PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de Integración Curricular

Tema:

REVISIÓN DE LOS MÉTODOS PARA LA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES CON EL USO DE VEGETACIÓN

AUTOR:

Adrian Mateo López Montes

Quito, 20 de enero del 2025

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por permitirme concluir una meta más con bendiciones y sabiduría, por no dejarme caer y darme fuerzas para salir adelante.

A mi madre, que cada día me veía llena de ilusiones por llegar a ser un profesional.

A mi padre, que nunca se cansó de brindarme sus consejos y apoyo en todas mis decisiones.

A mi hermana, que soy su ejemplo a seguir.

A mi hermano, que me enseñó a ser mejor persona cada día.

Y a toda mi familia y amigos que estuvieron para mí en los buenos y malos momentos en este proceso de concluir mi carrera universitaria.

AGRADECIMIENTO

Agradezco inmensamente a Dios por permitirme terminar mi carrera universitaria y ser un profesional, por darme salud, inteligencia y muchas bendiciones, por permitirme conocer nuevas personas y excelentes docentes que formaron parte de este largo proceso.

Gracias a mis padres por ayudarme a cumplir mi sueño y concederme el honor de estudiar en esta gran universidad, por darme su apoyo y amor incondicional.

A mis compañeros, gracias por estar en los buenos y malos momentos, por apoyarnos uno al otro.

Gracias a toda mi familia que creyó en mí.

Y finalmente me doy gracias porque nunca me rendí y cumplí mi sueño de ser un profesional, por mantenerme enfocado y no declinar en los momentos más duros, por ser perseverante, por ser inteligente y por ser responsable.

Gracias y mil gracias.

RESUMEN

El presente estudio abarca la revisión y evaluación de métodos sostenibles para la estabilización de taludes utilizando vegetación en áreas específicas de Ecuador, principalmente en regiones montañosas donde el riesgo de deslizamientos de tierra es alto debido a la combinación de factores geológicos y climáticos. Además, incluye un análisis de la sostenibilidad de los métodos basados en vegetación, evaluando los beneficios ecológicos, económicos y sociales a largo plazo. Se investigó cómo estas técnicas pueden integrarse en el contexto ecuatoriano para mitigar los riesgos de deslizamientos de manera rentable y ambientalmente responsable.

La investigación se desarrolló en taludes situados en la región andina ecuatoriana, donde los deslizamientos de tierra son frecuentes debido a la inclinación del terreno y las precipitaciones intensas. Se utilizaron estudios de casos en carreteras, áreas rurales y urbanas afectadas por estos problemas. Finalmente, se investigaron diversas especies vegetales nativas y su efectividad en la estabilización del suelo, comparando su impacto con los métodos tradicionales, como el uso de concreto, acero y geotextiles.

Palabras clave: métodos sostenibles, factores geológicos y climáticos, sostenibilidad, especies vegetales nativas.

ABSTRACT

This study covers the review and evaluation of sustainable methods for slope stabilization using vegetation in specific areas of Ecuador, mainly in mountainous regions where the risk of landslides is high due to a combination of geological and climatic factors. Additionally, it includes an analysis of the sustainability of vegetation-based methods, assessing their long-term ecological, economic, and social benefits. It was investigated how these techniques can be integrated into the Ecuadorian context to mitigate landslide risks in a cost-effective and environmentally responsible manner.

The research was carried out on slopes located in the Andean region of Ecuador, where landslides are frequent due to the steep terrain and intense rainfall. Case studies were used in highways, rural, and urban areas affected by these problems. Finally, various native plant species and their effectiveness in soil stabilization were examined, comparing their impact with traditional methods such as the use of concrete, steel, and geotextiles.

Keywords: sustainable methods, geological and climatic factors, sustainability, native plant species.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción 9

1.1 Justificación 9

1.2 Planteamiento del problema 9

1.3 Objetivos 11

1.3.1 Objetivo General 11

1.3.2 Objetivos Específicos 12

1.4 Alcance 12

Capítulo 2. Fundamentación teórica 12

2.1 Estabilización biotécnica. 12

2.1.1 Principios de la estabilización biotécnica 13

2.1.2 Casos de aplicación 13

2.2 Contexto de la estabilización de taludes en Ecuador. 14

2.2.1 Métodos de estabilización utilizados en Ecuador 15

2.2.2 Dificultades para el desarrollo de estabilización de taludes en el país. 15

2.3 Causas y consecuencias de los deslizamientos de tierra en Ecuador. 16

2.3.1 Causas de los deslizamientos de tierra 16

2.3.2 Consecuencias de los deslizamientos de tierra 17

Capítulo 3. Desarrollo 17

3.1 Fundamentos de la estabilización con vegetación. 17

3.1.1 Estabilización con vegetación: principios y beneficios 18

3.1.2 Aspectos técnicos de la estabilización biotécnica. 19

3.1.3 Técnicas de estabilización con vegetación. 21

3.2 Selección de especies vegetales adecuadas. 33

3.2.1 Criterios para la elección de plantas adecuadas 33

3.2.2 Especies nativas y su rol en la estabilización de taludes. 39

3.2.3 Adaptabilidad de las especies a diferentes condiciones climáticas. 40

3.3 Impacto ambiental y sostenibilidad 44

3.3.1 Importancia de la estabilización de taludes con el uso de vegetación para el desarrollo sostenible. 44

3.3.2 Efectos positivos en la biodiversidad y ecosistemas 46

3.3.3 Beneficios de la vegetación en la conservación del suelo. 48

Capítulo 4. Análisis de resultados 49

4.1 Beneficios de la estabilización con vegetación 49

4.2 Comparativa entre métodos tradicionales y con vegetación. 50

4.3 Discusión de resultados 52

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones 55

5.1 Conclusiones 55

5.2 Recomendaciones 57

Bibliografía 59

Anexos 67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Tras el sismo reportado en distintas provincias del Ecuador, la vía Cuenca - Molleturo presenta deslizamientos de material en distintos sectores 10

Ilustración 2: Estabilización de taludes utilizando vegetación 18

Ilustración 3: Aplicación de técnica de hidrosiembra en un talud mediante máquina hidrosembradora..... 21

Ilustración 4: Estaquillado..... 24

Ilustración 5: Instalación de mallas o mantas orgánicas. 26

Ilustración 6: Tipos de raíces. 27

Ilustración 7: Tipos de raíces. 27

Ilustración 8: Tipos de raíces. 27

Ilustración 9: Curva de Fuerza de extracción vs Desplazamiento..... 28

Ilustración 10:Esquema de una planta de vetiver y su efecto sobre la estabilidad de un talud. 30

Ilustración 11: Croquis general de un muro Krainer 31

Ilustración 12: Operarios colocando troncos en un plano del muro Krainer. 31

Ilustración 13: Efecto de las raíces para el control de deslizamientos profundos. 33

Ilustración 14: Comparativa del radio de raíces para talud de 5m con pendiente 1:1 54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Aplicabilidad de las técnicas de bioingeniería en función de la pendiente del talud 32

Tabla 2: Beneficios de la vegetación respecto a la erosión y la estabilidad. 48

Tabla 3: Comparativa entre métodos tradicionales y con vegetación. 51

Tabla 4: Ventajas y desventajas de los diversos tipos de plantas 52

Tabla 5: Fijación de carbono para diversas especies bajo plantaciones 67

Tabla 6: Listado de árboles que se reproducen por estaca y que son utilizados para estabilización de taludes. 68

Tabla 7: Tabla Comparativa de técnicas Bioingeniería vs Ingeniería convencional 69

Tabla 8: CLASIFICACIÓN DE VEGETACIÓN EN TALUDES 70

Tabla 9: CLASIFICACIÓN DE VEGETACIÓN EN TALUDES 71

Tabla 10: CLASIFICACIÓN DE VEGETACIÓN EN TALUDES 71

Tabla 11: CLASIFICACIÓN DE VEGETACIÓN EN TALUDES 72

Tabla 12: CLASIFICACIÓN DE VEGETACIÓN EN TALUDES 72

Tabla 13: CLASIFICACIÓN DE VEGETACIÓN EN TALUDES 73

Tabla 14: CLASIFICACIÓN DE VEGETACIÓN EN TALUDES 73

Tabla 15: CLASIFICACIÓN DE VEGETACIÓN EN TALUDES 74

Tabla 16: CLASIFICACIÓN DE VEGETACIÓN EN TALUDES 74

Tabla 17: CLASIFICACIÓN DE VEGETACIÓN EN TALUDES 75

Capítulo 1. Introducción

1.1 Justificación

Los deslizamientos de tierra y la erosión son fenómenos geotécnicos que afectan de manera significativa a las zonas con pendientes pronunciadas, especialmente en regiones con lluvias intensas o suelos inestables. Estos eventos no solo representan un riesgo para la seguridad de las personas y la infraestructura, sino que también generan altos costos económicos en reparaciones y medidas de mitigación. Ante este problema, se vuelve indispensable desarrollar métodos de estabilización de taludes que sean efectivos y sostenibles a largo plazo.

La estabilización de taludes mediante el uso de vegetación ofrece una alternativa viable y con menor impacto ambiental ya que las técnicas tradicionales, dependen de materiales como el hormigón, acero, geotextiles, gaviones e incluso materiales de mampostería como piedra y ladrillo. Si bien estas soluciones pueden ser efectivas, suelen tener un impacto ambiental negativo, alterando los ecosistemas locales y afectando la biodiversidad. Por el contrario, la vegetación proporciona una solución natural que no solo refuerza el suelo, sino que también contribuye a mejorar el paisaje y a generar hábitats para diversas especies.

En un contexto donde la sostenibilidad se ha convertido en un pilar fundamental de la ingeniería moderna, el uso de vegetación para la estabilización de taludes representa una opción ecológicamente responsable. Además de reducir el impacto ambiental, este enfoque promueve el desarrollo de prácticas de bioingeniería que son más económicas a largo plazo, ya que requieren menor mantenimiento y se integran mejor en el entorno natural.

Este trabajo tiene como objetivo revisar los métodos actuales para la estabilización de taludes con el uso de vegetación, analizando sus ventajas, limitaciones y oportunidades de mejora. Se justifica la necesidad de realizar este estudio dado que, aunque el uso de plantas para la estabilización del suelo ha demostrado ser eficaz, aún existen aspectos que requieren mayor investigación y optimización, especialmente en lo que respecta a su aplicación en diferentes tipos de suelos y climas.

1.2 Planteamiento del problema

Ecuador es un país situado en la región noroccidental de América del Sur, atravesado por la línea ecuatorial, lo que le otorga una gran diversidad climática y geográfica. Su territorio incluye zonas costeras, la cordillera de los Andes, y la región amazónica, además de las Islas Galápagos en el océano Pacífico. Con una población de más de 17 millones de habitantes, su capital es Quito, situada en la sierra andina. Ecuador es conocido por su biodiversidad, sus paisajes montañosos y su riqueza cultural (Calispa et al., 2023; IG-EPN, 2023; Loja & Chimbo, 2024; Molina et al., 2021; Ojeda, 2014).

Ecuador enfrenta serios problemas relacionados con la estabilidad de los taludes, especialmente en las zonas andinas y en áreas montañosas (Mella, 2024).



Ilustración 1: Tras el sismo reportado en distintas provincias del Ecuador, la vía Cuenca - Molleturo presenta deslizamientos de material en distintos sectores
Fuente: Imagen tomada de Diariocorreo

Molina et al. (2021) explican que esto se debe a varios factores:

- Geografía montañosa: La cordillera de los Andes atraviesa Ecuador de norte a sur, creando regiones con pendientes muy pronunciadas y suelos inestables. La orografía montañosa del país incrementa el riesgo de deslizamientos de tierra, particularmente en áreas donde la infraestructura se ha desarrollado cerca de laderas o taludes.

- Lluvias intensas: Ecuador, particularmente en las regiones montañosas y en la zona amazónica, es propenso a lluvias torrenciales, sobre todo durante las temporadas lluviosas. Las precipitaciones excesivas saturan el suelo y aumentan el riesgo de deslizamientos de tierra, lo que afecta carreteras, viviendas y tierras agrícolas.

- Actividad sísmica: Ecuador está situado en una zona con un alto nivel de actividad sísmica. Los terremotos pueden desestabilizar los taludes, desencadenando deslizamientos de tierra, especialmente en áreas donde los suelos ya son frágiles.

- Deforestación y actividades humanas: La deforestación, causada por actividades agrícolas y la expansión urbana, reduce la estabilidad de los taludes. La remoción de la cobertura vegetal, que normalmente ayuda a mantener el suelo cohesionado, deja los taludes expuestos a la erosión y el deslizamiento. Además, la construcción de infraestructura en áreas de ladera, como carreteras y edificaciones, contribuye a desestabilizar el terreno.

- Mal manejo de sistemas de drenaje: La falta de adecuados sistemas de drenaje en áreas con pendientes inclinadas y la escasa planificación en la gestión de las aguas pluviales aumentan la probabilidad de deslizamientos de tierra. El agua no canalizada correctamente puede infiltrarse en el suelo, incrementando su peso y reduciendo la cohesión entre las partículas del terreno.

Los métodos tradicionales de estabilización de taludes, no siempre son efectivos y pueden tener un impacto ambiental negativo. La falta de soluciones adecuadas no solo pone en riesgo la infraestructura y la vida humana, sino que también causa daños significativos al medio ambiente (Grajales et al., 2021).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Este estudio tiene como propósito analizar y sugerir alternativas sostenibles para la estabilización de taludes mediante el uso de vegetación, con un enfoque en la evaluación de su eficiencia y las ventajas que ofrecen en comparación con los métodos convencionales.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Proponer alternativas viables para la estabilización de taludes mediante el uso de vegetación en diferentes condiciones geotécnicas.
- Comparar el impacto ambiental que provoca la estabilización de taludes mediante el uso de vegetación con relación a los métodos tradicionales que dependen de materiales como el hormigón, acero y geotextiles.
- Identificar los beneficios ecológicos y económicos del uso de vegetación en la estabilización de taludes.
- Plantear las ventajas y desventajas de la estabilización de taludes mediante el uso de vegetación con relación a los métodos tradicionales.
- Determinar la clasificación de vegetación para la estabilización de taludes.

1.4 Alcance

Este estudio se enfocará en la revisión y evaluación de métodos sostenibles para la estabilización de taludes mediante la vegetación con el fin de utilizarlos en regiones montañosas del Ecuador, especialmente en áreas propensas a deslizamientos de tierra y exposición a la erosión. Se analizarán los beneficios ecológicos, económicos y sociales de estas técnicas, considerando su sostenibilidad a largo plazo. Las técnicas se podrán aplicar en la región andina, donde los deslizamientos son comunes debido a la topografía y las lluvias intensas para futuras soluciones. Se analizarán estudios diferentes fuentes de investigación académica de diferentes partes del mundo, así como un análisis de diversas especies vegetales y su efectividad en comparación con métodos tradicionales que usan concreto, acero y geotextiles.

Capítulo 2. Fundamentación teórica

2.1 Estabilización biotécnica.

Un método sostenible para controlar la estabilidad de las pendientes se denomina estabilización biotécnica, que mejora la resistencia de las pendientes combinando vegetación y métodos de ingeniería civil. Este método aprovecha las propiedades mecánicas y biológicas de las plantas para reforzar el suelo, mejorar el drenaje y

promover la estabilidad del ecosistema (Grajales et al., 2021).

2.1.1 Principios de la estabilización biotécnica

1. **Funciones mecánicas de la vegetación:**

- Las raíces actúan como refuerzos naturales que aumentan la cohesión del suelo y resisten las fuerzas de deslizamiento (Giráldez, 2014).
- La vegetación ayuda a disipar la energía del agua de lluvia, reduciendo la erosión superficial (Giráldez, 2014).

2. **Funciones hidrológicas:**

- Mejora el drenaje al reducir el contenido de agua en el suelo mediante la evapotranspiración (Fernández, 2016).
- Disminuye la presión de poros al mantener el nivel freático más bajo (Fernández, 2016).

3. **Funciones ambientales:**

- Favorece la biodiversidad al utilizar vegetación en la estabilización de taludes, se crean hábitats que favorecen la fauna y flora locales, contribuyendo a la conservación de la biodiversidad (Giráldez, 2014).
- A diferencia de los métodos tradicionales que emplean materiales como concreto o acero, la estabilización biotécnica integra elementos naturales, minimizando la contaminación visual y promoviendo una mayor armonía con el entorno (Giráldez, 2014).

2.1.2 Casos de aplicación

La estabilización biotécnica se la puede emplear según (Giráldez, 2014; Sorolla y Rueda, 2022) en:

- Carreteras y vías férreas: Para estabilizar taludes cortados y mejorar la estética
- Riberas de ríos: Protección contra la erosión causada por el flujo de agua.
- Zonas urbanas: Reducción de riesgos de deslizamiento en áreas densamente pobladas.

- Restauración ambiental: Recuperación de áreas degradadas por construcción.

2.2 Contexto de la estabilización de taludes en Ecuador.

La estabilización de taludes en Ecuador es un tema crítico debido a las características geográficas y climáticas del país. Ecuador se encuentra en una zona altamente sísmica, atravesada por la Cordillera de los Andes, lo que da lugar a terrenos montañosos y quebradas con suelos que pueden ser inestables. Además, las intensas precipitaciones asociadas al fenómeno del Niño y a la influencia climática de la región tropical incrementan el riesgo de deslizamientos de tierra y erosión de taludes. Los incendios forestales también pueden afectar a la estabilidad de los taludes ya que quedan desprotegidos y expuestos a la erosión, siendo un riesgo en tiempos de lluvias (Molina et al., 2021; Ojeda, 2014).

1. **Geografía y geología:**
   - Terrenos montañosos con pendientes pronunciadas en la Sierra y regiones de transición hacia la Amazonía (Mella, 2024).
   - Si bien los suelos volcánicos son productivos, su bajo nivel de consolidación los hace vulnerables a deslizamientos (Calispa et al., 2023).
   - Actividad tectónica frecuente, con sismos que agravan la inestabilidad de taludes (IG-EPN, 2023).
2. **Clima:**
   - Intensas lluvias estacionales que saturan los suelos y aumentan el peso de los taludes, disminuyendo su estabilidad (Lalbay, 2024; Molina et al., 2021).
   - Fenómenos extremos como El Niño, que causan erosión extrema y lluvias inusuales (Lalbay, 2024; Molina et al., 2021).
3. **Infraestructura y expansión urbana:**
   - Crecimiento de ciudades y construcción de vías en zonas de alto riesgo, como carreteras en laderas y áreas urbanas en pendientes (Narváez Quiñonez et al., 2020).
   - Efectos de las prácticas mineras y agrícolas, que podrían cambiar la estabilidad

inherente de una pendiente (Almeida, 2019).

2.2.1 Métodos de estabilización utilizados en Ecuador

1. **Soluciones geotécnicas:**
   - Construcción de muros de contención de concreto, gaviones o tierra reforzada (Alva Hurtado, 2019).
   - Uso de anclajes y mallas de protección para reforzar la estabilidad del terreno (Revelo, 2008).
2. **Manejo del agua:**
   - Instalación de sistemas de drenaje subterráneo y superficial para reducir la saturación del suelo (Alva Hurtado, 2019).
   - Implementación de cunetas, canales y estructuras de control de escorrentía (Alva Hurtado, 2019).
3. **Soluciones vegetativas:**
   - Uso de bioingeniería para estabilizar taludes mediante la siembra de especies nativas con raíces profundas (Alva Hurtado, 2019).
   - Recuperación de cobertura vegetal en zonas degradadas (Alva Hurtado, 2019).
4. **Monitoreo y prevención:**
   - Implementación de sistemas de monitoreo geotécnico en áreas de alto riesgo (Alva Hurtado, 2019).
   - Mapas de zonificación y análisis de susceptibilidad a deslizamientos (Alva Hurtado, 2019).

2.2.2 Dificultades para el desarrollo de estabilización de taludes en el país.

- Falta de recursos técnicos y económicos en algunas regiones para implementar soluciones de largo plazo (Hurtado, 2009).
- Acceso limitado a tecnología avanzada (NEC-SE-GC, 2014).
- Necesidad de mayor capacitación y conocimiento sobre técnicas modernas de

estabilización (Loja y Chimbo, 2024).

- Cambio climático, que intensifica la frecuencia y severidad de las lluvias y los desastres naturales (Velásquez et al., 2024).

La estabilización de taludes en Ecuador requiere un enfoque integral que combine ingeniería, manejo ambiental y planificación territorial para mitigar riesgos y proteger tanto a las comunidades como a la infraestructura.

Para superar estas dificultades, es esencial promover la capacitación técnica, aumentar la inversión en infraestructura sostenible e involucrar a las comunidades en el proceso.

2.3 Causas y consecuencias de los deslizamientos de tierra en Ecuador.

2.3.1 Causas de los deslizamientos de tierra

1. **Causas naturales**

Las condiciones geológicas juegan un papel importante en la vulnerabilidad a deslizamientos de tierra, especialmente en suelos arcillosos o poco compactados que son más susceptibles a estos eventos (Ojeda, 2014). Además, la presencia de pendientes pronunciadas en la región andina agrava la situación. Las lluvias intensas también influyen significativamente, ya que la temporada de lluvias, particularmente en invierno, satura los suelos y reduce su estabilidad, y las precipitaciones se intensifican por condiciones climáticas como El Niño (Lalbay, 2024). La actividad sísmica es otro factor, ya que Ecuador está ubicado en una zona de alta actividad tectónica, lo que genera temblores y movimientos que pueden desestabilizar el terreno (IG-EPN, 2023). Por último, la erosión natural causada por el arrastre de materiales por ríos y lluvias reduce la cohesión del suelo, incrementando el riesgo de deslizamientos (JRA, 1984).

2. **Causas antrópicas (humanas)**

La deforestación es uno de los principales factores que contribuyen a la inestabilidad del suelo, ya que la eliminación de vegetación para agricultura, ganadería o urbanización disminuye la capacidad de los suelos para retener agua (Grajales et al., 2021). La urbanización descontrolada también juega un papel importante, ya que la construcción en pendientes o áreas inestables sin estudios técnicos adecuados aumenta

el riesgo de deslizamientos (Nieves, 2011). El mal manejo de aguas, como filtraciones y drenajes inadecuados, incrementa la saturación del suelo, lo que lo hace más susceptible a deslizamientos (Lalbay, 2024). Finalmente, la minería y las obras civiles implican excavaciones y actividades que modifican la estructura natural del terreno, alterando su estabilidad (Almeida, 2019).

2.3.2 Consecuencias de los deslizamientos de tierra

1. **Impactos sociales**

Los impactos sociales de los deslizamientos incluyen la pérdida de vidas humanas, ya que muchas tragedias ocurren en comunidades vulnerables (Alvia et al., 2022; Torres, 2012). También se produce el desplazamiento de personas, ya que las familias afectadas deben abandonar sus hogares, lo que genera crisis. Por último, hay un impacto en la infraestructura, con daños a viviendas, puentes, carreteras y servicios esenciales (Alvia et al., 2022).

2. **Impactos económicos**

Los impactos económicos incluyen pérdidas financieras, ya que los daños pueden generar importantes costos de reparación en ciertas ocasiones (Montero, 2003), además de pérdidas agrícolas debido al daño a cultivos (Pincay, 2023). Finalmente, se presenta una afectación al comercio y turismo local (Mella, 2024).

3. **Impactos ambientales**

Los impactos ambientales incluyen degradación del suelo, ya que la pérdida de capas fértiles dificulta la recuperación agrícola y ecológica (De Noni y Trujillo, 1986). También se presenta alteración de ecosistemas, ya que los deslizamientos pueden cambiar el curso de ríos, destruir hábitats y causar sedimentación en cuerpos de agua (Albarracín y Aucay, 2024). Además, existe mayor vulnerabilidad a desastres futuros, ya que los terrenos afectados son más propensos a sufrir deslizamientos adicionales (Secretaría de Gestión de Riesgos [SGR], 2014).

Capítulo 3. Desarrollo

3.1 Fundamentos de la estabilización con vegetación.

3.1.1 Estabilización con vegetación: principios y beneficios

El uso de la vegetación para estabilizar taludes no solo representa una solución económica y práctica, sino que también se alinea con los objetivos de preservar el medio ambiente y el desarrollo sostenible del país, cabe recalcar que estos métodos se enfocan en taludes poco profundos. En Ecuador, la estabilización de taludes se fundamenta en principios que priorizan la sostenibilidad y la adaptación al entorno local. Se seleccionan especies nativas, como gramíneas, arbustos y árboles de raíces profundas, debido a su capacidad de adaptarse a las condiciones climáticas específicas de cada región. Estas plantas, entre las que destaca el vetiver (Chrysopogon zizanioides), mejoran la cohesión del suelo al reforzar su estructura con sus raíces, lo que reduce significativamente la susceptibilidad al deslizamiento. En zonas húmedas, como la Amazonía y la región costera, la vegetación desempeña un papel crucial en el control de la humedad mediante la evapotranspiración, disminuyendo la saturación del suelo. Por otro lado, en la Sierra, donde los cambios térmicos y la erosión son comunes, se emplean especies resistentes que soportan las condiciones extremas. Además, para maximizar la efectividad, estos enfoques se combinan frecuentemente con sistemas de bioingeniería, como geomallas y barreras vivas, creando soluciones integrales que promueven la estabilidad de los terrenos (Díaz et al., 2018; F. Gómez, 2022; Yépez et al., 2004).

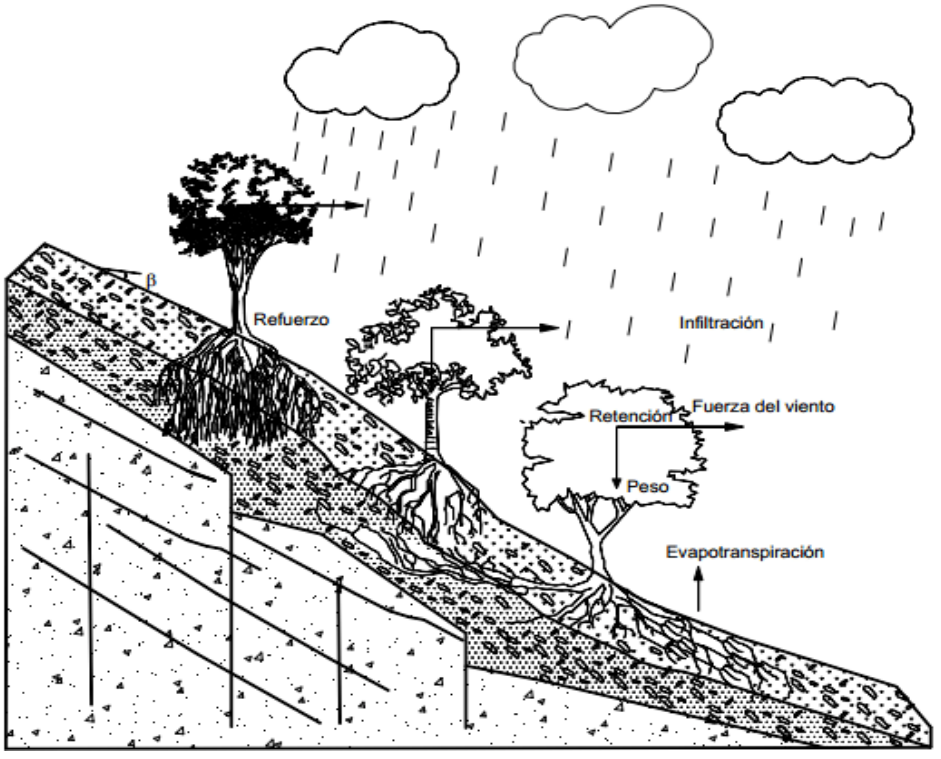


Ilustración 2:) Estabilización de taludes utilizando vegetación

Fuente: Suarez, J. (2009)

Algunos beneficios al estabilizar taludes con vegetación según (Grajales et al., 2021; Marín y Osorio, 2017; Monteros, 2012; Quintero, 2016; Sanchún et al., 2016; Sorolla y Rueda, 2022; Valladares et al., 2011) son:

- Prevención de desastres naturales: En regiones propensas a deslaves, como los costados del cañón del Río Guayllabamba o como la cuenca del Río Monjas, la estabilización de taludes con vegetación podría reducir significativamente el riesgo de derrumbes.
- Restauración ecológica: Este método ayuda a recuperar áreas degradadas por la deforestación, especialmente en la región amazónica y la Costa.
- Mitigación del impacto en infraestructura: Protege carreteras, viviendas y obras públicas ubicadas en terrenos inestables, como las vías en los Andes o las áreas costeras afectadas por la erosión.
- Reducción de la sedimentación: En zonas cercanas a ríos y cuencas hidrográficas, la vegetación controla el arrastre de sedimentos, contribuyendo a la calidad del agua y evitando el colapso de represas.
- Promoción de la biodiversidad: Fomenta la reintroducción de flora y fauna locales, creando ecosistemas más resilientes.
- Efecto estético y turístico: En un país biodiverso como Ecuador, los taludes verdes enriquecen el paisaje, beneficiando proyectos turísticos y zonas urbanas.

3.1.2 Aspectos técnicos de la estabilización biotécnica.

1. <u>Análisis del Talud:</u>

El análisis del talud para la estabilización biotécnica evalúa factores clave como la geometría (altura, pendiente, orientación), composición del suelo (tipo, drenaje, compactación), condiciones hidrológicas (nivel freático, escorrentía) y cargas externas. Este proceso incluye cálculos del factor de seguridad (FS) mediante métodos como el equilibrio límite o modelos numéricos, identificando riesgos de deslizamientos. Además, la selección de vegetación adecuada es crucial, ya que las raíces refuerzan el suelo y reducen la erosión. Un enfoque integrado combina estudios topográficos, geotécnicos e hidrológicos para diseñar soluciones sostenibles que

equilibren ingeniería tradicional y biotécnica (González, s.d.; Sánchez, 2019; TenCate Geosynthetics, s.d.).

2. **Selección de Especies Vegetales:**

Se debe considerar según Arias (2012), B. Gómez (2021), Marín y Osorio (2017), y Sánchez (2019) lo siguiente:

- Especies nativas: Son preferidas por su adaptabilidad al clima y al suelo local.
- Plantas con raíces profundas: Refuerzan el suelo en profundidad (por ejemplo, vetiver o bambú).
- Cobertura rápida: Plantas de crecimiento rápido que protejan la superficie del talud, como gramíneas o leguminosas.
- Tolerancia climática: Selección según las condiciones de temperatura, humedad y altitud del lugar.

3. **Mantenimiento:**

El mantenimiento y reparación son esenciales para garantizar el buen funcionamiento de los taludes, incluyendo el cuidado periódico de sembrados y drenajes los cuales son esenciales para la estabilización. Los sembrados solo son efectivos tras el crecimiento adecuado de las plantas, y su durabilidad depende del cuidado continuo. El mantenimiento se divide en dos etapas: hasta la cobertura total tras el sembrado y hasta la estabilización del sembrado. Los suelos arenosos, aunque más aptos para el crecimiento, requieren mayor cuidado debido a su baja retención de agua, haciendo necesarias medidas como el rociado de emulsiones asfálticas, riego frecuente, y el uso de fertilizantes adicionales para prevenir daños por erosión. Por otro lado, los suelos arcillosos presentan un crecimiento más lento, pero con menor erosión, por lo que no requieren intervenciones aceleradas (Giráldez, 2014; Grajales et al., 2021; JRA, 1984).

La fertilización juega un papel clave en el mantenimiento, siendo necesaria durante 2-3 años en técnicas como el rociado de semillas y más tiempo en taludes de corte duro. Los fertilizantes compuestos, que contienen nitrógeno, fósforo y potasio en proporciones equilibradas (10-20 gr/m³ en nitrógeno puro), se aplican anualmente

para fortalecer la vegetación y desarrollar una capa orgánica autosuficiente. La aplicación puede realizarse manualmente o con rociadores desde la base o la cima del talud. Este proceso asegura la estabilidad a largo plazo del talud, adaptando las técnicas a las condiciones del sitio y del suelo (Grajales et al., 2021).

3.1.3 Técnicas de estabilización con vegetación.

La efectividad de estas técnicas depende de factores como el tipo de suelo, pendiente, clima y acceso al sitio, en muchos casos, se combina más de una técnica para maximizar la estabilidad y durabilidad del talud. La revegetación de taludes es una de las soluciones remediadoras más empleadas en las obras civiles de infraestructuras lineales y representa una de las unidades de trabajo más relevantes (Benítez y Sarmiento, 2014).

1. <u>Hidrosiembra:</u>

La hidrosiembra es una técnica de revegetación que aplica una mezcla de semillas, nutrientes, estabilizantes, y mulch (agregado orgánico) en terrenos difíciles de acceder o propensos a la erosión, utilizando un sistema de bombeo a presión. Este método es ampliamente empleado para estabilizar taludes en carreteras, vías férreas y canteras. Combina rapidez, flexibilidad y sostenibilidad, ayudando a restaurar paisajes y mitigar problemas de erosión y degradación del suelo (Chávez et al., 2021; Martínez & Fernández, 2001; Morán, 2013).



Ilustración 3: Aplicación de técnica de hidrosiembra en un talud mediante máquina hidrosembradora

Fuente: Imagen tomada de GEO Soluciones. (2023).

Las características principales, de acuerdo con Benítez y Sarmiento (2014), Chávez et al. (2021), Martínez y Fernández (2001), y Morán (2013) son las siguientes:

- **Mezcla de insumos:**
    - Contiene semillas, abonos químicos y orgánicos, microorganismos del suelo, estabilizantes y un mulch que protege las semillas.
    - Se mezcla con agua para formar una suspensión que se aplica mediante cañones a presión.
- **Método de aplicación:**
    - El proceso utiliza una hidrosembradora que mezcla los componentes en un tanque.
    - La mezcla se proyecta al terreno mediante mangueras o cañones hidráulicos, alcanzando áreas de hasta 25 metros de altura.
- **Ventajas:**
    - Controla la erosión protegiendo los suelos de la escorrentía y la acción de las lluvias.
    - Permite cubrir grandes superficies en poco tiempo.
    - Es ideal para taludes inclinados y áreas de difícil acceso.
    - El mulch proporciona humedad constante y protege las semillas, incrementando su probabilidad de germinación.
    - Requiere menos intervención en mantenimientos tras la aplicación inicial.
- **Impacto en el suelo:**
    - Favorece el desarrollo de raíces profundas que refuerzan mecánicamente el suelo.
    - Mejora la calidad del terreno gracias a los aportes de materia orgánica y nutrientes.

- Incrementa la estabilidad del terreno al reducir la susceptibilidad a fracturas y movimientos masales.

- **Aplicación específica**

  En suelos áridos, la hidrosiembra se realiza en dos etapas. En la primera etapa, se aplican las semillas y los fertilizantes para favorecer el crecimiento inicial de las plantas.

  En la segunda etapa, se añade el mulch como una capa protectora que asegura la retención de humedad y mejora las condiciones para la germinación. La mezcla utilizada se ajusta cuidadosamente a las condiciones climáticas y del suelo, maximizando así los resultados en cada caso específico.

- **Limitaciones**

  Una de las principales limitaciones de la hidrosiembra es su susceptibilidad al arrastre por lluvias intensas durante las etapas tempranas, lo que puede reducir la efectividad del proceso. Además, el método requiere el uso de maquinaria especializada, tanto para alcanzar áreas elevadas como para manejar la viscosidad de la mezcla proyectada.

2. <u>Estacas vivas o estaquillado:</u>

Las estacas vivas son segmentos de tallos de árboles y arbustos que se insertan en el suelo con el propósito de generar nuevos brotes y formar árboles. Este método es sencillo, rápido y de bajo costo. El uso de estacas vivas puede reducir el exceso de humedad, facilitando el drenaje del talud. Son especialmente útiles para estabilizar pequeños deslizamientos y asentamientos causados por alta humedad en el suelo (Downs et al., 2010). “Sus raíces estabilizarán el suelo, reforzándolo y cohesionándolo, incrementando significativamente la resistencia al deslizamiento. Se pueden utilizar también en combinación con una red o malla orgánica” (Giráldez, 2014).

El procedimiento de aplicación según Downs et al., (2010):

- Realizar un corte perpendicular al eje en la parte superior de la estaca y dar forma de punta a la parte inferior para facilitar su inserción en el suelo.

- Introducir la estaca perpendicularmente a la superficie del talud, utilizando

martillos de caucho y asegurándose de que las yemas apunten hacia arriba. También se puede utilizar una barra de acero para hacer el orificio.

- Colocar de tres a cuatro estacas por metro cuadrado, usando un marco de plantación triangular para asegurar un cubrimiento eficiente.
- Mantener una separación mínima de 1.5 metros entre cada estaca.
- Enterrar al menos dos tercios de la longitud de la estaca (aproximadamente 60 cm) en el suelo.
- Compactar firmemente la tierra alrededor de cada estaca para mejorar su estabilidad.

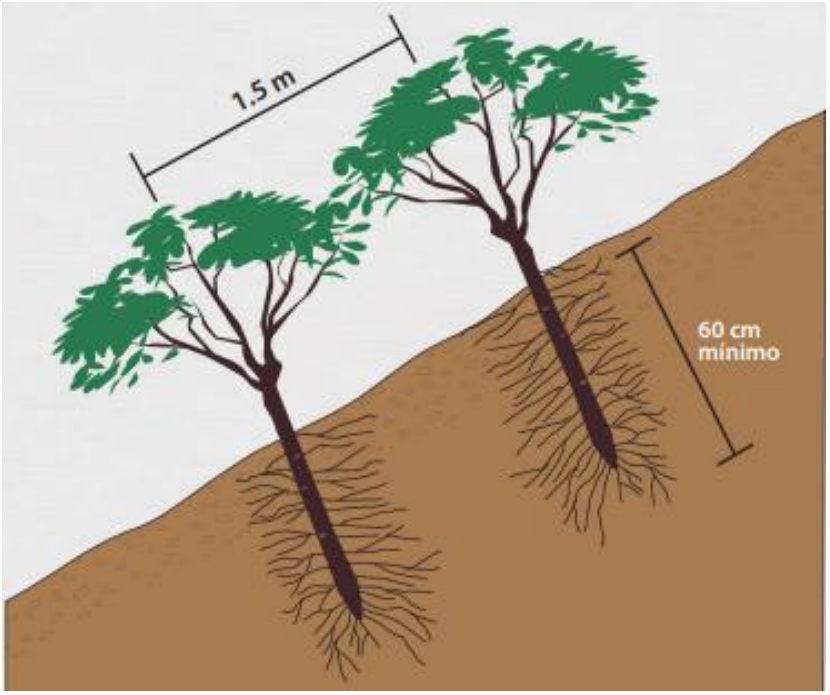


Ilustración 4: Estaquillado
Fuente: (Downs et al., 2010, p. 31)

3. Geotextiles Biodegradables:

- **Mantas Orgánicas**

Las mantas orgánicas, relacionadas con los geotextiles, están compuestas por fibras naturales (como coco, yute, paja, esparto) o sintéticas entretejidas. Su principal

función es controlar la erosión superficial, proporcionar soporte al suelo, y facilitar el crecimiento y enraizamiento de la vegetación, especialmente en siembras o hidrosiembra (Giráldez, 2014).

Recomendaciones según el tipo de fibra de acuerdo a Giráldez (2014):

- Fibras degradables (como paja): adecuadas para superficies con baja erosión y facilidad para la implantación vegetal.
- Fibras duraderas (como coco o esparto): ideales para pendientes pronunciadas, con alto riesgo de erosión y dificultad de restauración vegetal.
- Combinación de fibras degradables y duraderas (como coco y paja): se recomienda en terrenos con erosión moderada y condiciones intermedias de vegetación.

En el mercado, existen mantas orgánicas reforzadas con mallas tridimensionales, integradas con otros geotextiles o geomallas, e incluso con semillas preincorporadas (Giráldez, 2014).

- **Mallas o Redes Orgánicas**

Similares a las mantas, estas redes están compuestas por fibras naturales o sintéticas, pero su diseño permite que los huecos sean proporcionalmente mayores que los hilos que conforman la manta (Giráldez, 2014).

Usos principales:

- Refuerzo de productos geotécnicos como las mantas orgánicas.
- Aplicación en terrenos con granulometría gruesa, como grava o pizarra.

Además, las mallas orgánicas se combinan frecuentemente con técnicas de bioingeniería, como empalizadas, estacas vivas o lechos de ramas, para mejorar la estabilización de taludes (Giráldez, 2014).

A continuación, se muestra la instalación de mallas o mantas orgánicas:

Donde la separación entre grapas verticalmente debe ser aproximadamente 1m y horizontalmente 0.30m, también el tendido entre mallas o mantas debe cubrir mínimo 0.15m horizontalmente de la otra.

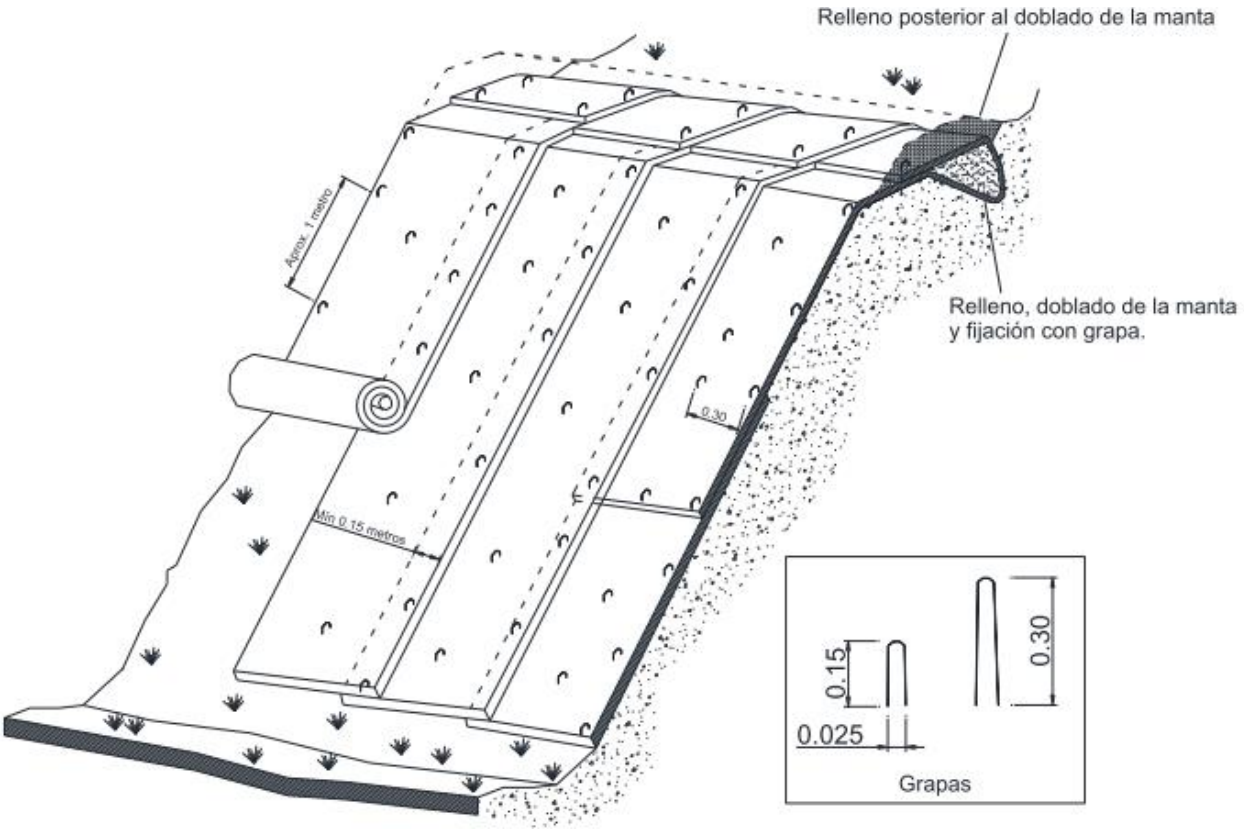


Ilustración 5: Instalación de mallas o mantas orgánicas.
Fuente: (Giráldez, 2014, p. 22)

4. Técnica de Enraizamiento Profundo:

La técnica de enraizamiento profundo se basa en promover el desarrollo de raíces de diferentes tipos de especies vegetales tales que se extiendan a mayores profundidades, con el objetivo de fortalecer la estabilidad del terreno. Estas raíces alcanzan capas más profundas del suelo, aumentando la cohesión entre el sistema raíz-suelo, mejorando la resistencia del terreno contra la erosión y contribuyendo a la estabilización de taludes y zonas vulnerables a deslizamientos (Grajales et al., 2021; Sánchez, 2019; Vargas, 2023).

Para determinar qué especies de plantas, árboles o arbustos son adecuadas para sembrar en los taludes, es fundamental entender los diferentes tipos de raíces y su profundidad (Grajales et al., 2021):

- Lateral: Estas raíces se extienden más hacia los lados que en profundidad, generando un soporte paralelo a la superficie del talud.



Ilustración 6: Tipos de raíces.
Fuente:(Grajales et al., 2021, p. 3)

- Radial: Crecen tanto en profundidad como lateralmente, formando un arco que resulta especialmente útil para estabilizar deslizamientos superficiales.

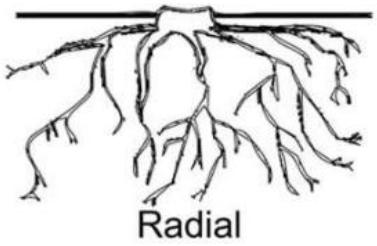


Ilustración 7: Tipos de raíces.
Fuente:(Grajales et al., 2021, p. 3)

- Pivotante: Caracterizadas por una raíz principal vertical, profunda y centrada, con ramificaciones más pequeñas, ideales para reforzar terrenos en profundidad.

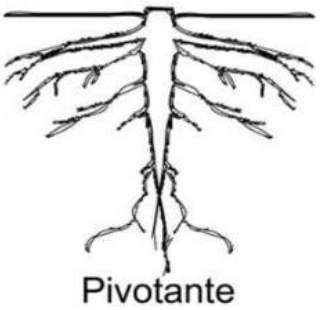


Ilustración 8: Tipos de raíces.
Fuente:(Grajales et al., 2021, p. 3)

Los sistemas radiculares incrementan la resistencia del suelo al mejorar su cohesión, ya que actúan como un vínculo entre las raíces y el suelo, además de favorecer la adhesión de las partículas del suelo a las raíces (Grajales et al., 2021).

La profundidad de las raíces varía según el tipo de vegetación: en árboles grandes generalmente no supera los 5 metros, en arbustos llega hasta 2 metros, y en pastos alcanza alrededor de 30 centímetros. Se ha observado que las raíces tienden a ser más largas en suelos granulares bien drenados, en comparación con suelos arcillosos. Esto podría deberse a que, en suelos con buen drenaje, los árboles necesitan extender sus raíces en busca de agua (Sánchez, 2019).

Las raíces con un diámetro inferior a 20 milímetros son más relevantes para la estabilidad de un talud que aquellas de mayor grosor. Además, la densidad de raíces por volumen de suelo es un factor clave que influye en la resistencia del sistema suelo-raíces. La cantidad de raíces por unidad de área y su grosor pueden analizarse como una proporción entre las áreas de raíces y el suelo en un plano específico de falla. Para obtener esta información, se puede utilizar un método que consiste en recolectar muestras de suelo con raíces, separar las raíces del suelo mediante tamizado y, posteriormente, comparar los volúmenes para determinar la relación entre raíces y suelo (Sánchez, 2019).

El refuerzo que las raíces ofrecen al suelo está influenciado por factores como la resistencia de las raíces al ser extraídas y su estructura. La resistencia al arrancamiento de las raíces del suelo varía según características como el clima, humedad, tipo de suelo y el tipo de raíz, entre otros elementos (Vargas, 2023).

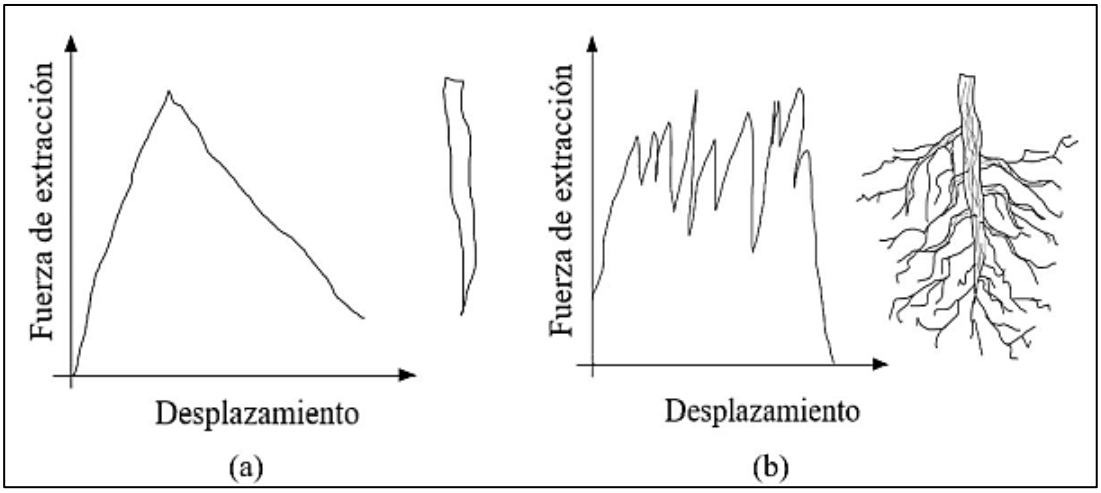


Ilustración 9: Curva de Fuerza de extracción vs Desplazamiento

Fuente: (Vargas, 2023, p. 25)

El proceso de plantación incluye preparar el terreno mediante limpieza, labranza y fertilización; seleccionar semillas o plántulas de calidad adecuadas al clima y suelo; y diseñar la distribución con el espaciamiento necesario. Durante la plantación, se hacen hoyos, se colocan las plantas o esquejes correctamente, se compacta la tierra y se riega. Luego, se protege el área con mantas o geotextiles y se realiza mantenimiento con fertilización, riego y podas según las necesidades del cultivo (Grajales et al., 2021; Sánchez, 2019; Vargas, 2023).

5. <u>Cobertura con Pastos Vetiver:</u>

El vetiver (Vetiveria zizanioides) es una de las especies más utilizadas a nivel mundial para combatir la erosión y para estabilización de taludes. Esta planta, originaria de Asia, se adapta a un amplio rango de condiciones ambientales, creciendo desde el nivel del mar hasta los 2500 metros sobre el nivel del mar. Tolera suelos con pH de 4.5 a 10.5 y temperaturas que oscilan entre 5°C y 45°C (Sánchez, 2019).

El vetiver es una gramínea perenne con aspecto de maleza, que puede alcanzar una altura de hasta 1.6 metros en condiciones óptimas. Su sistema radicular es notablemente robusto, formado por una densa red de raíces fibrosas capaces de penetrar hasta 4 o 5 metros de profundidad. Este sistema de raíces no solo permite a la planta resistir sequías e inundaciones, sino que también la hace adecuada para suelos (Sánchez, 2019).

El vetiver tolera altas concentraciones de contaminantes y no requiere suelos altamente fértiles. Estudios han demostrado que la fuerza de tensión de sus raíces aumenta a medida que disminuye su diámetro, siendo las raíces finas las que aportan mayor resistencia. Su fuerza de tensión oscila entre 40 y 180 MPa para diámetros de raíces de 0.2 a 2.2 mm, con un promedio de 75 MPa en raíces de 0.7 a 0.8 mm, lo que equivale aproximadamente a un sexto de la resistencia del acero blando. Esto posiciona al vetiver como una planta con raíces más fuertes que muchas especies leñosas utilizadas para estabilización de pendientes (F. Gómez, 2022).

Los investigadores explican que las raíces del vetiver, al atravesar las superficies potenciales de corte en el suelo, generan una distorsión en la zona afectada. Este proceso desarrolla tensiones en las raíces, donde el componente tangencial resiste directamente el corte y el componente normal incrementa la presión de confinamiento

en el plano de corte, mejorando así la estabilidad del suelo y reduciendo el riesgo de deslizamientos (F. Gómez, 2022).

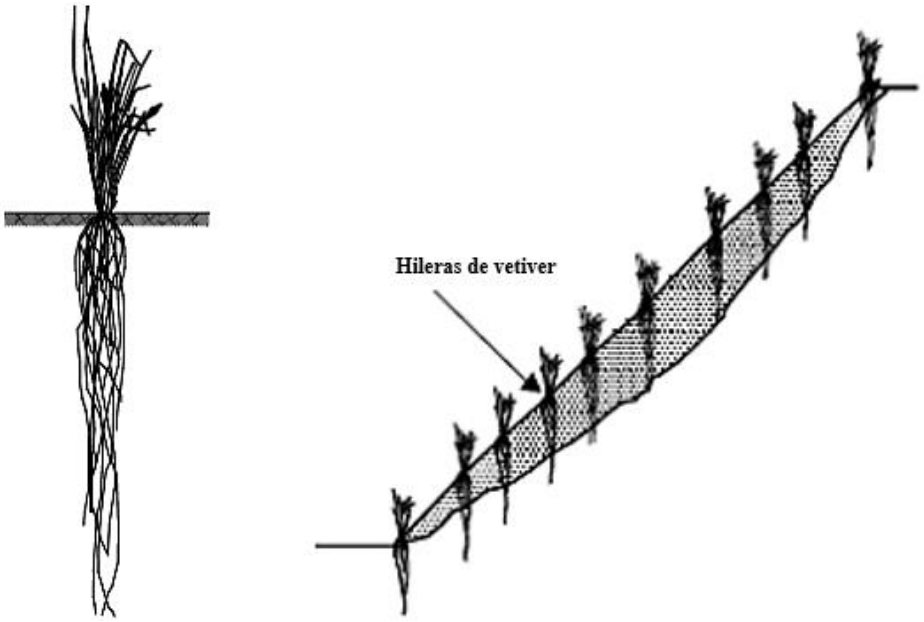


Ilustración 10: Esquema de una planta de vetiver y su efecto sobre la estabilidad de un talud.
Fuente: (Sánchez, 2019, p. 97)

6. Muros Krainer:

Los muros Krainer son estructuras de bioingeniería compuestas por troncos dispuestos horizontalmente, utilizadas para mitigar la erosión y estabilizar taludes. Aunque su función puede abarcar ambos objetivos, es crucial tratar cada caso por separado. Esta técnica ha mostrado resultados variables dependiendo del tipo de río, los materiales empleados y las condiciones del terreno. Su construcción suele aprovechar recursos locales, lo que a veces limita la optimización del diseño. Este documento establece dimensiones mínimas para garantizar su efectividad bajo condiciones típicas (Hernanz et al., s.d.; Ramírez & Reupo, 2020).

El propósito principal de los muros Krainer es estabilizar taludes mediante un diseño que considera criterios hidráulicos, geotécnicos y estructurales. Se busca garantizar la estabilidad de las estructuras por al menos cinco años, tiempo suficiente para que la vegetación implantada estabilice el terreno de manera autónoma (Hernanz et al., s.d.; Ramírez & Reupo, 2020).

El proceso constructivo consiste según Ramírez y Reupo (2020):

- Primero, se realiza el cajeado con el objetivo de preparar el terreno para colocar la primera fila de troncos de madera de forma paralela al cauce, con longitudes que pueden variar entre 2 y 4 metros.
- A continuación, se instalan troncos perpendiculares al cauce del río. La unión entre los troncos de madera se lleva a cabo utilizando técnicas como machihembrado, clavos o varillas de acero.
- Una vez construido un nivel de la estructura, se procede a rellenarlo con tierra vegetal. Además, se colocan estacas de cauce con diámetros que varían entre 3 y 10 centímetros y longitudes aproximadas de 1,5 a 2 metros, o bien plantas con raíces. Posteriormente, se construyen niveles sucesivos siguiendo el mismo procedimiento, colocando los troncos de manera paralela a la ribera y alineándolos con respecto al nivel inferior. Es importante compactar el material colocado entre los diferentes niveles.

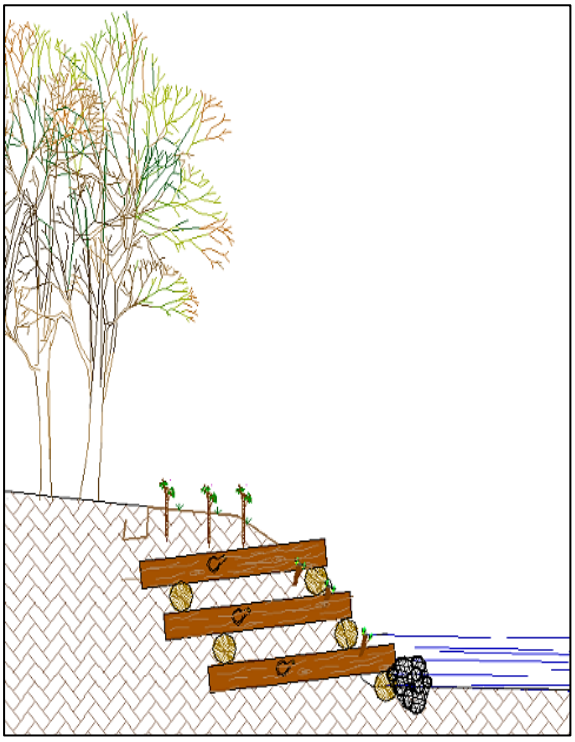


Ilustración 11: Croquis general de un muro Krainer
Fuente: (Hernanz et al., s.d., p. 2)



Ilustración 12: Operarios colocando troncos en un plano del muro Krainer.
Fuente: (Hernanz et al., s.d., p. 3)

- Los niveles de la estructura deben instalarse con un ángulo de contrapendiente de entre el 10% y el 15%. Para los troncos colocados de manera perpendicular a la corriente, se aconseja afilarlos e hincarlos en el talud para facilitar su anclaje en el terreno.
- Se sugiere que los troncos empleados en la construcción de la estructura provengan de tratamientos silvícolas realizados cerca de la zona de obra, evitando el uso de especies invasoras debido al riesgo de rebrote. Además, se recomienda utilizar troncos descortezados.

En la siguiente tabla se puede observar la aplicación de técnicas de bioingeniería según la pendiente del talud:

Pendiente Máxima	**Técnica**
Muy baja (< 15º)	Siembra
Baja (15º - 35º)	Hidrosiembra Transplante de tepes Herbazal estructurado en fibra Esteras o coberturas de ramas Estaquillado Fajinas*
Moderada (35º - 45º)	Empalizadas Biorrollos Geomallas orgánicas Plantación de árboles y arbustos
Alta (> 45º)	Enrejado vivo Entramado vivo Geomallas sintéticas Tierras reforzadas o muro verde Escollera vegetada Gaviones vegetados

Tabla 1: Aplicabilidad de las técnicas de bioingeniería en función de la pendiente del talud
Fuente: (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas C.E.D.E.X, 2011)

3.2 Selección de especies vegetales adecuadas.

3.2.1 Criterios para la elección de plantas adecuadas.

Seleccionar el material vegetal adecuado puede ser un desafío, ya que requiere comprender la capacidad de las plantas para desarrollarse en lugares específicos, así como la efectividad de su sistema radicular para estabilizar y reforzar el suelo en pendientes inestables, aunque es posible contar con información sobre una especie en particular (Grajales et al., 2021).

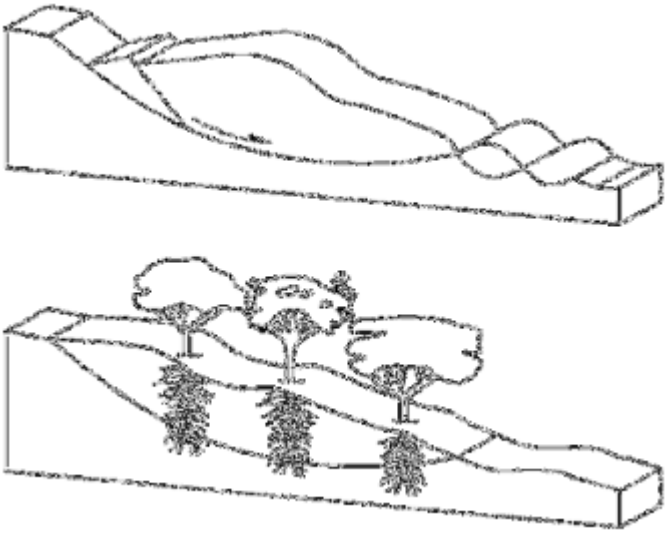


Ilustración 13: Efecto de las raíces para el control de deslizamientos profundos.
Fuente: (Grajales et al., 2021, p. 2)

Es fundamental seleccionar plantas cuyas raíces contribuyan de manera significativa a aumentar las propiedades mecánicas del suelo como la cohesión aparente y su resistencia al corte. Estas raíces deben formar una red densa y efectiva que estabilice las partículas del suelo, minimizando el riesgo de erosión y mejorando la estabilidad general del terreno (Maffra et al., 2019).

A continuación, se presentan los criterios esenciales para la elección de plantas adecuadas, organizados según los aspectos más relevantes para estabilización de taludes y control de erosión:

1. **<u>Resistencia al corte del suelo (criterios de Mohr-Coulomb) y cohesión aparente.</u>**

   Se recomienda elegir especies vegetales con raíces que aumenten tanto la

cohesión como el ángulo de fricción interna del suelo, ya que estas propiedades fortalecen la resistencia al corte del terreno y contribuyen significativamente a mejorar la estabilidad de los taludes. Este efecto se representa mediante la incorporación de un término denominado "cohesión aparente" en la ecuación del Criterio de Falla de Mohr-Coulomb (Grajales et al., 2021; Sanhueza y Villavicencio, 2012).

La cohesión aparente es el aumento en la cohesión del suelo provocado por la presencia de raíces, las cuales mejoran sus propiedades mecánicas al reforzar la resistencia a la tracción. Este efecto contribuye aumentando el factor de seguridad y por consecuencia a la estabilidad del talud (Grajales et al., 2021).

El esfuerzo cortante del suelo, mediante el criterio de falla de Mohr-Coulomb, se da por la siguiente ecuación, según la NEC-SE-GC. (2014):

$$T_f = c' + (\sigma - \mu) * tan\varphi' \qquad (1)$$

Donde:

$T_f = resistencia\ al\ corte\ del\ sistema\ suelo - raíz.$

$c' = cohesión\ efectiva\ del\ suelo.$

$\sigma = esfuerzo\ normal\ total.$

$\mu = presión\ de\ fluidos\ o\ presión\ de\ poro.$

$\varphi' = ángulo\ de\ fricción\ efectivo.$

Incorporando el término denominado "cohesión aparente del suelo debido al refuerzo proporcionado por las raíces de las plantas" en la ecuación del Criterio de Falla de Mohr-Coulomb, según Grajales et al. (2021) y Sanhueza y Villavicencio (2012):

$$T_f = (c' + c_R) + (\sigma - \mu) * tan\varphi' \qquad (2)$$

Donde:

$T_f = resistencia\ al\ corte\ del\ sistema\ suelo - raíz.$

$c' = cohesión\ efectiva\ del\ suelo.$

$c_R =$ *es la cohesión aparente del suelo debido al refuerzo proporcionado por las raíces de las plantas*

$\sigma = esfuerzo\ normal\ total.$

$\mu = presión\ de\ fluidos\ o\ presión\ de\ poro.$

$\varphi' = ángulo\ de\ fricción\ efectivo.$

Diversas investigaciones han señalado que el grado de cohesión aportado por las raíces depende de múltiples factores, como el clima, el tipo de suelo y las especies de plantas presentes. Para cuantificar este aporte, generalmente se emplean valores previamente calculados basados en estudios experimentales. Investigaciones han establecido rangos representativos de cohesión para diferentes especies, los cuales pueden ser utilizados en cálculos de estabilidad de suelos. Estos valores se obtienen principalmente mediante pruebas de laboratorio, como el ensayo de corte directo (Grajales et al., 2021).

El modelo más utilizado se basa en el supuesto de que todas las raíces se disponen perpendicularmente al plano de corte, que la resistencia a la tracción de todas las raíces se activa cuando el suelo falla y que las raíces están firmemente ancladas, sin salirse del suelo cuando se tensan, según Chirico et al. (2013) , se puede calcular C_R con la siguiente ecuación:

$$c_R(z) = k' * \ \ k'' * T_r * RAR(z) \qquad (3)$$

Donde:

$c_R(z) =$ *es la cohesión aparente del suelo debido al refuerzo proporcionado por las raíces de las plantas a una distancia (z) dada.*

$k' =$ *factor de corrección considerado 1.2 utilizado para tener en cuenta el hecho de que las raíces no están orientadas perpendicularmente a la superficie deslizante.*

$k'' =$ *factor de corrección de sesgo y se supone igual a 0,4.*

$T_r =$ *resistencia a la tracción media de las raíces.*

$RAR(z) =$ *es la relación del área de las raíces, es decir, la relación entre el área transversal total de las raíces a una profundidad (z) dada y la extensión del área explorada por el sistema de raíces en un plano vertical (suponiendo que la distribución de las raíces tiene una simetría rotacional).*

$RAR(z)$ se la calcula de la siguiente manera:

$$RAR(z) = RAR_0 e^{-z/b} \qquad (4)$$

Donde:

$b =$ *tiene en cuenta tanto las condiciones climáticas locales como las propiedades de retención de agua del suelo, que se lo define de la siguiente manera:*

$$b = \frac{\alpha}{(\theta_{fc} - \theta_w) * \left(\frac{1 - \lambda\alpha}{T_{GS}}\right)} \qquad (5)$$

$\alpha; \lambda; T_{GS} =$ *caracterizan las condiciones climáticas locales en la temporada de crecimiento.*

La lluvia se modela como un proceso puntual marcado, es decir, como una secuencia de pulsos de lluvia instantáneos con una tasa $\lambda\ [T^{-1}]$ *y profundidades extraídas de una distribución de probabilidad acumulativa exponencial, con un valor medio igual a* (α).

$T_{GS} =$ *es la transpiración potencial promedio para la temporada de crecimiento.*

$\theta_{fc}; \theta_w =$ *son el contenido de agua del suelo a capacidad de campo y punto de marchitamiento.*

2. Sistema radicular

Desde el punto de vista geotécnico, las raíces desempeñan funciones clave al proporcionar anclaje, reforzar el suelo y contribuir a la absorción, conducción y almacenamiento de agua, lo que ayuda a reducir la humedad. La profundidad que alcanzan las raíces varía según la especie vegetal, su edad y las características del suelo. Estas raíces refuerzan la estructura del terreno y actúan como anclajes en zonas con discontinuidades (Hernández et al., 2015).

El impacto de las raíces en la resistencia del suelo se describe con los siguientes aspectos: conectan los materiales de suelos inestables, crean una red densa que funciona como una membrana lateral reforzando las capas superficiales y actúan como pilotes que aumentan la estabilidad. Por otro lado, la resistencia a la tracción de las raíces puede superar el 30% de la del acero, extendiéndose varios metros bajo la superficie del talud, con capacidad para regenerarse tras daños y adaptarse a condiciones adversas (Hernández et al., 2015).

Hernández et al. (2015) menciona que los refuerzos que proporcionan las raíces pueden clasificarse en cuatro tipos:

- Taludes con una capa muy fina de suelo situada sobre una roca sólida y sin imperfecciones que permitan el anclaje de las raíces, donde la

superficie de falla potencial se encuentra en la interfaz entre el suelo y la roca.

- Taludes con una capa superficial delgada de suelo sobre una roca fracturada o con defectos, lo que facilita la entrada y anclaje de las raíces.
- Taludes compuestos por varias capas de suelo, donde las raíces atraviesan las interfaces y fortalecen las uniones entre las diferentes capas.
- Taludes con una capa de suelo profunda, en los que las raíces alcanzan profundidades mayores que las de las posibles superficies de falla.

Las raíces con diámetros menores a 20 milímetros son más relevantes para la estabilidad del talud en comparación con raíces más gruesas (Sánchez, 2019).

La vegetación genera efectos positivos al anclar y reforzar el suelo, mientras que la densidad del sistema radicular contribuye a conservar las partículas del terreno y aumenta la resistencia a la erosión, mejorando significativamente la estabilidad de los taludes (Hernández et al., 2015; Jara et al., 2020).

3. **Adaptabilidad al entorno local**

   Seleccionar plantas autóctonas garantiza una mejor adaptación a las condiciones climáticas, edáficas y ecológicas de la zona, promoviendo la biodiversidad y reduciendo el riesgo de invasión por especies exóticas. Es fundamental evitar especies invasoras que puedan alterar el ecosistema local (Benítez & Sarmiento, 2014).

4. **Resistencia a factores ambientales**

   Optar por plantas capaces de resistir condiciones adversas, como sequías, exceso de agua o fuertes vientos, asegura la supervivencia y eficacia en la estabilización del talud. La vegetación crea un estrato suelo-raíz que mejora la estabilidad del talud por aumento de la cohesión, disminución de presión de poros y resistencia a la erosión (Jara et al., 2020).

5. **Tasa de crecimiento**

Combinar especies de rápido crecimiento para una estabilización inicial con otras de crecimiento más lento garantiza la estabilidad a largo plazo del talud, ofreciendo una cobertura vegetal continua y duradera. Los pastos están entre las especies más efectivas para el control de la erosión y la estabilización de taludes (García et al., s.d.).

6. **Función ecológica**

   Seleccionar plantas que fomenten un ecosistema estable y diverso en el área de intervención es esencial para mantener el equilibrio ecológico y proporcionar hábitats para la fauna local. La vegetación provee de beneficios hidrológicos, hidráulicos y mecánicos al suelo, mejorando la calidad ambiental de los ecosistemas (B. Gómez, 2021).

7. **Compatibilidad con métodos complementarios**

   Es importante elegir plantas que puedan combinarse eficazmente con estructuras de estabilización, como geotextiles o muros Krainer, para potenciar la eficacia en el control de la erosión y la estabilidad del talud. La vegetación puede trabajar con estas estructuras y lograr resultados óptimos (B. Gómez, 2021).

3.2.2 Especies nativas y su rol en la estabilización de taludes.

El uso de una mezcla de especies de diferentes edades suele ser más efectivo para mejorar la fijación del suelo. Las especies nativas son una opción recomendable debido a su adaptación al entorno local. Los pastos ayudan a estabilizar la capa superficial del suelo contra la erosión, mientras que los arbustos y árboles refuerzan las capas más profundas, especialmente si sus raíces atraviesan la superficie de deslizamiento. Emplear una sola especie puede resultar en un refuerzo deficiente durante los primeros años. Aunque la estabilidad de la pendiente aumenta con el crecimiento de los árboles, un manejo inadecuado, como dejar grandes espacios entre ellos, puede generar zonas inestables. De igual manera, una distribución desigual de la vegetación puede dar lugar a áreas propensas a deslizamientos o erosión (Alvarado et al., 2014; Grajales et al., 2021).

Se recomiendan árboles frutales en la base del talud por sus raíces profundas,

regulación de la humedad y estabilización, destacando especies como el tamarindo (Tamarindus indica) o guaba (Inga spectabilis) (Grajales et al., 2021).

Para reforzar la parte media de los taludes, se aconseja emplear especies pequeñas de madera liviana como el Achiote (Bixa Orellana), ligera y frágil e ideal para reforzar taludes debido a la profundidad de sus raíces, ya que aporta estabilidad con un peso mínimo. (Grajales et al., 2021).

En la siguiente sección se detallan algunas especies según la adaptabilidad de las especies a las condiciones climáticas locales que posee el Ecuador.

3.2.3 Adaptabilidad de las especies a diferentes condiciones climáticas.

En Ecuador, gracias a su diversidad climática y geográfica, existen numerosas plantas que pueden ser utilizadas para el control de la erosión, estabilización de taludes y adaptación a condiciones locales específicas. A continuación, se presentan ejemplos de plantas categorizadas según su adaptabilidad al clima:

1. **Plantas adaptadas a climas cálidos y secos**

- **Algarrobo (Prosopis juliflora)**

  - Adaptación: Zonas cálidas y secas, se desarrolla en suelos franco arcilloso-arenoso. Crece en altitudes de 0 hasta los 900 metros sobre el nivel del mar (Castro, 2022; Sanchún et al., 2016).

  - Beneficio: El algarrobo es un árbol de gran follaje y con espinas, que puede crecer entre 12 y 15 metros de altura. Su tronco es grueso, con un diámetro que oscila entre 40 y 80 centímetros, y sus raíces pueden llegar a una profundidad de 53 metros, lo que le permite succionar aguas profundas (Castro, 2022).

- **Guayacán (Tabebuia chrysantha)**

  - Adaptación: Se desarrolla en distintas zonas de la costa, la sierra y en el ámbito internacional. Se adapta fácilmente a diversos climas, con una altitud que oscila entre los 100 y 1500 metros sobre el nivel del mar, y suelos con textura que varía de franco a franco arenoso (Cajamarca, 2020).

- Beneficio: Es eficiente para prevenir la erosión superficial, con altura de 12 a 22 metros y un sistema radicular muy amplio y poco profundo, (Cajamarca, 2020).

2. **Plantas adaptadas a climas templados y húmedos**

- **Eucalipto (Eucalyptus globulus)**

  - Adaptación: Se desarrolla en climas fríos y templados, el suelo requiere un suelo con buen drenaje, baja salinidad, se adapta mejor al suelo franco arcilloso. Crece en altitudes de 0 a 4000 metros sobre el nivel del mar en un tiempo de aproximadamente 2 años (B. Gómez, 2021; Oleas et al., 2016; Tábara, 2024).

  - Beneficio: Es un árbol que sirve para controlar la erosión superficial, se utiliza como barrera rompevientos gracias a sus grandes alturas que pueden llegar hasta 50 metros y por su gran absorción de agua puede llegar a secar pantanos, tiene un sistema radicular poco profundo. Puede llegar a ser invasiva (B. Gómez, 2021; Oleas et al., 2016; Tábara, 2024).

- **Pino (Pinus patula Schiede)**

  - Adaptación: Se desarrolla en climas fríos y muy fríos, crece en altitudes de 2000 a 4000 metros sobre el nivel del mar en aproximadamente 2 años, en suelos franco arcillosos, se ubica en la región andina del Ecuador (Tábara, 2024).

  - Beneficio: Es un árbol con una altura de entre 10 a 15 metros y raíces pivotantes profundas fuertes y extensas. Sus raíces alcanzan mayores profundidades donde se encuentran materiales más compactos, lo que garantiza una mayor resistencia al arranque y un anclaje más profundo (Tábara, 2024).

- **Bambú común (Bambusa Vulgaris.)**

  - Adaptación: Se adapta a cualquier dipo de suelo con temperaturas de cultivo de 0 a 45°C y altitudes de hasta 3000 metros sobre el nivel del

mar (Sánchez, 2019).

- Beneficio: Ayuda a mejorar el drenaje del suelo, pero no controla la erosión, llega a tener alturas de hasta 18 metros con raíces profundas de hasta 5 metros, se recomienda usarlas al pie del talud (Sánchez, 2019).

- **Caña Guadua (Guadua angustifolia)**

  - Adaptación: La caña guadua es una planta tropical que prospera en climas cálidos y húmedos. Se adapta a alturas de 0 a 1800 metros sobre el nivel del mar. Su rango de temperatura óptimo está entre 18 y 25 °C y humedad relativa mayor al 70%. No soporta sequías de larga duración. Los suelos aptos para su desarrollo son aquellos con alta materia orgánica, bien drenados con textura franco arenosa, limosa o areno limosa, arcillosa (Botero, s.d.).

  - Beneficio: Es una especie que crece de manera rápida con alturas de 18 a 30 metros, sus raíces son fibrosas y llegan hasta 3 metros de profundidad. Características similares al bambú, no controla la erosión (Botero, s.d.; Salazar, 2018).

- **Achiote (Bixa Orellana L.)**

  - Adaptación: Crece bien en climas con temperaturas promedio entre 20-30 °C a 1400 metros sobre el nivel del mar (Duque et al., 2022). Al igual que otro cultivo, su desarrollo óptimo dependerá de las condiciones en las que se maneje. Si se cultiva en suelos profundos, fértiles, con buen drenaje tanto interno como externo y sin compactación que detenga el crecimiento de las raíces, se pueden obtener buenos resultados. Por ello, los suelos más recomendables son los de textura franca, franco-arenosa o franco-arcillosa, con un buen drenaje, con alta fertilidad, abundante materia orgánica, adecuada aireación y buena permeabilidad (Cubias, 2019).

  - Beneficio: Es un pequeño árbol de lento crecimiento que alcanza entre 3 y 10 metros de altura en su etapa madura, con raíces pivotantes que

pueden alcanzar entre 3 y 4 metros de profundidad, en etapas iniciales ayuda a controlar la erosión. No suma peso al talud ya que es ligera y frágil, al combinarlos con otras plantas puede estabilizar los taludes de manera efectiva (Grajales et al., 2021).

3. **Plantas adaptadas a climas fríos y de montaña**

- **Cedro (Cedrela montana)**

  - Adaptación: Se ubica en bosques Andinos entre 1500 hasta 3000 metros sobre el nivel del mar, prefiere suelos secos y húmedos que sean bien drenados, tipo franco a franco arenosos. No se desarrolla en suelos de baja fertilidad, y es sensible a suelos encharcados. (Tábara, 2024).

  - Beneficio: Es un árbol grande, que alcanza entre 30 y 35 metros de altura en condiciones óptimas. Presenta raíces no tan profundas tipo radial, controla la erosión y estabiliza los taludes (B. Gómez, 2021; Tábara, 2024).

- **Pasto Vetiver (Chrysopogon zizanioides)**

  - Adaptación: Se adapta a cualquier tipo de clima y suelo, puede crecer desde suelos arenosos hasta suelos arcillosos y a altitudes de hasta 2500 metros sobre el nivel del mar, no tolera la sombra (Downs et al., 2010; Sánchez, 2019).

  - Beneficio: Este pasto sirve para el control de erosión con una altura de 1.6 a 1.5 metros. Puede estabilizar capas inferiores del suelo con un sistema radicular fibroso, largo y resistente, sus raíces pueden alcanzar de 0.3 a 5 metros de profundidad en suelos con buen drenaje. Resiste sequías y falta de agua (Downs et al., 2010; Sánchez, 2019).

- **Pasto Kikuyo (Pennisetum clandestinum)**

  - Adaptación: No se adapta a suelos pobres, se desarrolla en suelos bien o moderadamente drenados. Crece en altitudes de 0 a 3500 metros sobre el nivel del mar en aproximadamente 4 meses (B. Gómez, 2021; Oleas et al., 2016; Tábara, 2024).

- Beneficio: Rápido crecimiento alcanzando alturas de 20 a 60 centímetros y raíces profundas y delgadas, alcanzando hasta 5 metros de profundidad, trabaja mejor controlando la erosión del suelo. Soporta sequías y pisoteo (B. Gómez, 2021; Oleas et al., 2016).

Al igual que el achiote (Bixa Orellana L.) también la guaba (Inga spectabilis) y el tamarindo (Tamarindus indica), son recomendados para la estabilización de los taludes siempre y cuando se ubiquen de manera adecuada en el talud (Grajales et al., 2021).

En climas áridos y semiáridos se presenta una contradicción aparente. Aunque una cobertura densa de plantas herbáceas ofrece una excelente protección contra la lluvia y la erosión eólica, reduciendo casi por completo la pérdida de suelo, a pesar que son de rápido crecimiento, su supervivencia en condiciones mediterráneas durante periodos secos es más difícil en comparación con las plantas leñosas. Estas últimas, aunque menos densas por unidad de superficie, exploran un mayor volumen del suelo, lo que favorece su supervivencia a mediano y largo plazo (Giráldez, 2014).

El diseño óptimo debe combinar ambos tipos de vegetación, especialmente en los primeros años cuando las plantas leñosas aún son pequeñas, aunque implementar esta estrategia no es sencillo (Giráldez, 2014).

Es fundamental priorizar el uso de especies nativas y evitar aquellas invasoras que puedan afectar los ecosistemas locales. La selección de plantas debe basarse en estudios detallados del terreno, el tipo de suelo y las condiciones climáticas específicas de cada región en Ecuador. Además, combinar especies de rápido y lento crecimiento es ideal para asegurar la estabilización del suelo tanto a corto como a largo plazo (Alvarado et al., 2014; Grajales et al., 2021).

3.3 Impacto ambiental y sostenibilidad

3.3.1 Importancia de la estabilización de taludes con el uso de vegetación para el desarrollo sostenible.

A continuación, se analiza la importancia de la estabilización de taludes con el uso de vegetación en relación a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la

ONU.

1. **ODS 6: Agua limpia y saneamiento**

La vegetación en taludes contribuye a la conservación del agua al prevenir la erosión del suelo y mejorar la infiltración de agua. Esto facilita la retención de agua en el suelo y reduce el riesgo de inundaciones y escorrentías, lo que puede contribuir a la gestión eficiente del agua en las zonas cercanas. Además, una mejor calidad del suelo puede llevar a una mayor disponibilidad de agua limpia para las comunidades locales (Molina et al., 2021; Naciones Unidas, 2023; Sanchún et al., 2016; Sorolla & Rueda, 2022; Tábara, 2024).

2. **ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico**

Los proyectos de estabilización de taludes mediante vegetación pueden generar empleo en áreas rurales y urbanas. La implementación de técnicas de revegetación, cuidado de plantas y gestión de proyectos ecológicos ofrece oportunidades laborales y puede contribuir al desarrollo económico local, especialmente en comunidades que dependen de la agricultura y el turismo sostenible (Arias, 2012; Benítez & Sarmiento, 2014; Downs et al., 2010; Naciones Unidas, 2023; Sanchún et al., 2016; Sorolla & Rueda, 2022).

3. **ODS 9: Industria, innovación e infraestructura**

La integración de soluciones basadas en la naturaleza, como la estabilización de taludes con vegetación, puede complementar las infraestructuras tradicionales, con enfoques más innovadores y sostenibles. Este tipo de soluciones contribuye al desarrollo de infraestructuras resilientes y sostenibles (Downs et al., 2010; Naciones Unidas, 2023; Sanchún et al., 2016).

4. **ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles**

La estabilización de taludes con vegetación también tiene implicaciones en la creación de comunidades más resilientes y sostenibles. La prevención de deslizamientos y la mejora del paisaje natural en áreas urbanas y periurbanas mejora la seguridad de las infraestructuras y la calidad de vida de los habitantes (Benítez & Sarmiento, 2014; Downs et al., 2010; Naciones Unidas, 2023; Sanchún et al., 2016; Tábara, 2024).

5. **ODS 12: Producción y consumo responsables**

La utilización de vegetación para la estabilización de taludes fomenta el uso responsable de los recursos naturales, promoviendo la vegetación nativa y adaptada al clima local, lo que reduce la necesidad de insumos externos. Este enfoque contribuye a un modelo de desarrollo más circular y menos dependiente de materiales no renovables (Alvarado et al., 2014; Grajales et al., 2021; Naciones Unidas, 2023; Sanchún et al., 2016).

6. **ODS 13: Acción por el clima**

La estabilización de taludes mediante vegetación contribuye a la mitigación del cambio climático. Las plantas capturan dióxido de carbono, ayudando a reducir la huella de carbono y mejorando la resiliencia de las áreas afectadas por fenómenos climáticos extremos, como deslizamientos de tierra y sequías. Además, al reducir la erosión, se mejora la capacidad de los suelos para almacenar agua y mitigar inundaciones (Downs et al., 2010; Molina et al., 2021; Naciones Unidas, 2023; Sanchún et al., 2016).

7. **ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres**

La vegetación utilizada para estabilizar taludes ayuda a restaurar los ecosistemas terrestres degradados, promoviendo la biodiversidad. Al proporcionar hábitats para diversas especies y mejorar la calidad del suelo, se contribuye a la conservación de la biodiversidad terrestre. Esta acción también reduce la desertificación y mejora la salud de los suelos, lo cual es esencial para la sostenibilidad de los ecosistemas naturales (Arias, 2012; Benítez & Sarmiento, 2014; Giráldez, 2014; Naciones Unidas, 2023; Sanchún et al., 2016; Sorolla & Rueda, 2022).

3.3.2 Efectos positivos en la biodiversidad y ecosistemas

Como ya hemos visto anteriormente la estabilización de taludes mediante vegetación es una técnica clave de bioingeniería que no solo controla la erosión y estabiliza los suelos, sino que también contribuye significativamente al equilibrio de los ecosistemas y la biodiversidad. Las raíces al interceptar la lluvia ayudan a reducir la velocidad de la escorrentía y promover la infiltración, la vegetación

protege el suelo de la degradación y fomenta la recarga de acuíferos. Además, las especies vegetales nativas utilizadas en estas intervenciones restauran ecosistemas degradados, reconstruyen la calidad del suelo y crean condiciones propicias para el desarrollo de más flora y fauna, incrementando así la biodiversidad local (Downs et al., 2010; Mola et al., 2018; Molina et al., 2021; Repetto-Giavelli & Teneb B, 2012; Sanchún et al., 2016).

De igual manera, las especies utilizadas crean microhábitats que favorecen la presencia de una variedad de especies animales y actúan como corredores biológicos en áreas fragmentadas por la actividad humana. Al mismo tiempo, la vegetación regula el ciclo hídrico y captura dióxido de carbono, contribuyendo a mitigar los efectos del cambio climático. La integración de estas técnicas en proyectos de restauración ambiental y de infraestructura reduce el impacto visual, genera beneficios a largo plazo para la conservación del medio ambiente y fortalece los servicios ecosistémicos, como la regulación climática, la calidad del agua y la protección del suelo (Downs et al., 2010; Mola et al., 2018; Molina et al., 2021; Repetto-Giavelli & Teneb B, 2012; Sanchún et al., 2016).

En Ecuador existe el Código Orgánico del Ambiente (COA) que establece lineamientos para la conservación de la biodiversidad y la restauración de ecosistemas degradados. Aunque el COA no aborda específicamente la estabilización de taludes mediante vegetación, esta práctica se alinea con sus objetivos generales y ofrece varios efectos positivos para la biodiversidad y los ecosistemas. La revegetación de taludes contribuye a la restauración de ecosistemas degradados al promover la reintroducción de especies nativas y recuperar funciones ecológicas esenciales, alineándose con el COA, que considera la recuperación de espacios naturales como de interés público. Además, al estabilizar taludes con vegetación autóctona, se favorece la biodiversidad, creando hábitats que proporcionan refugio y alimento a diversas especies, en concordancia con la política del COA de conservar los ecosistemas. Esta práctica también previene la erosión y los deslizamientos, minimizando los impactos negativos en los ecosistemas, lo cual es un principio clave del COA para la prevención del daño ambiental (Código Orgánico del Ambiente (COA), 2017).

3.3.3 Beneficios de la vegetación en la conservación del suelo.

INFLUENCIA EN LA EROSIÓN SUPERFICIAL	**Protección mecánica**	El follaje y los residuos de las plantas disipan la energía de la lluvia y previenen la separación de las partículas del suelo por salpicadura.
	Refuerzo biomecánico del suelo en profundidad	Las raíces retienen las partículas del suelo aumentando su resistencia a la erosión laminar y, sobre todo, al flujo concentrado.
	Retención	El follaje y los tallos incrementan la aspereza del terreno, disminuyendo la velocidad de la escorrentía.
	Infiltración	Las plantas y otros residuos ayudan a mantener la porosidad y permeabilidad del suelo, retrasando el comienzo de la escorrentía.
INFLUENCIA EN LA ESTABILIDAD DEL TALUD	**Refuerzo de las raíces**	Las raíces refuerzan mecánicamente el suelo transfiriendo la tensión de corte del suelo a una resistencia a tracción sobre ellas.
	Disminución de la humedad del suelo	La transpiración y la interceptación por el follaje, puede reducir la humedad y limitar el aumento de una presión de poro positiva.
	Refuerzo	Los tallos pueden actuar como pilotes de refuerzo o apeo, o los contrafuertes de un arco, para contener las fuerzas de corte.
	Sobrecarga	El peso de la vegetación puede, en algunas circunstancias, incrementar la presión de confinamiento de la capa de deslizamiento del talud.

Tabla 2: Beneficios de la vegetación respecto a la erosión y la estabilidad.
Fuente: (Giráldez, 2014, p. 17)

Capítulo 4. Análisis de resultados

4.1 Beneficios de la estabilización con vegetación

1. Prevención de deslizamientos de tierra: La vegetación juega un papel fundamental en la estabilización de taludes, ya que sus raíces ayudan a sujetar el suelo y prevenir deslizamientos, especialmente en áreas propensas a lluvias intensas. Este enfoque ayuda a proteger las infraestructuras y las comunidades cercanas (Chirico et al., 2013; B. Gómez, 2021; Grajales et al., 2021).

2. Mejora de la calidad del suelo: Las plantas no solo estabilizan el terreno, sino que también contribuyen a mejorar la estructura del suelo. Las raíces aumentan la porosidad y la capacidad de retención de agua del suelo, lo que previene la erosión y facilita la infiltración de agua, reduciendo el riesgo de inundaciones (Giráldez, 2014; Grajales et al., 2021; JRA, 1984).

3. Biodiversidad y ecosistema: La vegetación utilizada en la estabilización de taludes promueve la biodiversidad, creando hábitats para diferentes especies. Además, las plantas contribuyen a la captura de carbono mejorando la calidad del aire y mitigando el cambio climático (Benítez & Sarmiento, 2014; Downs et al., 2010; Giráldez, 2014).

4. Estética y paisajismo: El uso de vegetación en la estabilización de taludes también tiene beneficios estéticos. Las plantas mejoran el paisaje, haciendo que las áreas de taludes sean más atractivas visualmente, lo que puede ser un factor importante en el desarrollo de áreas turísticas o en proyectos de rehabilitación urbana (Sanchún et al., 2016; Sorolla & Rueda, 2022).

5. Costos sostenibles y bajos impactos: A diferencia de otras soluciones más costosas y tecnológicas, como el uso de muros de contención o estructuras de ingeniería, la vegetación es una opción más económica y sostenible. Además, tiene menos impacto ambiental y puede ser una solución a largo plazo (Díaz et al., 2018; F. Gómez, 2022).

6. Aumento de la resiliencia frente al cambio climático: Los taludes estabilizados con vegetación ayudan a las comunidades a adaptarse al cambio climático, ya que son menos vulnerables a los deslizamientos de tierra y otras consecuencias climáticas

extremas. También contribuyen a la conservación del agua y la protección del suelo, mejorando la resiliencia general del ecosistema (Díaz et al., 2018; Downs et al., 2010; Giráldez, 2014).

7. Rehabilitación de terrenos degradados: La vegetación puede ser utilizada para rehabilitar terrenos que han sido degradados por la actividad humana o por procesos naturales. A través de la revegetación, es posible restaurar el equilibrio ecológico de las áreas afectadas y mejorar su capacidad de falla (Giráldez, 2014; Grajales et al., 2021).
8. Educación y concientización: El uso de vegetación para estabilizar taludes también puede ser una oportunidad educativa. Promover prácticas sostenibles en la gestión del paisaje y el uso de plantas para mitigar riesgos puede sensibilizar a la comunidad sobre la importancia de la vegetación en el desarrollo sostenible (Alvarado et al., 2014; Grajales et al., 2021; Marín & Osorio, 2017; Sanchún et al., 2016; Sorolla & Rueda, 2022).

4.2 Comparativa entre métodos tradicionales y con vegetación.

De acuerdo a toda la bibliografía citada y estudiada en este documento, se presenta una tabla comparativa sobre la estabilización de taludes entre métodos tradicionales (Ingeniería Civil) y con el uso de vegetación (Bioingeniería):

Aspecto	Métodos Tradicionales	Métodos con Vegetación
Principio de funcionamiento	Uso de estructuras físicas como muros de retención, gaviones, pilotes o anclajes para estabilizar el terreno a base de materiales como el hormigón, acero, madera, piedra, geotextiles.	Utilización de plantas y árboles para reforzar el suelo mediante raíces y controlar la erosión.
Costo inicial	Generalmente alto, debido a los materiales, maquinaria y mano de obra especializada.	Menor en comparación, especialmente al usar vegetación local; aunque requiere planificación inicial.

Impacto ambiental	Puede ser significativo: alteración del paisaje, generación de residuos y consumo de materiales no renovables.	Bajo impacto: mejora de ecosistemas, aumento de biodiversidad y restauración ambiental.
Mantenimiento	Costoso y constante; incluye reparación de estructuras y drenajes.	Bajo y sostenible: se centra en el manejo de la vegetación y la reforestación periódica.
Durabilidad	Alta, dependiendo de la calidad de los materiales y el diseño, aunque puede fallar si no se mantiene.	Duradera, pero requiere tiempo para que las plantas desarrollen raíces profundas y efectivas.
Adaptación al terreno	Limitada, especialmente en terrenos inestables o de difícil acceso, se requiere hacer cortes para crear un plano inclinado ideal para su estabilización.	Alta, debido a la capacidad de las plantas para adaptarse al terreno y sus condiciones.
Eficiencia frente al agua	Necesita sistemas de drenaje adicionales para reducir presión de poro y prevenir acumulación de agua.	Las raíces mejoran la infiltración y reducen el exceso de agua superficial naturalmente.
Biodiversidad	No fomenta biodiversidad; puede generar fragmentación de hábitats o incluso llegar a desaparecerlos.	Fomenta la biodiversidad, creando hábitats para flora y fauna.
Tiempo de implementación	Corto: estructuras pueden ser instaladas rápidamente.	Más largo: las plantas necesitan tiempo para crecer y ser efectivas.
Estética	Apariencia artificial; puede alterar el paisaje.	Apariencia natural; se integra con el entorno y mejora el paisaje visual.
Escenarios de uso	Taludes muy pronunciados, áreas urbanas o zonas con riesgo crítico inmediato de deslizamientos.	Taludes menos pronunciados, zonas rurales, y proyectos que buscan integración ambiental.
Resiliencia climática	Limitada; puede degradarse con el tiempo o bajo condiciones extremas (lluvias intensas, deslizamientos).	Alta; las plantas crecen y se adaptan al cambio climático y a las condiciones locales.

Tabla 3: Comparativa entre métodos tradicionales y con vegetación.

Fuente: Elaboración Propia

4.3 Discusión de resultados

Hay que tener en cuenta varios aspectos a la hora de hacer el estudio del uso de vegetación para estabilizar un talud ya que como se mencionó la efectividad de cualquier biotécnica depende de varios factores como el tipo de suelo, el clima, la inclinación del talud, características de la vegetación, entre otros. Es por ello que debemos considerar que especie vegetal utilizar de acuerdo a las necesidades. A continuación, se muestra las ventajas y desventajas de las diferentes especies vegetales para la estabilización de taludes:

Tipo	Ventajas	Desventajas
Pastos	Versátiles y baratos; variedades para escoger con diferentes tolerancias; fácil de establecer; buena densidad de cobertura.	Raíces poco profundas y se requiere mantenimiento permanente.
Juncos	Crecen rápidamente y son fáciles de establecer en riberas de ríos.	Difíciles de obtener y el sistema de plantación no es sencillo.
Hierbas	-Variedades para escoger existen especies que se reproducen por estaca. -Raíz profunda, buena cobertura, bajo mantenimiento.	Algunas veces son difíciles de establecer y no se consiguen raíces.
Arbustos	-Variedades para escoger existen especies que se reproducen por estaca. -Raíz profunda, buena cobertura, bajo mantenimiento.	Algunas veces son difíciles de establecer y no se consiguen raíces.
Árboles	Raíces profundas, no requieren mantenimiento.	Es demorado su establecimiento y generalmente son más costosos.

Tabla 4: Ventajas y desventajas de los diversos tipos de plantas
Fuente: (Downs et al., 2010, p. 22)

La mejor opción para estabilizar taludes depende del contexto, por ejemplo, los árboles son ideales para proyectos a largo plazo gracias a sus raíces profundas y durabilidad, aunque su desarrollo sea lento. Los arbustos ofrecen una solución intermedia con raíces profundas, mientras que los pastos son rápidos de establecer. Las hierbas combinan buena cobertura y raíces profundas, pero pueden ser difíciles de establecer, y los juncos son específicos para zonas húmedas. Una combinación de pastos para protección inicial y árboles o arbustos para estabilidad estructural a largo plazo es la solución más efectiva y sostenible.

Hay que tener en cuenta que las condiciones del suelo en los taludes suelen ser poco favorables para establecer una cubierta vegetal de forma inmediata. Por ello, puede ser necesario realizar la colonización del área en etapas progresivas, imitando el proceso de sucesión ecológica natural. Inicialmente, se introducen especies rústicas, resistentes y con capacidad colonizadora, que preparan el terreno. Una vez que estas plantas están bien establecidas, se incorporan otras especies de mayor complejidad biológica, que podrán desarrollarse gracias a las mejoras en el suelo realizadas por las primeras (Monteros, 2012).

Se realizó una comparación entre un talud sin cobertura vegetal y otro con vegetación para evaluar su efecto en el factor de seguridad. El estudio tomó en cuenta una planta con raíces de 1 metro de profundidad que contribuía con 5 kPa a la cohesión del suelo, observándose un aumento mínimo en el factor de seguridad. Por ello, aunque las plantas son efectivas para controlar la erosión, su uso como única medida para estabilizar taludes es insuficiente y debe complementarse con otras técnicas (Grajales et al., 2021).

Otro escenario evaluado fue la presencia de árboles en la base del talud, lo que permitió analizar su influencia en el incremento del factor de seguridad. Según la teoría, las raíces de los árboles ubicados en esta zona contribuyen de manera notable a la estabilidad del talud, en contraste con otras ubicaciones que podrían tener efectos adversos. Los resultados mostraron que las raíces con una profundidad de 2 metros proporcionaron un aporte significativo al factor de seguridad, a diferencia de aquellas que alcanzaban solo 1 metro de profundidad (Grajales et al., 2021).

Se puede evidenciar en la siguiente gráfica:

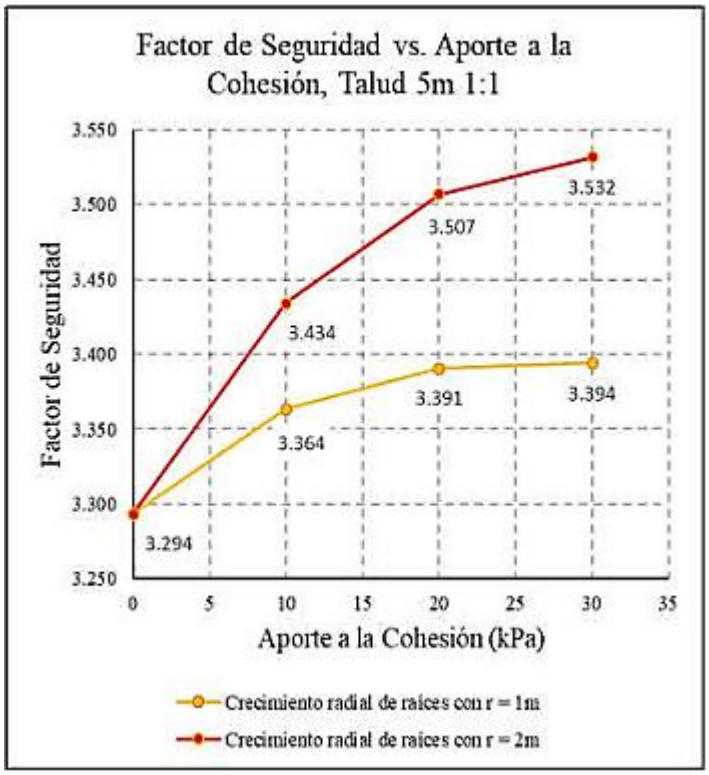


Ilustración 14: Comparativa del radio de raíces para talud de 5m con pendiente 1:1

Fuente: (Grajales et al., 2021, p. 32)

El factor de seguridad (FS) es crucial para garantizar la estabilidad de los taludes, las plantas con raíces profundas contribuyen significativamente al FS al reforzar el suelo mediante su sistema radicular, aumentan la cohesión y reducen la infiltración de agua, disminuyendo la presión de poros. Es esencial elegir especies que se ajusten a las condiciones climáticas y edáficas locales para asegurar su funcionalidad y supervivencia (Grajales et al., 2021; Sanhueza & Villavicencio, 2012).

Los deslizamientos de taludes asociados a procesos erosivos, principalmente por precipitación, han llevado a un incremento en la implementación de vegetación como medida de control. La remoción de arbustos y árboles con raíces profundas ha demostrado disminuir significativamente la estabilidad de los taludes, esto subraya la importancia de las raíces en la resistencia al corte del suelo y la necesidad de incorporar especies estratégicamente seleccionadas en estas áreas para la estabilización de los taludes. El uso de árboles frutales en la base de los taludes es una opción recomendada debido a su sistema radicular profundo y

fuerte, aunque es esencial considerar el peso adicional que generan durante la producción de frutos. Las especies frutales nativas, adaptadas al clima y condiciones locales, destacan por su desarrollo tanto en zonas urbanas como rurales y su capacidad de retener agua, regulando la humedad del suelo y previniendo su saturación. Por lo tanto, es fundamental priorizar especies nativas y ubicarlas estratégicamente para maximizar los beneficios en la estabilización de taludes y el control de la erosión (Grajales et al., 2021).

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- La vegetación puede contribuir positivamente a la estabilidad de los taludes mediante la interceptación de lluvias, la extracción de agua a través de la evapotranspiración, y la reducción de la presión de los poros en el suelo. Este efecto ayuda a mantener un contenido adecuado de humedad, lo que mejora la resistencia al deslizamiento y la consolidación del talud.

- El refuerzo mecánico del suelo por las raíces de las plantas es una de las principales ventajas, ya que estas refuerzan el suelo a través de la transferencia de resistencia por corte. Las raíces pueden aumentar la cohesión y la resistencia a la deformación del suelo, lo que mejora la estabilidad de las pendientes.

- La vegetación ayuda a controlar de mejor manera la erosión superficial, lo cual reduce la velocidad de escorrentía y favorece una mejor distribución del agua en el talud.

- El efecto de infiltración de las raíces también ayuda a mantener la porosidad y la permeabilidad del suelo, lo que puede mejorar la capacidad de absorción de agua y disminuir el riesgo de saturación que podría generar deslizamientos.

- La vegetación también tiene desventajas que pueden reducir la estabilidad de los taludes, como el peso adicional de las plantas lo que puede incrementar la carga sobre la pendiente y alterar la estructura del suelo, también el crecimiento de raíces poco profundas sin llegar a cubrir el posible plano de falla puede hacer que sea ineficiente la técnica aplicada.

- Es importante hacer un análisis del tipo de especie que se va a utilizar, se

recomienda que sea local, si no lo es, hay que tener en cuenta que se adapten al clima y al tipo de suelo para que no sea contraproducente e ineficaz la técnica aplicada y se logre estabilizar de manera adecuada el talud en estudio.

- Los métodos basados en vegetación (bioingeniería) son más sostenibles, ya que restauran ecosistemas, fomentan la biodiversidad y promueven la resiliencia ambiental. Por otro lado, los métodos tradicionales, tienen un impacto negativo significativo en el medio ambiente debido al uso de materiales no renovables y la alteración del paisaje.

- La bioingeniería es generalmente más económica y requiere menor mantenimiento a largo plazo, ya que la vegetación se adapta y se fortalece con el tiempo. En contraste, los métodos tradicionales tienen un costo inicial elevado y requieren mantenimiento constante.

- Los métodos tradicionales ofrecen resultados rápidos y efectivos en situaciones críticas o en taludes muy pronunciados, mientras que los métodos con vegetación son más adecuados para proyectos a largo plazo y terrenos menos críticos, ofreciendo estabilidad gradual pero duradera.

- La vegetación se adapta mejor al terreno y al clima local, integrándose de manera natural en el paisaje y mejorando su estética. En comparación, los métodos tradicionales tienden a ser rígidos y alteran visualmente el entorno.

- Para modelar un talud y seleccionar la técnica de estabilización adecuada se necesita tener en cuenta la resistencia a la tracción o extracción del sistema radicular de las especies, como la profundidad que pueden alcanzar las raíces, sin embargo, esta información no existe completamente para todas las especies, por lo tanto, existen limitaciones e incertidumbres.

- Hay que tener en cuenta el sistema radicular de las especies que se van a utilizar ya que las raíces radiales o pivotantes son ideales para estabilizar estratos profundos, mientras que las raíces laterales sirven para el control de erosión o estabilizar estratos superficiales. Se ha observado que las raíces crecen más cuando el árbol está en un suelo bien drenado y granular, en comparación de cuándo se encuentra en un suelo arcilloso. Este fenómeno parece deberse a la necesidad del árbol de

buscar agua cuando el drenaje es adecuado.

- Cada técnica de estabilización de taludes presenta ventajas y limitaciones que las hacen más adecuadas según las condiciones del terreno y los objetivos del proyecto. La hidrosiembra y los geotextiles biodegradables son ideales para una protección rápida y temporal, mientras se establece la vegetación. Por otro lado, técnicas como el estaquillado y la cobertura con pastos vetiver ofrecen soluciones sostenibles y efectivas en suelos propensos a la erosión o zonas húmedas, aunque requieren un manejo cuidadoso en su implementación. La técnica de enraizamiento profundo, al igual que los muros Krainer, destaca por su capacidad de proporcionar estabilidad estructural a largo plazo, siendo más adecuadas para taludes críticos y pendientes pronunciadas. La combinación de estas técnicas, según las características del sitio y las necesidades específicas, permite garantizar una estabilización eficiente y ambientalmente sostenible.

- Para poder modelar y diseñar un talud estabilizado correctamente con vegetación desde el punto de vista de la Ingeniería Civil se busca asesoramiento en un equipo interdisciplinario, donde trabajen juntos agrónomos, biólogos y forestales.

5.2 Recomendaciones

- Seleccionar plantas con sistemas radiculares profundos y densos que proporcionen un refuerzo mecánico significativo sin agregar peso excesivo a la pendiente para evitar el crecimiento de raíces que formen fisuras o canales que puedan desestabilizar la pendiente

- Es recomendable evitar especies con raíces poco profundas que puedan comprometer la estructura del suelo, las raíces poco profundas se recomiendan solo para control de erosión superficial.

- Implementar un control adecuado de la vegetación para evitar la saturación excesiva del suelo, que podría generar un peso extra y disminuir el factor de seguridad del talud.

- Realizar un monitoreo continuo de las pendientes con vegetación, especialmente en condiciones climáticas extremas, para verificar si el efecto de la evapotranspiración y la reducción de la presión de los poros es suficiente para mantener la estabilidad.

- Utilizar especies nativas adaptadas al clima y al tipo de suelo local para asegurar que las plantas contribuyan positivamente a la estabilidad y biodiversidad del ecosistema sin causar efectos negativos a largo plazo.
- Establecer un diseño adecuado de la vegetación, considerando tanto los efectos positivos como negativos.
- Para el modelado de los taludes se puede utilizar softwares como Optum G2.
- Considerar el tipo de suelo al seleccionar las especies vegetales, las raíces deben ser capaces de penetrar profundamente para proporcionar un anclaje adecuado.
- Utilizar una combinación de métodos tradicionales y bioingeniería puede ser la mejor solución, especialmente en áreas con riesgos críticos.
- Realizar un análisis exhaustivo del tipo de suelo, pendiente y condiciones climáticas antes de elegir el método adecuado. Para taludes pronunciados o urbanos, priorizar estructuras de ingeniería; para áreas rurales o zonas con objetivos ecológicos, optar por la bioingeniería.
- Invertir en capacitación, investigación y políticas que prioricen la bioingeniería como una estrategia sostenible en la estabilización de taludes, especialmente en proyectos que busquen integración ambiental y reducción del impacto ambiental.
- Existen más técnicas de estabilización de taludes o control de erosión con el uso de vegetación, sin embargo, se ha estudiado las técnicas más relevantes, viables y efectivas. Por lo tanto, se espera que en futuros proyectos de Ingeniería Civil se prioricen estas técnicas, así se promueve un desarrollo sostenible y amigable con el medio ambiente.

Bibliografía

1. *Diariocorreo*. (19 de Marzo de 2023). Obtenido de Diariocorreo: https://diariocorreo.com.ec/81847/nacional/gobierno-decide-declarar-emergencia-en-azuay-por-deslizamientos-ocurridos-tras-terremoto-en-via-cuenca-molleturo#:~:text=Tras%20el%20sismo%20reportado%20en,de%20material%20en%20distintos%20sectores.&text=El%20Gob

2. Fernández, J. (28 de Septiembre de 2016). *Obras Urbanas*. Obtenido de Obras Urbanas: https://obrasurbanas.es/vegetacion-taludes/

3. GEO Soluciones. (2023). *GEO Soluciones*. Obtenido de GEO Soluciones: https://www.geosoluciones.com.ar/blog/post/un-paso-a-paso-sobre-la-tecnica-de-hidrosiembra-en-taludes

4. Kogut, P. (2 de Febrero de 2024). *EOS DATA ANALYTICS*. Obtenido de EOS DATA ANALYTICS: https://eos.com/es/blog/degradacion-del-suelo/#:~:text=La%20degradaci%C3%B3n%20del%20suelo%20se%20produce%20de%20forma%20natural%2C%20pero,proceso%20en%20las%20%C3%BAltimas%20d%C3%A9cadas.

5. Suarez, J. (2009). *Researchgate*. Obtenido de Researchgate: https://www.researchgate.net/figure/Figura-7-Estabilizacion-de-taludes-utilizando-vegetacion-Suarez-J-2009_fig2_270157957

6. Albarracín, D., & Aucay, A. (2024). *Análisis de la susceptibilidad a deslizamientos mediante técnicas geomáticas del cantón Santa Isabel, Provincia del Azuay*. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.

7. Almeida, M. D. (2019). *Estudio de caso sobre la gobernanza del sector minero en el Ecuador*.

8. Alva Hurtado, J. (2019). *Soluciones geotécnicas en estabilización de taludes*. www.jorgealvahurtado.com

9. Alvarado, V., Bermúdez, T., Romero, M., & Piedra, L. (2014). Plantas nativas para el control de la erosión en taludes de ríos urbanos. *Spanish Journal of Soil Science*, *4*(1), 99–111. https://doi.org/10.3232/SJSS.2014.V4.N1.07

10. Alvia, D., Mero, C., & Quiroz, C. (2022). *La percepción social del riesgo por deslizamiento en el Cantón Portoviejo del Ecuador.* 1–14.

11. Arias, V. (2012). *Colonización de taludes artificiales por medio de la vegetación natural*. Universidad Complutense de Madrid.

12. Benítez, E., & Sarmiento, 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*. UNIVERSIDAD DE SANTANDER.

13. Botero, L. (s.d.). *Reproducción de la Guadua Angustifolia por el método de Chusquines*.

14. Cajamarca, M. (2020). *Manejo agroforestal del árbol de Guayacán (Tabebuia chrysantha (Jacq.) G. Nicholson)*. Universidad Agraria del Ecuador.

15. Calispa, M., Samaniego, P., Santamaría, S. D., & Vásconez, F. J. (2023). Los suelos de los páramos del Ecuador. *Los páramos del Ecuador: Pasado, presente y futuro*, 40–74. https://doi.org/10.18272/USFQPRESS.71.C258

16. Castro, N. (2022). *Propagación y prendimiento inicial del Algarrobo (Proposis juliflora) para uso forrajero en la Comuna Río Verde provincia de Santa Elena* [Universidad Estatal Península de Santa Elena]. https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/8810/1/UPSE-TIA-2022-0074.pdf

17. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas C.E.D.E.X. (2011). *Guía sobre técnicas de restitución y restauración de cauces en el cruce de ríos por infraestructuras lineales enterradas con vistas a la EAE de planes de infraestructuras.*

18. Chávez, K., Ayala, C., & Laos, A. (2021). *Propuesta de remediación del talud mediante la técnica de hidrosiembra en el tramo Jr. Tacna a Jr. Diego de agüero en el distrito de Magdalena del Mar* [Universidad San Ignacio de Loyola]. www.repositorioacademico.usmp.edu.pe

19. Chirico, G. B., Borga, M., Tarolli, P., Rigon, R., & Preti, F. (2013). Role of Vegetation on Slope Stability under Transient Unsaturated Conditions. *Procedia Environmental Sciences*, *19*, 932–941.

https://doi.org/10.1016/J.PROENV.2013.06.103

20. Código Orgánico del Ambiente (COA). (2017). *Código Orgánico del Ambiente*. https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/01/CODIGO_ORGANICO_AMBIENTE.pdf?utm.com

21. Cubias, K. (2019). *Germinación y efecto de la nutrición en Achiote (Bixa orellana L.)* [Instituto Tecnológico de Conkal]. https://conkal.tecnm.mx/images/POSGRADO_NEW/GEN_2016-2018/Karina%20Guadalupe%20Cubias%20Nu%C3%B1ez.pdf

22. De Noni, G., & Trujillo, G. (1986). *Degradacion del suelo en el Ecuador : principales causas y algunas reflexiones sobre la conservacion de este recurso*.

23. Díaz, J., Rodrigo, M., Miralles, E., Díaz, L., Valdés, S., Canalda, L., & De la Peña, E. (2018). *Guía de buenas prácticas para la adaptación de las carreteras al clima*.

24. Downs, M., Zilbert, L., Cantón, Y., & Lanzas, L. (2010). *Manual de Bioingeniería Reduciendo riesgos y adaptándonos al cambio climático.* 1–82. www.cosude.org.ni

25. Duque, E., Aguirre, M., & Tamayo, A. (2022). Caracterización fenotípica, genotípica y ensayos de autopolinización en 18 accesiones de achiote (Bixa orellana L.) en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, *46*(2), 117–134. https://doi.org/10.15517/RAC.V46I2.52052

26. García, V., Rojas, T., Vargas, M., & Castro, L. (s.d.). *Selección de plantas para el control de la erosión hídrica en Costa Rica mediante la metodología de criterio de expertos*. 1–6. Recuperatus 17 ianuarius 2025, ab https://livingcostarica.com/wp-content/uploads/2022/05/Plant-selection-for-erosion-control-in-Costa-Rica.pdf?utm.com

27. Giráldez, J. (2014). *Manual de técnicas de estabilización biotécnica en taludes de infraestructuras de obra civil*. 1–57. https://digital.csic.es/bitstream/10261/110010/1/ManualVersionFinal.pdf?utm.com

28. Gómez, B. (2021). *Clasificación de vegetación en taludes para el control de erosión y la estabilidad con raíces*. Universidad Industrial de Santander.

29. Gómez, F. (2022). *Evaluación de la resistencia mecánica de la raíz del vetiver y su interacción con suelos de ceniza volcánica para la estabilización de suelos*. Universidad Nacional de Colombia.

30. González, P. (s.d.). *Propuesta para la estabilización y restauración de la Barda del Ñireco conservando la biodiversidad*.

31. Grajales, F., 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. https://doi.org/10.33412/rev-ric.v7.2.3336

32. Hernández, R., Perdomo, D., & Rincón, J. (2015). *Implementación de fibras naturales en la estabilidad de taludes*. https://repository.ugc.edu.co/server/api/core/bitstreams/b578602d-d506-4f92-906a-4e75cb97416e/content

33. Hernanz, M., González, M., García, J. M., Saiz, A., Sánchez, F., & Aparicio, M. (s.d.). *Estabilización de taludes mediante muros Krainer y empalizadas de troncos*. 1–11.

34. Hurtado, M. (2009). *Modelo para estabilización de taludes en la carretera Selva Alegre - Saguangal que permita disminuir costos de mantenimiento*.

35. IG-EPN. (2023, nouember 1). *Peligro Sísmico - Instituto Geofísico - EPN*. https://www.igepn.edu.ec/mapas/peligro-sismico/mapa-peligro-sismico.html

36. Jara, A., José, M., Morales, C., & Pérez, P. (2020). Evaluación de las técnicas de vegetación como método para la estabilización de taludes. *IV EXPO DE INVESTIGACIÓN DE INGENIERÍA CIVIL*. https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/11982/Evaluaci%C3%B3n%20de%20las%20t%C3%A9cnicas%20de%20vegetaci%C3%B3n.pdf?sequence=1&utm.com

37. JRA. (1984). *Manual de protección de taludes*.

38. Lalbay, D. (2024). *Impacto de las precipitaciones en la estabilidad de taludes en los Andes del sur del Ecuador* [UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA]. http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27096

39. Loja, C., & Chimbo, L. (2024). *Evaluación y mapeo de susceptibilidad a deslizamientos para una vía de segundo orden en los Andes del sur del Ecuador*. http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27218

40. Maffra, C., Sousa, R., Sutili, F., & Pinheiro, R. (2019). The Effect of Roots on the Shear Strength of Texturally Distinct Soils. *Floresta e Ambiente*, *26*(3), 1–11. https://doi.org/10.1590/2179-8087.101817

41. Marín, R. J., & Osorio, J. P. (2017). Efectos de la vegetación en la estabilidad de laderas:una revisión. In *Revista Politécnica* (T. 13, Numerus 24).

42. Martínez, C., & Fernández, B. (2001). *Papel de la hidrosiembra en la revegetación de escombreras mineras*. 1–12.

43. Mella, C. (2024, iunius 17). *Un deslizamiento provocado por las lluvias sepulta un barrio entero y deja diez muertos en Ecuador | EL PAÍS América*. https://elpais.com/america/2024-06-18/un-deslizamiento-provocado-por-las-lluvias-sepulta-un-barrio-entero-y-deja-diez-muertos-en-ecuador.html?utm.com

44. Mola, I., De Torre, R., & Sopeña, A. (2018). *Guía Práctica de Restauración Ecológica*. https://ieeb.fundacion-biodiversidad.es/

45. Molina, A., Vanacker, V., Rosas Barturen, M., Bonnesoeur, V., Román, F., & Ochoa, B. F. (2021). *Infraestructura natural para la gestión de riesgos de erosión e inundaciones en los Andes: ¿Qué sabemos? 6*(5).

46. Montero, J. (2003). *Riesgos de origen geológico y geomorfológico: deslizamientos de tierras, identificación, análisis y prevención de sus consecuencias*. *23*, 1–33. https://revistas.um.es/areas/article/view/117871/111451

47. Monteros, I. (2012). *Estudio para la estabilización del talud del Km 13 al 15 de la Carretera 'Calderón-Guayllabamba'*. Universidad Internacional del Ecuador.

48. Morán, K. (2013). *Optimización de la hidrosiembra para tratamiento de suelos agrícolas degradados en la microcuenca del Río Cutilcay, Azogues-Cañar*.

49. Naciones Unidas. (2023). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023: Edición especial*.

50. Narváez Quiñonez, I. T., Durán Saavedra, G. A., Menoscal Cevallos, J. J., & Bayón Jiménez, M. (2020). Espacio urbano periférico y la construcción social del riesgo en ciudades intermedias. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, *13*. https://doi.org/10.11144/JAVERIANA.CVU13.EUPC

51. NEC-SE-GC. (2014). *NEC - GEOTÉCNIA Y CIMENTACIONES*.

52. Nieves, D. (2011). *Análisis de las causas y efectos de los deslizamientos en el Barrio Luz de América del Cantón Quinindé Provincia de Esmeraldas periodo 2008-2011*. 1–48. http://repositorio.iaen.edu.ec/handle/24000/3985

53. Ojeda, M. (2014). *Gestión de riesgos para obras geotécnicas en taludes*. 1–254. https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/2219

54. Oleas, N., Touma, B., Altamirano, P., & Bustamante, M. (2016). *Plantas de las quebradas de Quito: Guía Práctica de Identificación de Plantas de Ribera*. 1–69. www.trama.ec

55. Pincay, M. A. (2023). Estimación de riesgo por deslizamiento en la parroquia Noboa, 24 de Mayo, Manabí. *UNESUM-Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria. ISSN 2602-8166*, *7*(1), 103–118. https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v7.n1.2023.708

56. Quintero, J. D. (2016). *Guía de buenas prácticas para carreteras ambientalmente amigables*.

57. Ramírez, H., & Reupo, C. (2020). *Análisis comparativo entre muros de concreto armado y muros Krainer para estabilizar el talud del río Rímac en San Juan de Lurigancho* [Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. http://hdl.handle.net/10757/652419

58. Repetto-Giavelli, F., & Teneb B, E. (2012). Análisis de la regeneración natural de la vegetación en taludes de caminos de la Ruta Y-85, Parque Karukinka, Tierra del Fuego, Chile. *Anales del Instituto de la Patagonia*, *40*(2), 55–65.

https://doi.org/10.4067/S0718-686X2012000200005

59. Revelo, V. U. (2008). *Modelo para la estabilización de taludes en las carreteras del subtrópico del nor occidente del Ecuador a fin de evitar accidentes de tránsito y disminuir los costos de operación vehicular*. http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/2714

60. Salazar, J. (2018). *Manual de Silvicultura de la caña guadua para Ecuador by inbarlac - Issuu*. 1–43. https://issuu.com/inbarlac.media/docs/2019_-_manual_silvicultura_inbar_-_arauclima?utm.com

61. Sánchez, J. N. (2019). *Estabilización de taludes mediante la técnica de bioingeniería con cultivo de pastos vetiver en zonas tropicales, año 2019*. Universidad Continental.

62. Sanchún, A., Botero, R., Beita, A. M., Obando, G., O.Russo, R., Scholz, C., & Spinola, M. (2016). *Restauración funcional del paisaje rural: manual de técnicas* (T. 3). Masterlitho S.A.

63. Sanhueza, C., & Villavicencio, G. (2012). Influencia de la cohesión aparente generada por raíces sobre la estabilidad de un talud natural en las dunas de Reñaca. *Revista de la construcción*, *11*(1), 16–31. https://doi.org/10.4067/S0718-915X2012000100003

64. Secretaría de Gestión de Riesgos [SGR]. (2014). *Estudios y herramientas producidos en el Ecuador para comprender la vulnerabilidad territorial*.

65. Sorolla, A., & Rueda, I. (2022). *La bioingeniería del paisaje*.

66. Tábara, C. (2024). *Análisis del uso de la vegetación para la estabilización de taludes y deslizamientos superficiales* [Universidad Técnica Particular de Loja]. https://bibliotecautpl.utpl.edu.ec/cgi-bin/abnetclwo?ACC=DOSEARCH&xsqf99=140245.TITN.

67. TenCate Geosynthetics. (s.d.). *Guía de diseño: Estabilización de taludes*. Recuperatus 23 december 2024, ab https://www.mirafi.academy/notas-t%C3%A9cnicas/

68. Torres, B. A. (2012). *Deslizamientos en taludes inducidos por altas*

precipitaciones en vias intermunicipales en Colombia.

69. Valladares, F., Balaguer, L., Mola, I., Escudero, A., & Alfaya, V. (2011). *Restauración ecológica de áreas afectadas por infraestructuras de transporte*.

70. Vargas, E. (2023). *Herramientas de Bioingeniería para la estabilización de taludes*.

71. Velásquez, J., Mendoza, P., & Sánchez, L. (2024). Análisis de la estabilidad del talud de suelo ubicado detrás de la Urbanización Valle Alto en la vía Manta – Portoviejo. *Polo del Conocimiento*, *9*(5), 1544–1558. https://doi.org/10.23857/pc.v9i5.7219

72. Yépez, G., Luque, O., Rodríguez, O., & Silva, O. (2004). *Boletín Vetiver*. www.vetiver.org

Anexos

Especie	Edad (años)	Fijación de carbono (ton/ha)
Pinus caribea	15	59
Leucaena sp	7-8	21-42
Pinus patula	20	72
Casuarina sp	10	21-55
Cupressus lusitanica	20	57
Acacia nilotica	10-15	12-17
Melina		8,2
Teca		4,9
Laurel		5,4
Pochote		3,3
Eucaliptus deglupta	7-10)	9,5
Pinus sp.		4,6
Ciprés		8,5
Bambú	7-10	8-12

Tabla 5: Fijación de carbono para diversas especies bajo plantaciones

Fuente: (Downs et al., 2010, p. 74)

Nombre común	Nombre científico	Distancia de plantación
Aliso	Alnus Jorullensis	2 a 3 m.
Anaco	Erythrina poeppigiana	2 a 3 m.
Aro	Trichantera gigante	1.5 a 3 m.
Arrayán	Myrcia popayanesis	1.5 a 3 m.
Balso	Ochoroma pyramidale	2 a 3 m.
Búcaro	Erythina fusca	2 a 3 m.
Casuarina	Casuarina equisetifolia	2 a 3 m.
Chachafruto	Erythina edulis	1.5 a 3 m.
Ciprés	Cupressus lusitanica	2 a 3 m.
Eucalipto globulus	Eucalyptus globulus	2 a 3 m.
Eucalipto grandis	Eucalytus grandis	2 a 3 m.
Guacimo	Guazuma ulmifolia	2 a 3 m.
Gualanday	Jacaranda caucana	2 a 3 m.
Guamo macheto	Inga densiflora	1.5 a 3 m.
Leucaena	Leucaena leuccephala	1.5 a 3 m.
Matamatón	Gliricidia sepium	1.5 a 3 m.
Melina	Gmelina Arborea	2 a 3 m.
Nauno	Pseudosamanea guachapele	2 a 3 m.
Pino oocarpa	Pinus oocarpa	2 a 3 m.
Pino pátula	Pinus patula	2 a 3 m.
Roble	Quercus humboldtii	2 a 3 m.
Sauce	Salix humboltiana	2 a 3 m.
Urapán	Fraximus chinensis	2 a 3 m.

Tabla 6: Listado de árboles que se reproducen por estaca y que son utilizados para estabilización de taludes.

Fuente: (Downs et al., 2010, p. 72)

Función ingeniería	Soportar masa de suelo débil, soportando el pie del talud, incrementando el peso en la base del talud.	Anclaje de una masa de material débil, a través de planos de falla hasta los estratos más firmes.	Reforzamiento del suelo para reducir la deformación y para reducir fallas superficiales en suelos saturados.	Drenar el exceso de agua de la pendiente, reducir la presión de poro, incrementar la resistencia y la cohesión.	Captar material erosionado.
Solución ingeniería	Muro de retención o gaviones.	Anclajes del suelo, y pilotes.	Sistemas de tierra reforzada.	Drenaje sub superficiales o superficiales.	Cercas de retención y muros de retención.
Posibles inconvenientes	Costo, condiciones de fundación y drenaje.	Costo, diseño y construcción, y del material subyacente.	Reforzamiento de suelo artificial es complejo en su diseño y construcción.	Mantenimiento	En pendientes escalonadas es inseguro construirlas.
Alternativa Bioingeniería	Árboles, en la base de una pendiente puede prestar apoyo en forma de contrafuertes, o matojos de hierba puede respaldar pequeñas cantidades de la tierra por encima de ellos.	Reforestación con árboles de raíces profundas y verticales.	Proveer una red de raíces que incremente la resistencia al corte.	Vegetación plantada en configuración que facilita el drenaje.	Escala micro: barreras densas de vetiver. Escalas más grandes: los arbustos con muchos tallos y bambúes.
Solución Bioingeniería	Revegetar con árboles el pie del talud.	Arbustos y árboles con raíces muy profundas.	Barreras densas vivas, escalones de matorral, fajinas vivas, y algunos arbustos y árboles.	Fajinas de drenaje. Ramas pueden cumplir esa función.	
Solución optima	Muros de retención vegetado con árboles.	Combinación de anclaje y árboles.	Construir con capas de suelo intercalados con geotextil, y está sembrado de hierba.	Muro de retención vegetado.	

Tabla 7: Tabla Comparativa de técnicas Bioingeniería vs Ingeniería convencional

Fuente: (Downs et al., 2010, p. 76)

A continuación, se presenta la clasificación de vegetación en taludes de acuerdo a los anexos de B. Gómez (2021):

Nombre común	Nombre técnico	Uso principal	Características de las raíces	Requisitos de agua (Pp anual mm)	Requisito de luz	Requisitos de suelo
Acacia negra	Acacia decurrens	Control de erosión	Raices radiales poco profundas, superficiales y gruesas.	600 - 2.800	Alto	Crece bien en suelos que presenten buen drenaje
Alfalfa o Carreton	Medicago sativa	Control de erosión	Raices radiales profundas y delgadas	400 - 1.400	Alto	Requiere suelos profundos y bien drenados
Aliso	Alnus acuminata	Control de erosión	Sistema radial poco profundo, amplio y extendido	1.000 - 3.000	Alto	Suelos ácidos con buen drenaje, de textura franco o franco arcillosos
Angletón	Dicahnthium Aristatum	Control de erosión	Raíces profundas y tallos finos	600 - 2.800	Media	Se puede establecer en suelos francos y fértiles, de mediana fertilidad bien drenados
Arrayan	Myrcianthes leucoxyla	Control de erosión	Sistema radiales superficiales y gruesas	700 - 1.500	Alto	Crece en mayores concentraciones sobre suelos bien húmedos y con alta cantidad de materia orgánica.
Balso	Ochroma pyramidale	Estabilidad de taludes con raíces	Raíz principal pivotante gruesa y profunda	1.300 Apoximadamente	Alto	Coloniza suelos arcillosos y limosos, e incluso el relleno de construcción recientemente depositado, pero no tolera los suelos de alta salinidad
Búcaro / Anaco	Erythrina fusca	Control de erosión	Raices poco pronfundas gruesas y superficiales	800 - 3.000	Alto	Crece en suelo de fertilidad media, soporta suelos encharcados y tolera suelos infertiles
Caracolí	Anacardium excelsum	Control de erosión	Raices superficiales, gruesas y extendidas	500 - 4.500	Media	Prefiere suelos profundos y bien drenados
Casuarina	Casuarina equisetifolia	Estabilidad de taludes con raíces y	Raíz principal pivotante gruesa y profunda	200 - 2.690	Alto	Crece mejor en suelos porosos con buen drenaje y con una humedad y provisión de nutrientes adecuadas
Caucho Sabanero	Ficus soatensis	Estabilidad de taludes con raíces y	Raíz principal pivotante gruesa y profunda	1.000 - 2.001	Alto	Prefiere suelos poco profundos, bien drenados y requiere de suelos franco arenosos a arcillosos.

Tabla 8: CLASIFICACIÓN DE VEGETACIÓN EN TALUDES

Fuente: (B. Gómez, 2021, p. 39)

Nombre C.	Forma	Clima	Altura máxima	Mercado [Pesos Colombianos]	Ventajas	Desventajas
Acacia negra	Árbol	Templado	Hasta 15 m	Árbol de 14-16cm a $50.000	Resiste heladas y sequías, se utiliza como barrera rompevientos.	Información no disponible
Alfalfa o Carreton	Pasto	Frío-Templado	Hasta 1 m	Semillas 1 lb a $28.000	Resiste temperaturas muy altas y muy bajas, resiste sequías.	Es una especie invasiva
Aliso	Árbol	Templado	Hasta 25 m	Árbol de 40 cm a $2.500	Se utiliza como barrera rompevientos, resiste heladas, especie nativa	Es muy sensible a sequías y suelos pantanosos.
Angletón	Pasto	Cálido - Templado	Hasta 1.2 m	Semillas 10 Kg a $100.000	Tolera sequías prolongadas, período húmedos, pisoteo	Especie invasiva, no resiste sequías
Arrayan	Árbol	Frío - Muy frío	Hasta 16 m	Árbol de 40 - 50 cm a $3.000	Se utiliza como barrera rompevientos, buena para estabilidad, especie nativa.	Información no disponible
Balso	Árbol	Cálido	Hasta 30 m	Árbol de 50 cm a $10.000	Se desarrolla bien en suelo que han sido quemados, se utiliza como barrera rompevientos, especie nativa	No soporta inundaciones
Búcaro / Anaco	Árbol	Templado	Hasta 15 m	Árbol de 50 - 60 cm a $8.000	Sirve como barrera rompevientos, se da en suelos de alta humedad y es fácil de cultivar, especie nativa.	No soporta fuertes vientos en las primeras etapas de crecimiento
Caracolí	Árbol	Cálido	Hasta 45 m	Árbol de 70 cm a $12.000	Tolera inundaciones periódicas y niveles freáticos altos, se utiliza como barrera rompevientos, especie nativa.	El fuego la hace arder muy fácilmente, no soporta suelos arcillosos, fuertemente alcalinos ni calizos.
Casuarina	Árbol	Calido - Templado	Hasta 45 m	Árbol de 60 cm a $8.000	Crece en suelo contaminado con Diesel, se utiliza como barrera rompevientos.	No soporta pendientes de más de 50°, no soporta inundaciones
Caucho Sabanero	Árbol	Frío	Hasta 20 m	Información no disponible	Se utiliza como barrera rompevientos, buena para estabilidad, resiste heladas y sequías.	Información no disponible

Tabla 9: CLASIFICACIÓN DE VEGETACIÓN EN TALUDES

Fuente: (B. Gómez, 2021, p. 40)

Nombre común	Nombre técnico	Uso principal	Características de las raíces	Requisitos de agua (Pp anual mm)	Requisito de luz	Requisitos
Cedro	Cedrela montana	Control de erosión	Raices superficiales gruesas y poco profundas	500 - 2.000	Alto	Suelos húmedos a secos, sueltos, bien drenados, de textura franco a franco arenosa.
Chachafruto	Erythrina edulis	Control de erosión	Información no disponible	1.000 - 2.300	Alto	Prefiere suelo sueltos, textura franco-arenosa y fertilidad
Chicalá	Tecoma Stans	Estabilidad de taludes con raíces	Raíz principal pivotante gruesa y profunda	1.000 - 2.000	Alto	Prefiere suelos profundos, bien drenados y texturas francas
Chocho de árbol	Erythrina rubrinervia	Control de erosión	Raíces superficiales	2.000	Alto	Prefiere suelos
Ciprés	Cupressus lusitanica	Estabilidad de taludes con raíces	Raíz principal pivotante gruesa y profunda	1.000 - 3.000	Alto	Prefiere suelos de origen volcánico, húmedos, profundos y bien drenadas, franco arcillosos a franco
Ciro	Baccharis macrantha	Control de erosión	Raíces superficiales	500 - 2.000	Alto	Soporta suelos pobres, poco profundos y erosionados, crece incluso en suelos duros y arcillosos
Colorado o Siete cueros	Tibouchina lepidota	Estabilidad de taludes con raíces	Raíz principal pivotante gruesa y profunda	1.000 - 2.000	Alto	Suelos superficiales y franco-arcillosos.
Dividivi	Caesalpinia spinosa	Control de erosión	Raíces superficiales	230 - 500	Alto	Prefiere suelos pobres y ligeramente erosionados
Elefante	Pennisetum purpureum	Control de erosión	Sistema radial poco profundo y grueso	1.500 - 4.500	Alto	Se puede establecer en suelos de fertilidad media alta o que sean ricos en materia orgánica
Encenillo	Weinmannia tomentosa	Control de erosión	Información no disponible	500 - 4.000	Alto	Prefiere suelos medianamente profundos, bien drenados,

Tabla 10: CLASIFICACIÓN DE VEGETACIÓN EN TALUDES

Fuente: (B. Gómez, 2021, p. 40)

Nombre C.	Forma	Clima	Altura máxima	Mercado [Pesos Colombianos]	Ventajas	Desventajas
Cedro	Árbol	Frío	Hasta 35 m	Árbol de 40 - 50 cm a $3.000	Se utiliza como barrera rompevientos, buena para estabilidad, especie nativa.	Su crecimiento se ve afectado en suelos de baja fertilidad, susceptible a suelos encharcados
Chachafruto	Árbol	Templado	Hasta 14 m	Árbol de 60 cm a $15.000	Se usa para recuperar fuentes hidrográficas, también como barrera rompevientos.	No soporta sequías
Chicalá	Árbol	Frío	Hasta 8 m	Árbol de 60 - 70 cm a $10.000	Se utiliza como barrera rompevientos, buena para estabilidad, resiste sequías, especie nativa.	Información no disponible
Chocho de árbol	Árbol	Frío-Templado	Hasta 10 m	Árbol de 14-16cm a $5.000	Es fijador de nitrógeno, especie nativa	Información no disponible
Ciprés	Árbol	Frío-Templado	Hasta 30 m	Árbol de 40 - 60 cm a $6.000	Se utiliza como barrera rompevientos, resiste heladas	No soporta sequías, no crece en suelos pobres
Ciro	Arbusto	Frío	Hasta 5 m	Árbol de 50 - 60 cm a $5.000	Soporta sequías, especie nativa	Información no disponible
Colorado o Siete cueros	Árbol	Frío	Hasta 8 m	Árbol de 40 - 50 cm a $12.000	Se utiliza como barrera rompevientos, buena para estabilidad, regulador climático y de temperatura, especie nativa.	Especie con mortalidad muy alta en sus primeros meses, incluso en viveros.
Dividivi	Árbol	Frío	Hasta 15 m	Árbol de 40 cm a $10.000	Soporta sequías, especie nativa	Información no disponible
Elefante	Pasto	Templado	Hasta 4 m	Semillas 25 kg a $100.000	Tolera el pisoteo	Especie invasora, no resiste sequías y muy susceptible a los insectos
Encenillo	Árbol	Muy frío	Hasta 25 m	Árbol de 50 cm a $2.500	Se utiliza como barrera rompevientos, regulador climático y de temperatura, especie nativa.	Información no disponible

Tabla 11: CLASIFICACIÓN DE VEGETACIÓN EN TALUDES

Fuente:(B. Gómez, 2021, p. 41)

Nombre común	Nombre técnico	Uso principal	Características de las raíces	Requisitos de agua (Pp anual mm)	Requisito de luz	Requisitos de suelo
Eucalipto	Eucalyptus globulus	Control de erosión	Raices poco profundas gruesas y superficiales	750 - 1.250	Alto	Requiere de un buen drenaje, baja salinidad y de un suelo con una profundidad de aproximadamente 0.6 m o más.
Gomo	Cordia dentata	Control de erosión	Raíces superficiales	2.000 - 4.000	Alto	Soporta suelos arcillosos
Guacimo	Guazuma ulmifolia	Control de erosión	Raices poco profundas gruesas y superficiales	700 - 1.500	Alto	Se da en suelos de texturas livianas y pesadas, con buen drenaje, no
Guaje / Leucaena	Leucaena leucocephala	Estabilidad de taludes con raíces	Raíz principal pivotante gruesa y profunda	450 - 2.200	Alto	Se adapta a cualquier tipo de suelo bien drenado
Gualanday	Jacaranda caucana	Control de erosión	Raices poco profundas gruesas y superficiales	1.000 - 2.500	Alto	Prefiere suelos profundos, bien drenados
Guayacán Rosado	Tabebuia Rosea	Control de erosión	Sistema radial profundo	1.100 - 3.000	Alto	Logra su mejor desarrollo en suelos con texturas francas a franco - arcillosas
Hayuelo	Dodonaea viscosa	Control de erosión	Raices pocas profundas y superficiales	1.000 - 1.400	Alto	Prospera en cualquier suelo bien drenado
Iguá / Naumo	Pithecellobium	Control de erosión	Raíces superficiales	1.000 - 3.000	Alto	Prefiere suelos profundos, bien drenados, de fertilidad media a alta.
Kikuyo	Pennisetum	Control de erosión	Raices profundas y delgadas (Hasta 5 m)	800 - 2.800	Alto	Requiere suelos bien o moderadamente drenados
Laurel de cera	Morella pubescens	Estabilidad de taludes con raíces	Raíces profundas, abundantes y delgadas	750 - 1.600	Alto	Se adapta a cualquier tipo de suelo

Tabla 12: CLASIFICACIÓN DE VEGETACIÓN EN TALUDES

Fuente: (B. Gómez, 2021, p. 41)

Nombre C.	Forma	Clima	Altura máxima	Mercado [Pesos Colombianos]	Ventajas	Desventajas
Eucalipto	Árbol	Muy frío - Templado	Hasta 50 m	Árbol de 50cm a $15.000	Se utiliza como barrera rompevientos, por sus grandes requisitos de agua puede secar pantanos.	Es una especie invasiva
Gomo	Árbol	Cálido	Hasta 15 m	Árbol de 50 - 60 cm a $7.000	Soporta sequías, especie nativa	No tolera inundaciones ni fuego
Guacimo	Árbol	Cálido	Hasta 15 m	Árbol de 40 - 60 cm a $5.000	Resiste el fuego, se utiliza como barrera rompevientos, especie nativa.	No prospera en suelos compactados y muy compactados
Guaje / Leucaena	Árbol	Cálido - Templado	Hasta 10 m	Árbol de 60 cm a $4.000	Se utiliza como barrera rompevientos, buena para estabilidad, barrera contra incendios, especie nativa.	No resiste heladas, intolerante a inundaciones.
Gualanday	Árbol	Calido - Templado	Hasta 20 m	Árbol de 40 - 50 cm a $8.000	Se utiliza como barrera rompevientos, tolera sitios húmedos y temporalmente inundados, especie nativa.	Información no disponible
Guayacán Rosado	Árbol	Cálido	Hasta 40 m	Árbol de 70 cm a $14.000	Se utiliza como barrera rompevientos, resiste el fuego y suelos con mal drenaje, especie nativa.	Información no disponible
Hayuelo	Arbusto	Frío	Hasta 7m	Árbol de 50 cm a $2.500	Se utiliza como barrera rompevientos, soporta la sequia y heladas, especie nativa.	Su crecimiento inicial es lento.
Iguá / Naumo	Árbol	Cálido - Templado	Hasta 25 m	Árbol de 60 cm a $12.000	Es fijador de nitrógeno, especie nativa, se utiliza como barrera rompevientos	No tolera heladas, es muy sensible a los vientos fuertes en su etapa de crecimiento
Kikuyo	Pasto	Frío	Hasta 60 cm	Semillas 2Kg a $7000	Soporta sequías y pisoteo	Es una especie invasiva, no se adapta a suelos pobres, es susceptible a heladas.
Laurel de cera	Árbol	Frío	Hasta 16 m	Árbol de 40 - 50 cm a $3.000	Especie usada para protección de nacimientos de agua.	No tolera sequías prolongadas y la alta contaminación.

Tabla 13: CLASIFICACIÓN DE VEGETACIÓN EN TALUDES

Fuente: (B. Gómez, 2021, p. 42)

Nombre común	Nombre técnico	Uso principal	Características de las raíces	Requisitos de agua (Pp anual mm)	Requisito de luz	Requisitos de suelo
Mani Forrajero	Arachis pintoi	Control de erosión	Llega hasta 30cm de profundidad, delgada.	1.200 - 3.000	Bajo	Se adapta a suelos de fertilidad media-baja
Maralfalfa	Pennisetum violaceum	Control de erosión	Sistema radial poco profundo	1.000 - 4.000	Moderado	Se adapta a suelos de fertilidad media
Mata-ratón	Gliricidia sepium	Estabilidad de taludes con raíces	Raíz principal pivotante gruesa y profunda	500 - 2.300	Alto	Tolera una gran variedad de suelos, menos aquellos que tengan deficiencias serias de drenaje interno
Melina	Gmelina-Arbórea	Control de erosión	Sistema radical profundo	1.000 - 4.500	Alto	Prefiere suelos profundos, humedos y bien drenados, fertiles de los valles aluviales franco o franco arcillosos.
Mora	Maclura tinctoria	Control de erosión	Raíces superficiales	50 - 1.500	Alto	Tolera suelos poco profundos y prospera en suelos pobres
Mortiño	Hesperomeles	Control de erosión	Raices superficiales y gruesas	1.200	Alto	Suelos francos a pesados en pendientes moderadas
Nacedera o Aro	Trichanthera gigantea	Estabilidad de taludes con raíces	Raíces profundas y robustas	1.400 - 2.800	Alto	Crece en suelos profundos, aireados, de buen drenaje y baja fertilidad
Pasto estrella	Cynodon nlemfuensis	Control de erosión	Sistema radial profundo	800 - 2.800	Alto	Se adapta a cualquier tipo de suelo
Pino	Podocarpus oleifolius	Control de erosión	Raices poco profundas y superficiales	1.000 - 2.000	Alto	No crece bien en suelos arcillosos
Pino oocarpa	Pinus oocarpa	Estabilidad de taludes con raíces	Raíz principal pivotante gruesa y profunda	600 - 2.400	Alto	Crece en suelos muy diversos, desde arenosos, francos hasta arcillosos, pobres, bien drenados y aun sobre suelos erodados y superficiales

Tabla 14: CLASIFICACIÓN DE VEGETACIÓN EN TALUDES

Fuente: (B. Gómez, 2021, p. 42)

Nombre C.	Forma	Clima	Altura máxima	Mercado [Pesos Colombianos]	Ventajas	Desventajas
Mani Forrajero	Pasto	Frío-Templado	Hasta 40 cm	Bulto de 15 Kg a $40.000	Especie invasora, aguanta sequías de hasta 3 meses, soporta pisoteo	Especie invasiva
Maralfalfa	Pasto	Frío-Templado	Hasta 2 m	Información no disponible	Aguanta sequias y pisoteo	No soporta encharcamiento
Mata-ratón	Árbol	Cálido - Templado	Hasta 20 m	Árbol de 50 cm a $5.000	Aguanta sequías de hasta 5 meses, se utiliza como barrera rompevientos, resiste el fuego, especie nativa.	No soporta heladas, ni suelos con inundaciones periodicas
Melina	Árbol	Cálido	Hasta 30 m	Árbol de 50 - 70 cm a $15.000	Se utiliza como barrera rompevientos, resiste sequías y fuego	Presenta problemas de crecimiento en cualquier suelo que no sea de su preferencia
Mora	Árbol	Cálido - Templado	Hasta 25 m	Árbol de 40 - 50 cm a $4.000	Soporta sequías, especie nativa	Su uso principal es ornamental y alimenticio
Mortiño	Arbusto	Muy frío	Hasta 7 m	Árbol de 50 cm a $2.500	Se utiliza como barrera rompevientos y como protección de nacimientos de agua, resiste heladas, especie nativa	Información no disponible
Nacedera o Aro	Árbol	Cálido - Templado	Hasta 12 m	Árbol de 60 cm a $4.000	Se utiliza como protección de nacimientos de agua, especie nativa.	Información no disponible
Pasto estrella	Pasto	Cálido - Templado	Hasta 50 cm	Semillas 5 Kg a $25.000	Se utiliza en taludes hechos en carreteras, resiste pisoteo.	No soporta encharcamiento, especie invasiva.
Pino	Árbol	Frío - Muy frío	Hasta 40 m	Árbol de 5 m a $800.000	Se utiliza como barrera rompevientos, crece hasta en pendientes de más del 50%, especie nativa	Especie vulnerable debido a la deforestación, crecimiento lento
Pino oocarpa	Árbol	Frío-Templado	Hasta 45 m	Árbol de 60 - 80 cm a $8.000	Resiste la sequía, especie nativa	Susceptible a las heladas y al fuego

Tabla 15: CLASIFICACIÓN DE VEGETACIÓN EN TALUDES

Fuente: (B. Gómez, 2021, p. 43)

Nombre común	Nombre técnico	Uso principal	Características de las raíces	Requisitos de agua (Pp anual mm)	Requisito de luz	Requisitos de
Pino Pátula	Pinus patula	Estabilidad de taludes con raíces y	Sistema radical robusto amplio y profundo	750 - 2.800	Alto	Prefier suelos profundos, húmedos, fértiles, bien drenados.
Pino vela	Cupressus sempervirens	Estabilidad de taludes con raíces	Raíz principal pivotante gruesa y profunda	1.000 - 2.000	Alto	Se adapta a cualquier tipo de suelo
Raygras Perenne	Lolium Perenne	Control de erosión	Sistema radial poco profundo	900 - 2.500	Alto	Se puede establecer en suelos pesados, fértiles y húmedos
Roble	Quercus humboldtii	Control de erosión	Raices superficiales	1.500 - 2.500	Media	Se adapta a cualquier tipo de suelo humedo
Sauce	Salix humboldtiana	Control de erosión	Sistema radical superficial y extendido	800 - 3.300	Alto	Prefiere suelos húmedos, de textura arenosa
Teca	Tectonagrandis	Control de erosión	Sistema radial poco profundo y extendido	1.270 - 3.800	Alto	Prefiere suelos profundos, fértiles y bien drenados.
Trebol rojo	Trifolium pratense	Control de erosión	Sistema radial poco profundo	700	Moderado	Se adapta a cualquier tipo de suelo
Urapán	Fraxinus chinensis	Control de erosión	Raices poco profundas gruesas y superficiales	1.000 - 3.000	Alto	Prrefiere suelos profundos, con buen drenaje fértiles y de textura franco
Uva de anís	Cavendishia cordifolia	Control de erosión	Sistema radial poco profundo	1.500	Alto	Soporta suelos ácidos y poco profundos, puede crecer sobre rocas huecas con material orgánico
Vetiver	Chrysopogon zizanioides	Control de erosión	Llega hasta 5m de profunidad, delgada	300 - 5.000	Moderado	Se adapta a cualquier tipo de suelo

Tabla 16: CLASIFICACIÓN DE VEGETACIÓN EN TALUDES

Fuente: (B. Gómez, 2021, p. 43)

Nombre C.	Forma	Clima	Altura máxima	Mercado [Pesos Colombianos]	Ventajas	Desventajas
Pino Pátula	Árbol	Frío - Muy frío	Hasta 30 m	Árbol de 30 - 40 cm a $15.000	Resiste la sequía y heladas	Susceptible al fuego
Pino vela	Árbol	Cálido	Hasta 30 m	Árbol de 20 cm a $20.000	Se utiliza como barrera rompevientos, resiste heladas y sequías, especie nativa	No tolera encharcamientos
Raygras Perenne	Pasto	Cálido - Templado	Hasta 60 cm	Información no disponible	Resiste pisoteo	No resiste sequías
Roble	Árbol	Frío-Templado	Hasta 25 m	Árbol de 1 m a $20.000	Se utiliza como barrera rompevientos, resiste sequías, especie nativa	Información no disponible
Sauce	Árbol	Frío - Calido	Hasta 25 m	Árbol de 40 cm a $15.000	Se utiliza como barrera rompevientos, no soporta heladas	Información no disponible
Teca	Árbol	Cálido - Templado	Hasta 20 m	No disponible en Santander	Es moderadamente resistente al fuego	Muy sensible a la sequía, y susceptible a las heladas
Trebol rojo	Trebol	Frío	Hasta 60 cm	Semillas 100g a $10.000	Requiere ciudados en sus primeros meses de siembra y solo se encuentra a la venta por semillas	Información no disponible
Urapán	Árbol	Templado - Frio	Hasta 35 m	Información no disponible	Se utiliza como barrera rompevientos, resiste heladas y tolera sequías	Sensible al ozono.
Uva de anís	Arbusto	Frío - Muy frío	Hasta 7 m	Información no disponible	Especie nativa	Información no disponible
Vetiver	Pasto	Cualquiera	Hasta 2 m	Especie a la venta en bolsa a $800 (40 Kg)	Prenviene derrumbes de tierra, es resistente a temperatuas de 50 °C, funciona como pesticida, resiste pisoteo	Información no disponible

Tabla 17: CLASIFICACIÓN DE VEGETACIÓN EN TALUDES

Fuente: (B. Gómez, 2021, p. 44)