colombia de forma integral. Incluyendo la regulación de actividades ilegales, junto con la promoción de prácticas agrícolas sostenibles y la protección de áreas críticas para la biodiversidad, dichas políticas deben ser integrales y considerar las necesidades de las comunidades locales y ecosistémicas para proteger y promover el desarrollo del capital ambiental, social, humano y económico de forma sostenible.

Conclusiones

Finalmente, la acción de recuperación de ecosistemas degradados es una medida esencial para recuperar el suelo de las afectaciones generadas por el impacto antrópico, dichas acciones incluyen: la recuperación y estabilización del suelo por medio de técnicas de bioingeniería para dar paso a procesos de reforestación sustentables, la implementación de prácticas agrícolas sostenibles y la promoción de la biodiversidad.

Si bien estas estrategias no solo ayudan a restaurar la capa vegetal, también contribuyen a la mitigación del cambio climático y a la mejora de la calidad del agua y la captura de carbono a gran escala. Aunque la implementación de soluciones propuestas por la bioingeniería y el uso de biomantos es una solución establecida, es imperativo continuar realizando estudios de estas técnicas con la finalidad de obtener una comprensión más profunda de sus efectos a largo plazo y su aplicabilidad en diferentes condiciones ambientales, generando desarrollo constante en el campo y permitiendo la optimización de su uso y mitigando a mayor escala posibles

riesgos asociados, asegurando su eficacia y sostenibilidad en la restauración de ecosistemas con suelos degradados y erosionados.

Referencias bibliográficas

- Bashan, Y., Salazar, B. G., Moreno, M., Lopez, B. R., & Linderman, R. G. (2012). Restoration of eroded soil in the Sonoran Desert with native leguminous trees using plant growth-promoting microorganisms and limited amounts of compost and water. *Journal of Environmental Management*, 102, 26-36. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.12.03>
- Bebbington, A., & Williams, M. (2010). Mining and development in Peru: With special reference to the Rio Blanco Project. *Journal of Latin American Geography*, 9(1), 146-165. <https://perusupportgroup.org.uk/wp-content/uploads/2019/09/Mining-and-Developmentin-Peru-with-special-reference-to-the-Rio.pdf>
- Benítez Moreno, E & Sarmiento Colmenares, L. (2014). *Guía práctica para la estabilización de taludes generados por la construcción de plataformas para perforación mediante la técnica de hidrosiembra, en el área de Campo Llanito Ecopetrol S.A.* 2013. Bucaramanga: Universidad de Santander, 2014.
- Bustamante, M. M. C., Roitman, I., Aide, T. M., Alencar, A., Anderson, L. O., Aragão, L. E. O. C., & Villa, P. M. (2012). Toward an integrated monitoring framework to assess the effects of tropical forest degradation and recovery. *Global Change Biology*, 18(2), 807-822. <https://doi.org/10.1111/gcb.13087>
- FAO, & UNEP. (2020). *The state of the world's forests 2020: Forests, biodiversity and people.*
- FAO, UNEP. <https://www.fao.org/3/ca8642en/ca8642en.pdf>
- García-García, J. A., & Díaz-Timoté, J. (2022). Disponibilidad y eficiencia en el uso de recursos naturales, biodiversidad y servicios ecosistémicos. *Biodiversidad en la Práctica*, 7, e1120-e1120. <https://doi.org/10.21068/26193124.1120>
- Geomallas y mantas. (s/f). *Aquanea*. <https://aquanea.com/geomallas-mantas-taludes/>
- Gómez Ruiz, P. (2011). *Efecto de la densidad de siembra sobre las interacciones biológicas entre las leguminosas *Lupinus bogotensis* y *Vicia benghalensis* con las*

- nativas Solanum oblongifolium y Viburnum tinoides en parcelas experimentales de restauración ecológica del bosque altoandino* (Tesis de maestría, Maestría en Ciencias - Biología, Universidad Nacional de Colombia). Repositorio de la Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/11332>
- González, D. E. E., Ernesto, D., Leonel, O. C., & Basto, R. (2014). *Viabilidad del uso del pasto vetiver para la estabilización de taludes en Colombia* [Tesis de grado, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia]. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/77e09ef9-5b3a-4bae-a60f4835841bb457/content>
- Herrera, S. V. (2022). *Eficiencia de Helianthus annuus en la fitorremediación de suelos contaminados por plomo en pasivos ambientales mineros en los últimos 10 años* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/33903>
- IGAC. (2022). *Actualización de áreas homogéneas de tierras a nivel municipal con fines multipropósito* [Instructivo de sistema de gestión integrado del IGAC]. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. https://www.igac.gov.co/sites/default/files/listadomaestro/in-agr-pc0501_v1_actualizacion_de_areas_homogeneas_de_tierras.pdf
- Lal, R. (2003). *Soil erosion and the global carbon budget*. *Environment International*, 29(4), 437-450. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00192-7](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00192-7)
- Lewis, L., Hagen, S., & Salisbury, S. (2001). *Soil bioengineering for slope stabilization* (WA-RD 491.1). Washington State Department of Transportation. <https://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/491.1.pdf>
- Li, M. H., & Eddleman, K. E. (2002). Biotechnical engineering as an alternative to traditional engineering methods: A biotechnical streambank stabilization design approach. *Landscape and Urban Planning*, 60(4), 225-242. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00057-9)
- López Núñez, R. (2020). *Estrategias para la recuperación de suelos degradados incluyendo el uso de enmiendas orgánicas* [Presentación online]. <https://digital.csic.es/handle/10261/235283>
- Minambiente. (2015). *Guía de restauración ecológica para Colombia*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.minambiente.gov.co/la-deforestacion-baja-en-2023-y-en2024enfrentaamenazas/#:~:text=La%20ministra%20se%3%B1al%C3%B3%20>

- que%2C%20pese,el%20fen%C3%B3meno%20de%20El%20Ni%C3%B1o.
- Minambiente. (2024). *La deforestación baja en 2023 y en 2024 enfrenta amenazas*. Ministerio de Sostenible. <https://www.andi.com.co/Uploads/Plan%20nacional%20de%20restauraci%C3%B3n.pdf>
- Morales Meza, M. J. (2020). *Capacidad de absorción del girasol (Helianthus annuus) en suelos contaminados a diferentes concentraciones de plomo nivel laboratorio* [Tesis de grado, Universidad Peruana Unión]. UPEU-Tesis. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/3188>
- Muñoz Ávila, L. (2022). *La implementación conjunta del Acuerdo de París y los objetivos de desarrollo sostenible en Colombia* (Tesis de maestría, Maestría en Derecho y Economía del Cambio Climático, FLACSO Argentina). <http://hdl.handle.net/10469/18899>
- Paneiva, A. (2024). *Influencia de la estructura del paisaje en el proceso de revegetación natural en locaciones petroleras abandonadas* (Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias del Ambiente y la Salud, Universidad Nacional del Comahue). https://repositoriosdigitales.mincyt.gov.ar/vufind/Record/RDIUNCO_42c4ff5f95e1b4aa97f1c641801055b
- Paz Zambrano, L. E. (2022). *Estudio de la Bioingeniería como alternativa para la estabilización de suelos* [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/dspace/bitstream/10495/29249/1/PazLuis_2022_Bioingenier%C3%ADaDeSuelos.pdf
- Peláez, J. D. L., & Correa, J. A. (2004). *Evaluación del impacto ambiental de proyectos de desarrollo*. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Departamento de Ciencias Forestales. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3257>
- Pineda Herrera, J. C., Pineda, J. A., & Larrañaga, S. C. (2022). *Development of a hybrid coconut fiber-biochar biomantle for bioengineering applications*. Paper presented at the 20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Education, Research and Leadership in Post-pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions”, Boca Raton, FL, USA. https://laccei.org/LACCEI2022-BocaRaton/work_in_progress/WP427.pdf
- Rico Calvano, F., & Rico Fontalvo, H. M. (2014). El uso del suelo, ¿un

- problema de capacidad productiva y de políticas públicas? *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 5(2), 213-231. <https://www.redalyc.org/pdf/5177/517751549002.pdf>
- Rojas, W. G., Castro, D. A. R., & Basto, A. R. (2015). *Viabilidad de la implementación de fajinas para la estabilización de taludes en Colombia* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia]. <http://hdl.handle.net/10983/2555>
- Saavedra, F. G., Vallarino, R., Mejía, G., & Centella, D. (2021). Bioingeniería de taludes: Evaluación del uso de árboles y arbustos como posible mecanismo para incrementar el factor de seguridad. *Revista de Iniciación Científica*, 7(2), 26-38. <http://portal.amelica.org/ameli/journal/338/3382820003/3382820003.pdf>
- Sánchez Mateus, C. P. (2015). *Marco normativo para la minería ilegal como actividad no regulada en Colombia y caso Chocó* [Trabajo de especialización, Universidad Militar Nueva Granada]. <http://hdl.handle.net/10654/7077>
- Schiechtl, H. (1980). *Bioengineering for land reclamation and conservation*. University of Alberta Press. <https://www.sidalc.net/search/Record/un-fao:611736/Description>
- SER (Society for Ecological Restoration). (2004). *The SER International Primer on Ecological Restoration*. Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. https://www.ctahr.hawaii.edu/littonc/PDFs/682_SER-Primer.pdf
- Sklenicka, P., Zouhar, J., Molnarova, K. J., Vlasak, J., Kottova, B., Petrzalka, P., & Walmsley, A. (2020). Trends of soil degradation: Does the socio-economic status of landowners and land users matter? *Land Use Policy*, 95, 103992. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.05.011>
- Smith, P. (2008). Soil organic carbon dynamics and land-use change. *En Land use and soil resources* (pp. 9-22). Elsevier. <https://abdn.elsevierpure.com/en/publications/land-use-change-and-soilorganic-carbon-dynamics>
- Swaine, M. D., & Whitmore, T. C. (1988). On the definition of ecological species groups in tropical forests. *Vegetation*, 75, 81-86. <https://doi.org/10.1007/BF00044629>
- Zhang, Q., Wang, Y., Wu, Y., Wang, X., Du, Z., Liu, X., & Song, J. (2013). Effects of biochar amendment on soil thermal conductivity, reflectance, and temperature. *Soil Science Society of America Journal*, 77(5), 1478-

1487. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0180>

Zuazo, V. H. D., & Pleguezuelo, C. R. R. (2009). *Soil-erosion and runoff prevention by plant covers: A review*. In Sustainable agriculture (pp. 785-811). https://doi.org/10.1007/978-90-4812666-8_48

Sostenibilidad, sustentabilidad y medioambiente. Nuevas tendencias.

Se terminó de editar en diciembre de 2024

en los talleres de Astra Ediciones

Av. Acueducto No. 829

Colonia Santa Margarita, C. P. 45140

Zapopan, Jalisco, México.

33 38 34 82 36

E-mail: edicion@astraeditorial.com.mx

www.astraeditorialshop.com

El medioambiente conceptualizado como un sistema natural ha estado presionado por fuerzas antrópicas que en las últimas décadas se han convertido en fuerzas entrópicas, pues transforman y modifican muchas veces de forma irreversible la morfología de las condiciones originarias de los subsistemas naturales.

Sostenibilidad, sustentabilidad y medioambiente. Nuevas tendencias, es una obra que articula nueve investigaciones preocupadas por la gestión y planificación de la materia y energía, donde suelo, agua, y aire, son analizados bajo diferentes enfoques multidisciplinares.

ISBN: 978-84-10215-96-2



9 788410 215962



Consulta y descarga



Universidad
Autónoma
de Nayarit

