

Capítulo 9

La Vegetación y los Deslizamientos

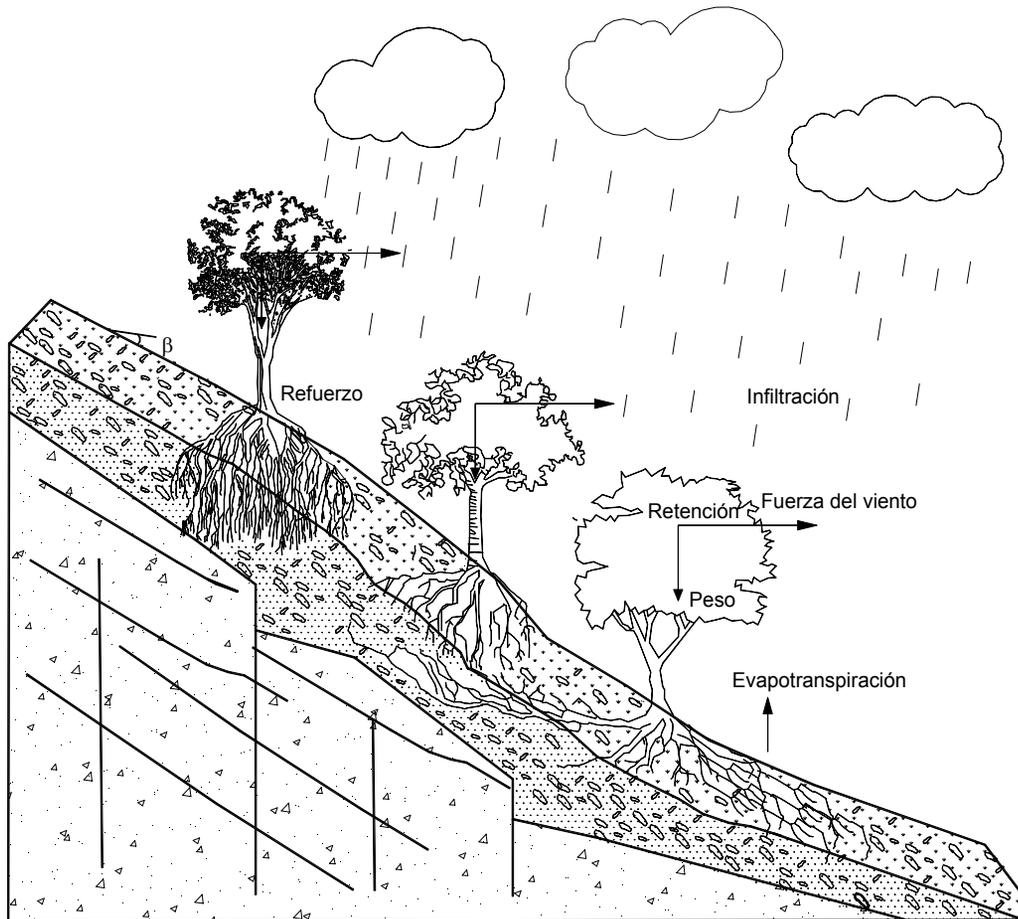


Figura 9.1 Estabilización de taludes utilizando vegetación.

El efecto de la vegetación sobre la estabilidad de los taludes ha sido muy debatido en los últimos años. El estado del arte actual deja muchas dudas e inquietudes y la cuantificación de los efectos de estabilización de las plantas sobre el suelo no ha tenido una explicación universalmente aceptada. Sin embargo, la experiencia ha demostrado el efecto positivo de la vegetación, para evitar problemas de

erosión, reptación y fallas subsuperficiales. Los árboles y arbustos de raíz profunda le aportan una resistencia cohesiva significativa a los mantos de suelo más superficiales y al mismo tiempo, facilitan el drenaje subterráneo, reduciendo en esta forma la probabilidad de deslizamientos poco profundos (Figura 9.1); pero su efecto no es el mismo en deslizamientos profundos.

Efectos de la Vegetación sobre el Talud

Para analizar los fenómenos del efecto de la vegetación sobre el suelo, se requiere investigar las características específicas de la vegetación en el ambiente natural que se esté estudiando.

Entre los factores importantes se sugiere analizar los siguientes: volumen y densidad de follaje, tamaño, ángulo de inclinación y aspereza de las hojas, altura total de la cobertura vegetal, presencia de varias capas diferentes de cobertura vegetal, tipo, forma, profundidad, diámetro, densidad, cubrimiento y resistencia del sistema de raíces.

El tipo de vegetación tanto en el talud como en el área arriba del talud es un parámetro importante para su estabilidad. La vegetación cumple dos funciones principales: en primer lugar tiende a determinar el contenido de agua en la superficie y además da consistencia por el entramado mecánico de sus raíces.

Como controlador de infiltraciones tiene efecto directo sobre el régimen de aguas subterráneas y actúa posteriormente como secador del suelo al tomar el agua que requiere para vivir.

Factores más importantes

- Intercepta la lluvia
- Aumenta la capacidad de infiltración
- Extrae la humedad del suelo
- Grietas por desecación
- Raíces refuerzan el suelo, aumentando resistencia al cortante
- Anclan el suelo superficial a mantos más profundos
- Aumentan el peso sobre el talud
- Transmiten al suelo fuerza del viento
- Retienen las partículas del suelo, disminuyendo susceptibilidad a la erosión

La deforestación puede afectar la estabilidad de un talud de varias formas:

- Disminuyen las tensiones capilares de la humedad superficial
- Se elimina el factor de refuerzo de las raíces
- Se facilita la infiltración masiva de agua

De acuerdo a un estudio realizado por Hudec y Wharton(1993) en Trinidad, el 64.9% de los deslizamientos analizados están relacionados con alteraciones arriba de la corona, de los cuales el 38.3% corresponde a áreas de cultivos y el 35.1% a deforestación.

La quema de la vegetación aumenta la inestabilidad de los taludes, especialmente si esto ocurre en áreas de coluviones en los cuales la vegetación ejerce un papel preponderante en la estabilidad, especialmente por la eliminación del refuerzo de las raíces y por la exposición a la erosión acelerada.

EFECTOS HIDROLÓGICOS DE LA VEGETACIÓN

La vegetación afecta las condiciones hidrológicas de un talud de varias formas (Figura 9.2):

Intercepción de la Lluvia

De acuerdo con Styczen y Morgan-1996, la lluvia se divide en dos partes, la lluvia que cae directamente sobre el suelo y la lluvia que es interceptada por el follaje de la vegetación.

$$\text{Lluvia interceptada} = \text{lluvia} \times \% \text{ área follaje}$$

Según Gregory y Walling (1973), dependiendo de la intensidad de la lluvia y del cubrimiento y tipo de vegetación en un bosque tropical, puede interceptarse hasta un 60% del total de la lluvia anual.

Parte de la lluvia interceptada es retenida y evaporada, y parte alcanza finalmente la tierra por goteo o por flujo sobre las hojas y troncos. Es importante determinar el tiempo entre la lluvia y el goteo para analizar el efecto hidrológico de cada tipo de vegetación.

Retención de Agua

La retención de agua en el follaje demora o modifica el ciclo hidrológico en el momento de una lluvia. Este fenómeno disminuye la rata de agua de escorrentía disminuyendo su poder erosivo, pero puede aumentar la rata de infiltración.

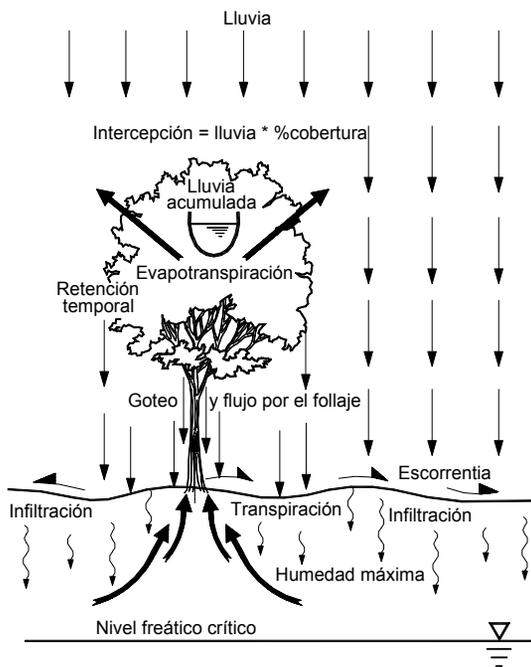
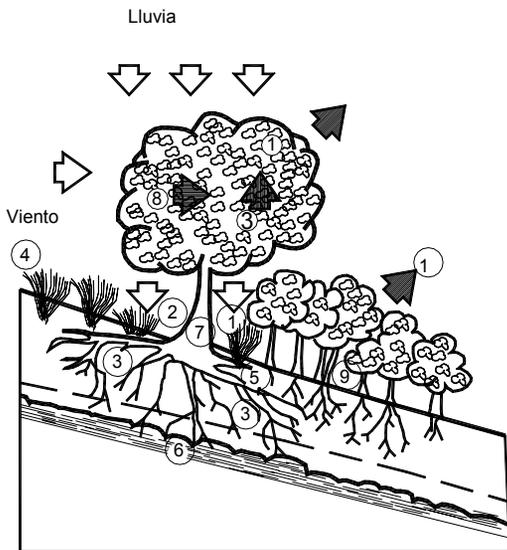


Figura 9.2 Esquema del efecto de la vegetación sobre el modelo hidrológico subsuperficial.

La retención de agua en el follaje depende del tipo de vegetación, sus características y la intensidad de la lluvia. Los árboles de mayor volumen o densidad de follaje demoran más el ciclo hidrológico, en razón a que retienen por mayor tiempo las gotas de lluvia.

En el caso de lluvias muy intensas la retención de agua es mínima, pero en el caso de lluvias moderadas a ligeras, la retención puede ser hasta de un 30%, dependiendo de las características de la vegetación.

Rice y Krames (1970) sugirieron que el clima determina el efecto relativo de la vegetación para prevenir deslizamientos. En los climas para los cuales la precipitación es muy grande, el efecto de la cobertura vegetal sobre la estabilidad es mínimo y en áreas de clima árido la cobertura vegetal puede afectar en forma significativa la ocurrencia de deslizamientos.

Acumulación de Agua

Parte del agua retenida es acumulada en el follaje para luego ser evaporada. Algunas especies vegetales como el maíz poseen espacios importantes para almacenamiento de agua. Existe experiencia con especies vegetales, la cual permite determinar el volumen total de agua acumulada, teniendo en cuenta la densidad de área total y el volumen del follaje.

Goteo o Flujo por el Follaje

El agua retenida no acumulada retorna a la tierra por goteo o flujo por el follaje. La rapidez de flujo depende de la aspereza de las superficies de las hojas y tronco, y los diámetros y ángulos de las hojas con la vertical.

Evapotranspiración

La evapotranspiración es un efecto combinado de evaporación y transpiración. Su efecto es una disminución de la humedad en el suelo. Cada tipo de vegetación en un determinado tipo de suelo, tiene un determinado potencial de evapotranspiración y se obtiene generalmente una humedad de equilibrio, dependiendo de la disponibilidad de agua lluvia y nivel freático.

Greenway (1987) reporta que la capacidad de una planta para consumir humedad del suelo depende del tipo y tamaño de la especie, clima, factores ambientales y características del suelo.

Schiechl (1980) estima capacidades de evapotranspiración hasta de un metro cúbico por metro cuadrado por año, en bosques primarios en Europa. Greenway (1987) reporta evapotranspiraciones de más de 100 milímetros por mes en Hong Kong. En climas tropicales, los volúmenes de evapotranspiración son generalmente mayores que en zonas con estaciones.

La evapotranspiración puede medirse utilizando la relación entre la evapotranspiración de la superficie cubierta por plantas y la de un cuerpo de agua expuesto (E_t/E_o). Los valores de E_t/E_o dependen de las condiciones ambientales y de la variedad de planta, de acuerdo a la tabla 9.1.

Estos valores corresponden al potencial de evapotranspiración en el momento en que la humedad del suelo es alta. A medida que disminuye la humedad del suelo, la evapotranspiración disminuye.

La evapotranspiración profundiza los niveles de aguas freáticas y al mismo tiempo puede producir asentamientos de suelos arcillosos blandos y agrietamientos por desecación. El área de influencia depende de la extensión y profundidad del sistema radicular.

Tabla 9.1 Valores de E_t/E_o para diversas coberturas vegetales.

Especie Vegetal	Relación E_t/E_o
Eucalipto	1.5
Arroz	1.35
Palma de aceite	1.2
Cacao	1.0
Bosques	0.9
Ficus	0.9
Pastos	0.8
Papa	0.7
Caña de azúcar	0.73
Banano o plátano	0.70
Maíz	0.67
Algodón	0.63
Café	0.5

Tabla 9.2 Componentes de la planta y sus funciones.

Parte de la Planta	Función
Raíz	Anclaje, absorción, conducción y acumulación de líquidos.
Tallo	Soporte, conducción y producción de nuevos tejidos.
Hojas	Fotosíntesis, transpiración.

Durante un día soleado un eucalipto puede extraer del suelo hasta 500 litros de agua y el pasto hasta un litro por metro cuadrado (Williams y Pidgeon - 1983). Los árboles espaciados cercanamente y las hierbas extraen más agua que los pastos.

La clave, desde el punto de vista de ingeniería, es determinar la humedad máxima y el nivel freático crítico para un talud específico, teniendo en cuenta el efecto de la vegetación. El balance de la infiltración y la evapotranspiración produce una determinada humedad, la cual debe compararse con la humedad requerida para saturación.

Debe tenerse en cuenta que en un suelo, al saturarse, se disminuyen las fuerzas de succión o presiones negativas de agua de poros, las cuales ayudan a la estabilidad. En ocasiones, la vegetación produce un efecto de mantener la humedad por debajo del límite de saturación, mejorando la estabilidad de las laderas.

Funciones Específicas de las plantas

Las diferentes partes de una planta cumplen funciones específicas desde el punto de vista de manejo geotécnico (Tabla 9.2).

Las raíces cumplen una función muy importante de absorción. Grandes cantidades de agua son absorbidas por las plantas junto con minerales y productos que la planta requiere para su alimentación.

Igualmente las raíces interactúan con el suelo y lo refuerzan. El tronco soporta los órganos fotosintéticos y reproductivos, especialmente las hojas. La estructura de la hoja muestra dos partes: superior e inferior, que cumple un objetivo muy importante para la vida de la planta.

CONTROL DE LA EROSIÓN

El efecto más importante de la vegetación, universalmente aceptado, es la protección contra la erosión en todos los casos y con todo tipo de vegetación.

Barker y otros (1994) reportan ratas de erosión de 12 toneladas de suelo por hectárea en Malasia en el primer año, después de cortado un bosque tropical. Las ratas de erosión aumentan con el tiempo a medida que las raíces se descomponen.

La vegetación con mayor densidad de follaje amortigua más eficientemente el golpe de la lluvia y disminuye la erosión.

En hierbas y pastos la densidad y volumen del follaje actúan como un colchón protector contra los efectos erosivos del agua de escorrentía.

En lo referente a control de erosión se ha encontrado que donde hay árboles altos la erosión es menor que en el caso de arbustos. Además, se ha encontrado que las hierbas o maleza protegen generalmente mejor contra la erosión que los pastos.

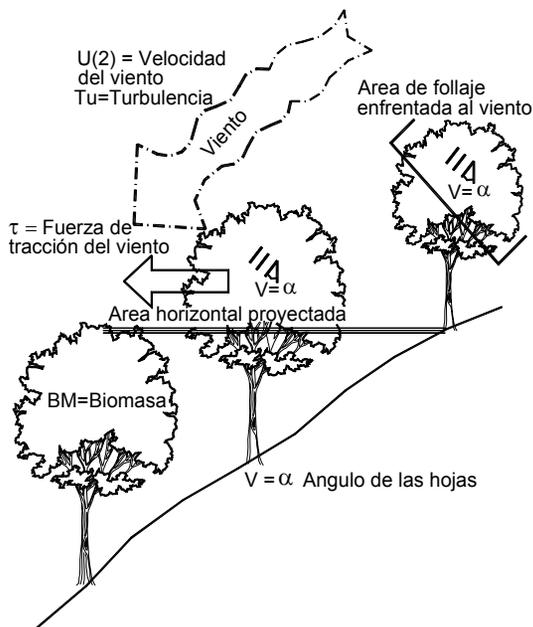


Figura 9.3 Esquema de la fuerza de tracción del viento.

Resultados similares son reportados por Nordin (1994) en Malasia, concluyendo que la mejor protección contra la erosión y los deslizamientos, se obtiene estableciendo conjuntamente todos los sistemas de vegetación, incluyendo los musgos y demás variedades. No hay mejor evidencia que mirar la naturaleza y observar cómo se conserva y protege ella misma.

SOBRECARGA Y FUERZAS DEL VIENTO

La sobrecarga debida al peso propio de la vegetación generalmente no representa una carga importante, pero las fuerzas del viento son significativas (Figura 9.3).

La fuerza del viento puede calcularse utilizando una simplificación de la ecuación de Navier-Stokes (Styczen y Morgan -1996).

$$\tau = 1/2 \rho_a \mu (z_0)^2 CD$$

Donde:

- τ = Fuerza de tracción por unidad de área horizontal de la vegetación
- ρ_a = Densidad del aire (0.00123 Mg/m³ al nivel del mar)
- μ = Velocidad media del viento a la altura de z
- z_0 = Altura efectiva de la rugosidad del follaje
- $z_0 \cong 0.1H$ para árboles
- H = Altura media de los árboles
- CD = Coeficiente de tracción

CD varía de acuerdo a la altura de la vegetación, rugosidad del follaje y velocidad del viento. A mayor velocidad CD disminuye. Para árboles CD varía de 0.01 a 0.10 con un valor típico de 0.05.

Otros Efectos Negativos

En ocasiones la vegetación puede traer efectos negativos como es la apertura de grietas en los macizos rocosos, favoreciendo los caídos.

Algunas plantas favorecen el mantenimiento de la humedad en el suelo, como es el caso de las plantaciones de Banano (Tsutiya y otros, 1991). Se pueden producir cambios en la infiltración por la construcción de terrazas o hileras para la siembra.

El sistema de siembra a lo largo de las líneas de nivel, como es costumbre en las zonas cafeteras de Colombia, favorece la infiltración del agua de escorrentía, minimizando el transporte de suelo por erosión, pero facilitando la formación de niveles freáticos altos y de grandes deslizamientos.

Algunos estudios revelan que, en Colombia, la ocurrencia de deslizamientos es mayor en áreas cultivadas que en los bosques naturales. Evidencias similares se han encontrado en otros países (Sidle y Chigira, 2004).

Debe tenerse en cuenta que cuando las lluvias son muy intensas y de larga duración, el efecto de la vegetación sobre el ciclo hidrológico es mínimo. El efecto sin embargo, es muy importante en áreas con regímenes moderados de lluvias (Walker y Mohen, 1987).

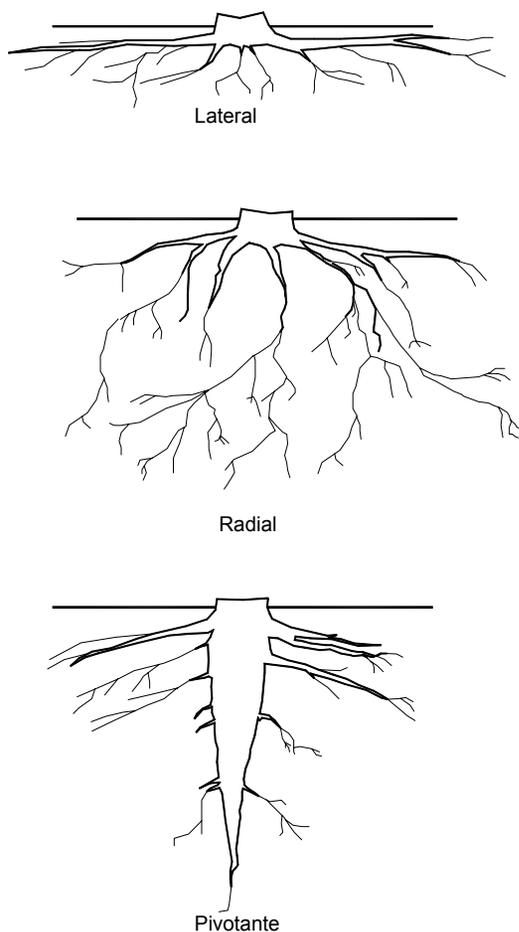


Figura 9.4 Tipos de raíz.

CARACTERÍSTICAS DE LAS RAÍCES

Los principales factores que determinan el desarrollo de las raíces son:

- Disponibilidad de nutrientes en el suelo
- Disponibilidad de oxígeno
- Contenido de humedad
- Succión o presión osmótica
- Temperatura del suelo
- Niveles de toxinas y elementos patogénicos
- Sistema de poros

Las características de las raíces dependen de la especie vegetal, la edad, las propiedades del perfil de suelo y el medio ambiente.

Profundidad de las Raíces

La profundidad de las raíces generalmente no supera los cinco metros en árboles grandes, dos metros en los arbustos y 30 centímetros en los pastos; aunque se han reportado casos de raíces de árboles de más de 30 metros de profundidad (Macgregor y Macmanus, 1992).

La extensión lateral del sistema radicular generalmente es mayor que su profundidad y en algunos casos supera los 50 metros de longitud.

La longitud de las raíces y su profundidad deben evaluarse para determinar su efecto sobre la estabilidad de un talud. Watson y O'Loughlin (1990) midieron el tamaño de las raíces de un pino Monterrey de 25 años y encontraron que mientras la raíz se extendía lateralmente 10.4 metros, alcanzaba una profundidad máxima de solamente 3.10 metros y un promedio de 2.4 metros.

Se ha encontrado que la longitud de las raíces es mayor cuando el árbol se encuentra en un suelo bien drenado granular, que cuando se encuentra en un suelo arcilloso. Aparentemente, este efecto se debe a la necesidad que el árbol tiene de buscar agua en el caso de que el drenaje sea bueno.

Ante la dificultad de poder determinar con precisión la longitud de raíz debido a la poca información existente sobre las características radiculares de las diversas especies, se puede tomar como regla general que la raíz se extiende lateralmente 1.5 veces el radio de la corona del follaje, aunque debe tenerse en cuenta que en algunos casos, las raíces pueden extenderse hasta 22 veces el radio de la corona (Kozlowski, 1971).

La profundidad de refuerzo de las raíces de los pastos es de solo 20 centímetros comúnmente, pero algunas especies tienen profundidades que permiten el anclaje a mantos de roca relativamente profundos.

Se conoce de Eucaliptus con raíces de hasta 27 metros y raíces de bosque tropical hasta de 30 metros de profundidad, pero la mayoría de los árboles tienen raíces de profundidad hasta de tres metros (Greenway, 1987) y esta es la profundidad hasta la que puede confiarse un refuerzo con raíces.

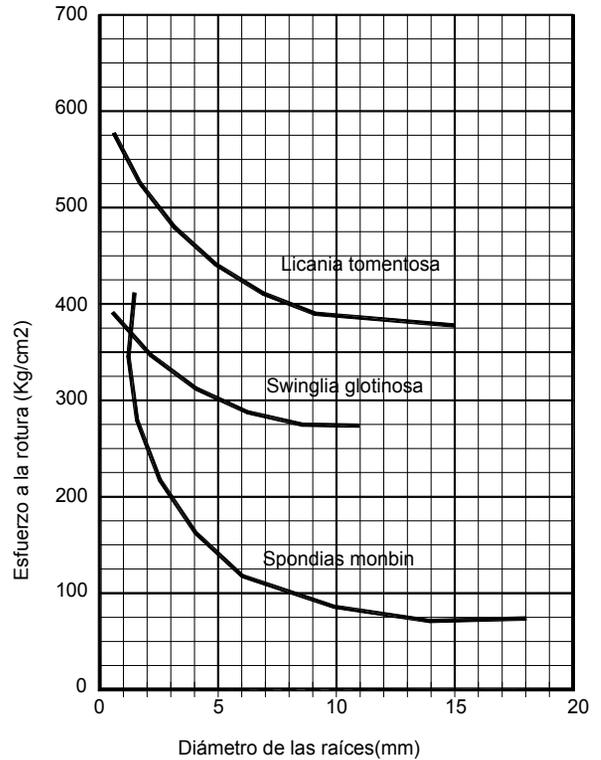


Figura 9.6 Resistencia a la tensión de las raíces de algunas especies vegetales tropicales.

Algunas plantas (Greenway, 1987) poseen un sistema de raíz “extensivo”, en el cual las raíces alcanzan profundidades o extensiones grandes, mientras otras forman un sistema “intensivo” con raíces más cortas y finas.

Leventhal y Mostyn (1987) indican que las raíces de diámetro menor a 20 milímetros, son las más importantes para la estabilidad de un talud que las raíces de mayor diámetro.

Otro factor que contribuye a la resistencia del sistema suelo- raíces es la densidad de raíces por volumen de suelo. El número de raíces por unidad de área y su diámetro, puede evaluarse como una relación de áreas raíz-suelo en un plano determinado de falla.

Un sistema de recolección de información consiste en tomar muestras de suelo con raíces, por un sistema de tamizado separar las raíces de suelo, y con la comparación de los volúmenes determinar la relación raíz-suelo.

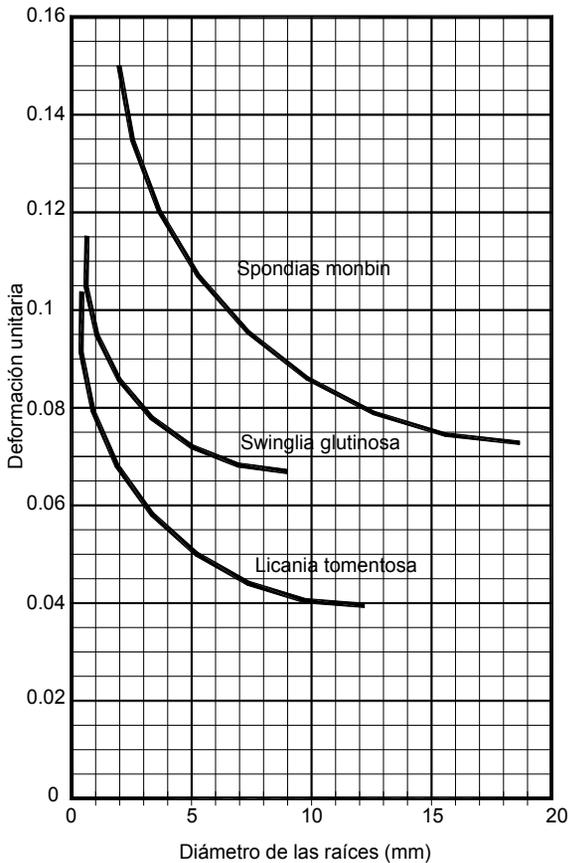


Figura 9.5 Deformación a la rotura de las raíces de algunas especies vegetales tropicales.

Otro sistema podría consistir en dibujar en la pared de un apique utilizando papel de acetato, las áreas de raíz y evaluar la relación suelo-raíces.

Forma del Sistema de Raíces

La forma de las raíces puede presentar tres esquemas diferentes así (figura 9.4):

- *Raíz de extensión lateral.* La experiencia del autor muestra que en la mayoría de los casos la extensión lateral de las raíces es mucho mayor que la profundidad, con excepción de las raíces pivotantes, las cuales a su vez no son muy profundas. En este orden de ideas, el anclaje de las raíces es principalmente paralelo a la superficie del terreno; sin embargo, no debe desestimarse la penetración de las raíces en las fisuras de la roca, anclando el suelo superficial o el efecto de anclaje en los dos primeros metros de suelo.
- *Raíz de extensión radial.* Las raíces de extensión radial tienen la ventaja de profundizarse y al mismo tiempo extenderse lateralmente, generando efecto de arco, el cual es muy importante en la estabilización de deslizamientos poco profundos.
- *Raíz pivotante.* Consiste en una raíz vertical profunda centrada con ramificaciones de raíces pequeñas.

Generalmente, las raíces pivotantes alcanzan profundidades mayores que las raíces laterales o radiales. Estas raíces son muy efectivas para la estabilización de deslizamientos poco profundos.

Resistencia del Sistema Suelo - Raíces

En la literatura se encuentran informes contradictorios relacionados con el efecto de las raíces sobre la resistencia al cortante de los suelos.

Gray (1974) observa que las raíces aumentan la resistencia al cortante por incremento de la cohesión aparente del suelo, reportando incrementos de resistencia hasta de 3 a 4 veces.

Yagi y otros (1994) encontraron en pruebas de laboratorio que no existe prácticamente ninguna variación en el ángulo de fricción y la cohesión por la presencia de raíces o el aumento del porcentaje volumétrico de raíces en el suelo.

Gray y Ohashi (1983) indicaron que la orientación de las raíces en un ángulo de 60 grados con la superficie de cortante, aumenta a un máximo la resistencia al cortante equivalente a la dirección principal de tensión, lo cual se entiende como una resistencia generada por la tensión en las raíces.

Tabla 9.3 Ensayos de resistencia a la tensión de algunas raíces de plantas tropicales.

Especie	Deformación Máxima (%)	Deformación Mínima (%)	Carga de Tensión Máxima (Kg/cm ²)	Carga de Tensión Mínima (Kg/cm ²)
Bambusa vulgaris	15.79	14.25	386.69	276.10
Espondias mombin	15.16	7.38	366.41	76.84
Licania tomentosa	10.70	3.83	576.86	360.65
Swinglea glutinosa	11.48	6.72	633.01	0.60

La resistencia a la tensión de las raíces puede ser hasta el 30% de la del acero según Schiechtl (1980) y pueden extenderse varios metros por debajo de la superficie del talud.

La resistencia promedio a la tensión de las raíces depende de las características y estructura de la planta y puede variar desde 1300 psi hasta 7000 psi (Burroughs y Thomas, 1976; Gray, 1978 y Turmanina, 1965).

Las raíces de árboles y arbustos poseen un comportamiento a la tensión con un bajo módulo de elasticidad y según Gray y Ohashi (1983) no se rompen durante el proceso de corte del suelo; sin embargo, ensayos realizados con raíces en Colombia muestran deformaciones a rotura muy compatibles con el comportamiento al cortante de los suelos en la mayoría de las raíces ensayadas, especialmente en raíces con diámetro superior a 1 mm (Tabla 9.3).

El porcentaje de deformación a la rotura disminuye al aumentar el diámetro en la mayoría de las especies ensayadas (Figuras 9.5 y 9.6).

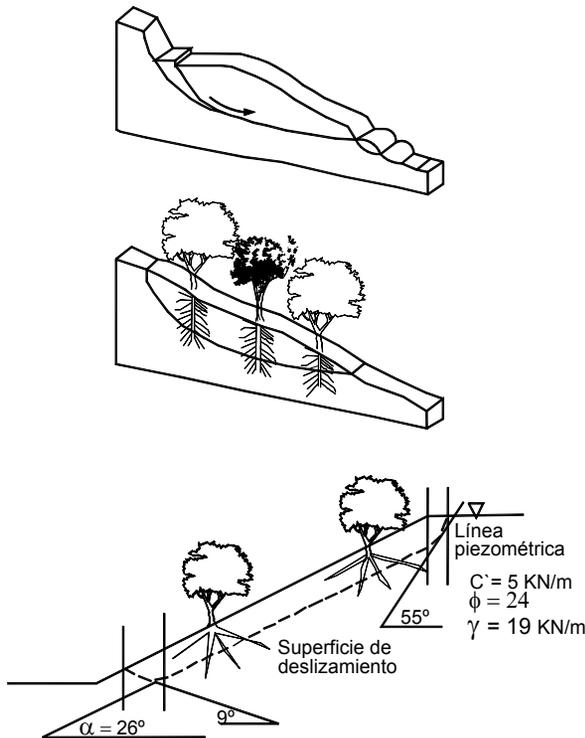


Figura 9.7 Efecto de las raíces para el control de deslizamientos poco profundos.

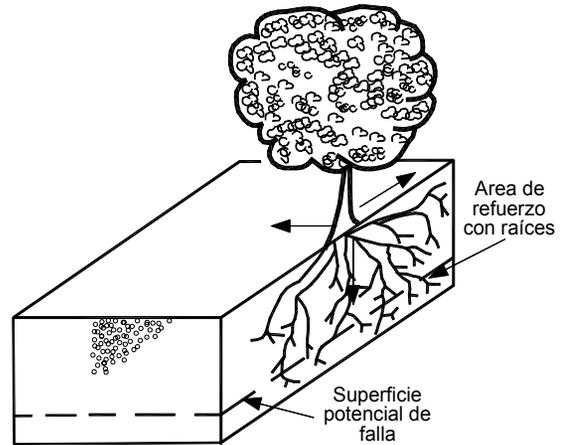


Figura 9.8 Refuerzo de superficie de falla por las raíces de los árboles.

Las raíces de mayor diámetro dan generalmente, menores valores de resistencia a la tensión en las mismas condiciones; sin embargo, al realizar pruebas con raíces de diferente árbol pero del mismo tipo o variedad, los resultados de resistencia a la tensión pueden variar hasta en un 500%, lo cual dificulta la asignación de una resistencia específica para elaborar un modelo matemático.

La relación entre la resistencia a la tensión de la raíz y su diámetro puede expresarse en la forma de una simple ecuación logarítmica:

$$T_r = nD^m$$

Donde:

T_r = Resistencia a la tensión de la raíz

D = Diámetro

n y m = Constantes empíricas que se deben determinar para cada especie de árbol

La edad del árbol y sus condiciones ambientales (clima, humedad, suelo, etc.) producen un cambio importante en la resistencia a la tensión de las raíces. Suyama (1992) reporta que las raíces individuales aumentan su resistencia a medida que ellas son más largas.

Los ensayos de resistencia a la tensión en raíces han sido difíciles debido a que se tienen problemas con las mordazas, en razón de que la piel de las raíces o las fibras exteriores tienden a deformarse, independientemente de las fibras interiores y las mordazas tienden a soltarse.

Metodología de análisis

Para facilitar en el empleo de modelos sistematizados de análisis se utiliza la siguiente metodología:

- Se determina el espesor de la capa de suelo con raíces.
- Se hace un análisis de número de raíces por unidad de área, diámetros y resistencia, y se obtiene la resistencia a la tensión de las raíces por unidad de área de suelo.
- Se realizan ensayos de tensión y de deformación de raíces para determinar qué diámetros de raíces no se deben tener en cuenta en el análisis (de acuerdo a su porcentaje de deformación a rotura).
- Se calcula la fuerza a la tensión de las raíces por unidad de área de suelo.

$$F_r = \sum a_r \times f_r$$

Donde:

a_r = Área neta de raíces (tomada de la relación de áreas raíz-suelo).

f_r = Resistencia a la tensión de la raíz (de acuerdo a la variedad vegetal).

La fuerza de tensión puede analizarse como una fuerza de anclaje horizontal o puede convertirse en cohesión aparente (C_r), adicionándose a la cohesión del suelo.

Resistencia al arrancamiento

Otro elemento importante es la resistencia de la raíz al arrancamiento. En pruebas de arrancamiento en campo generalmente, la raíz se rompe y no se deja arrancar y al observar fallas de arrancamiento por fuerza del viento en la mayoría de los casos, el suelo es arrancado conjuntamente

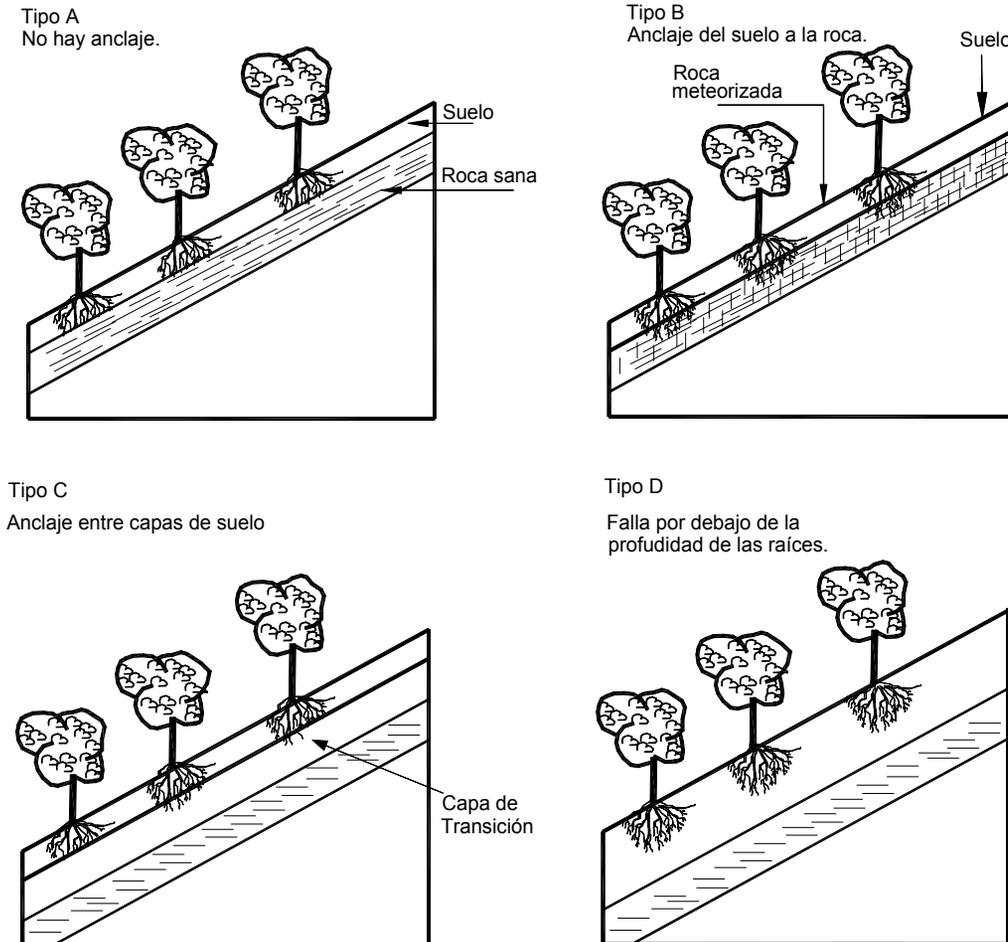


Figura 9.9 Tipos de anclaje de la superficie de falla por acción de las raíces (Tsukamoto y Kusakabe).

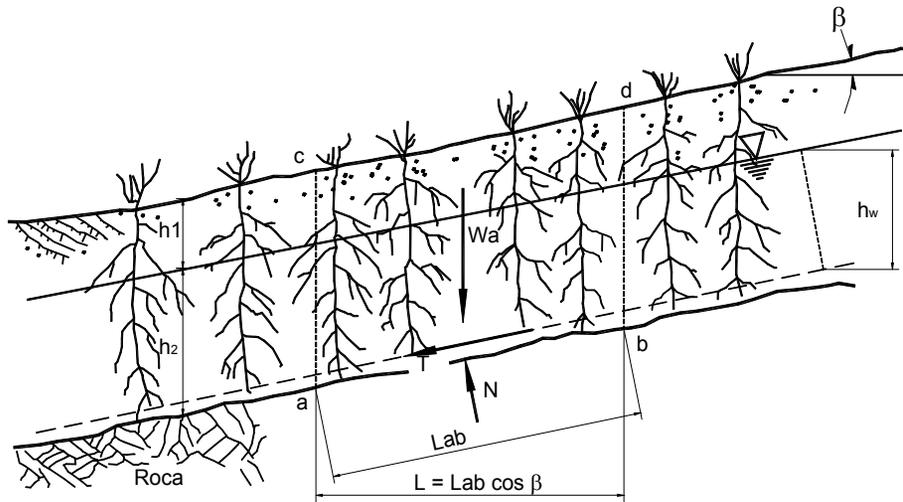


Figura 9.10 Fuerza de anclaje de arbustos y de hierbas de raíz profunda (Bache y Mackaskill, 1984).

con la mayor parte del sistema radicular y la falla a rotura de las raíces ocurre sobre una superficie en la cual la densidad de raíces es menor, solo en algunas ocasiones las raíces profundas son arrancadas.

ACCIÓN DE REFUERZO DE LAS RAÍCES

Las raíces refuerzan la estructura del suelo y pueden actuar como anclajes en las discontinuidades (Figura 9.7).

Sidle (1985) explica el efecto de las raíces sobre la resistencia del suelo en tres formas:

- Unir materiales de los suelos inestables a mantos más estables. Este efecto es más pronunciado donde la superficie crítica de falla se encuentra en la zona de raíces.
- Formar una red densa entrelazada en los primeros 30 a 50 cms de suelo, y esta red forma una membrana lateral que tiende a reforzar la masa de suelo más superficial y sostenerla en el sitio.
- Unir los grupos de partículas impidiendo la ocurrencia de pequeños deslizamientos.

Ensayos realizados por Campos (1991), demuestran que las raíces aumentan la cohesión de muestras de suelo en gran proporción.

Las raíces individuales actúan como anclajes que estabilizan los arcos de suelo que se extienden a través del talud. Las raíces actúan como pilas de refuerzo.

El sistema radicular de un árbol, en forma conjunta con otros árboles puede formar efectos de arco, similares a los de las pilas o pilotes.

Debido a que las redes de raíces se extienden hacia afuera y adentro desde el árbol, es muy importante determinar la influencia del tipo de especie, tamaño, espaciamento, etc. Para tener información de la distribución espacial de la resistencia aportada por las raíces (Figura 9.8).

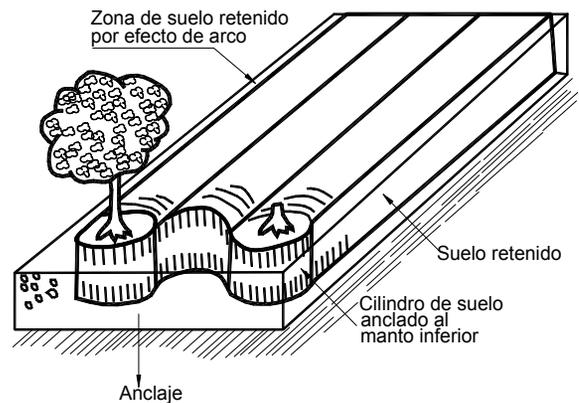


Figura 9.11 Efecto de arco de la vegetación

Clasificación del sistema de refuerzo

Una clasificación del refuerzo de taludes con las raíces de los árboles fue propuesta por Tsukamoto y Kusakabe (1984) (Figura 9.9).

- TIPO A: Taludes que poseen una capa muy delgada de suelo sobre roca masiva y sin defectos que permitan puntos de anclaje para las raíces y una superficie de falla potencial entre el suelo y la roca.
- TIPO B: Una capa delgada de suelo sobre una roca con fracturas o defectos que permiten la entrada y anclaje de las raíces.
- TIPO C: Varias capas de suelo y las raíces penetran normalmente las interfaces, reforzando los contactos entre las diversas capas.
- TIPO D: Taludes con una capa gruesa de suelo y raíces a profundidades superiores a las de las superficies potenciales de falla.

Efecto de Anclaje

Un efecto positivo muy importante es el “anclaje” de masas de suelo por las raíces (Figura 9.10). Las características físicas de las raíces determinan el efecto de anclaje o refuerzo del suelo, y la densidad del sistema radicular mejora la retención de las partículas o masas de suelo, aumentando la resistencia a la erosión.

El fenómeno del efecto de refuerzo de las raíces debe estudiarse en una forma global, analizando la superficie de falla al cortante de un talud, pudiéndose observar dos elementos principales:

- La movilización de la resistencia a la tensión de las raíces por efecto de anclaje de las raíces a materiales más resistentes. Este efecto es muy importante en perfiles de poco espesor de suelos residuales, en los cuales las raíces se anclan en la roca o en los materiales menos meteorizados.
- La profundización de la superficie crítica de falla en profundidades por debajo del volumen de presencia densa de raíces. Este efecto es importante en perfiles de suelo de gran espesor.

Efecto de Arco

Para reducir el riesgo de movimientos, el espaciamiento de los árboles debe ser lo más cercano posible. Un árbol junto a otro puede generar un efecto de arco (Figura 9.11).

Sin embargo, no se requiere que las raíces se entrelacen y el efecto de arco puede lograrse con separaciones de raíces entre 3 y 10 m dependiendo de las características del material del talud y del tipo de árbol (Gray, 1978). Una separación de 10 m entre árboles de grandes raíces produce soporte sustancial en la mayoría de los casos.

ESTABILIDAD DE TALUDES CON VEGETACIÓN

De acuerdo con las investigaciones de Yagi y otros (1994), para fallas a poca profundidad para dos casos específicos en el Japón, el factor de seguridad de acuerdo al modelo de análisis propuesto por Enoki aumentó de 10% a 13.5%, para niveles altos de densidad de vegetación.

Un caso específico es Hong Kong, Greenway (1987) reporta un aumento del 33% en el factor de seguridad para un talud con árboles de aproximadamente 10 m de altura y 3 m de profundidad de las raíces, utilizando el método de análisis de Janbú. El efecto analizado en este caso fue el de profundización de la superficie crítica de falla de 1.0 a 2.5 m.

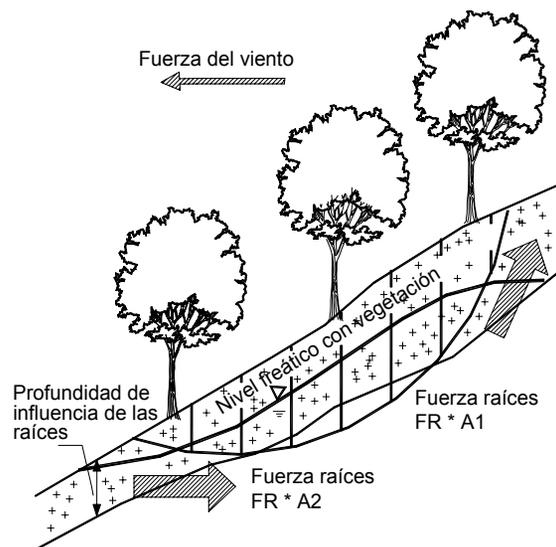


Figura 9.12 Esquema del análisis propuesto para calcular el factor de seguridad teniendo en cuenta el efecto de la vegetación.

Dependiendo del modelo que se utilice, los factores de seguridad varían. Generalmente se obtienen valores de aumento inferiores al 30% para casos normales de vegetación densa y superficies de falla hasta de dos metros de profundidad.

En los casos de superficies de falla profundas, el efecto es menor y para fallas de más de cinco metros de profundidad, el efecto es muy pequeño, en razón de que en taludes de pendiente alta, las raíces de los árboles generalmente alcanzan profundidades menores a cinco metros.

Cálculo de la Resistencia Suelo - Raíces

Se han desarrollado diferentes métodos para cuantificar la contribución de los sistemas de raíces a la resistencia al suelo:

- Ensayos de corte directo (Waldron y otros, 1983)
- Análisis de taludes fallados (Sidle y Swanston, 1982)
- Modelos de resistencia de las raíces (Gray y Megahan, 1981)
- Información de densidad de raíces (Burrough y Thomas, 1977)

La cohesión debida a las raíces puede incorporarse como cohesión efectiva en la ecuación Mohr-Coulomb para el análisis de estabilidad de taludes, utilizando las teorías de equilibrio límite.

La resistencia total S del sistema suelo-raíces puede expresarse por medio de la ecuación modificada de Coulomb:

$$S = (S_s + \Delta S_R) + \sigma' \tan \phi'$$

Donde:

- S = Resistencia del sistema sin raíces
- σ' = Esfuerzo normal
- ϕ' = Angulo de fricción del suelo

El modelo propuesto para análisis incluye la metodología del sistema de Janbú (1973), adicionando fuerzas de tensión calculadas por unidad de área de superficie de falla (Figura 9.12).

La dirección de cada fuerza es tangente a la superficie de falla y su valor depende de la densidad de raíces y la resistencia calculada de la raíz para el diámetro promedio de raíces y su efecto solamente se tiene en cuenta hasta la profundidad en la cual la densidad de raíces es mayor del 10% del área paralela a la superficie del talud. Esto equivale a asimilar el efecto de las raíces a una cohesión.

Las raíces de diámetro superior a 1 mm representan un anclaje real que puede tenerse en cuenta en el análisis de estabilidad de un talud o ladera, utilizando los modelos matemáticos tradicionales de la mecánica de suelos.

Aumento de la Cohesión del Sistema Suelo - Raíces

Las raíces producen una cohesión del sistema del suelo-raíces utilizando el refuerzo de la fibra de la raíz, la cual aumenta la resistencia del suelo.

El efecto del refuerzo debido a las raíces, es soportado por una gran cantidad de inventario de deslizamientos que comprueban que la resistencia del suelo disminuye después de remover la vegetación.

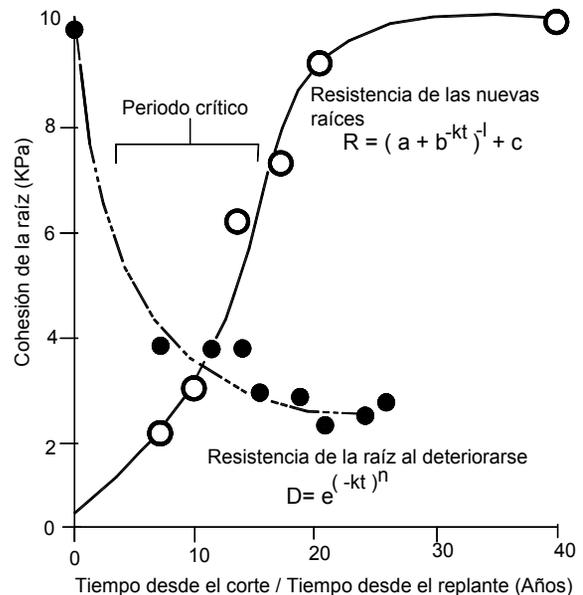


Figura 9.13 Efecto de la remoción y replazo de un bosque industrial (Sidle y otros, 2006).

Los valores de la cohesión debida a las raíces son difíciles de obtener y generalmente se calculan utilizando análisis de fallas ocurridas o ensayos de corte directo. La variación de la cohesión con el tiempo es lenta y compleja de determinar.

La morfología y distribución del sistema de raíces afecta en forma determinante la resistencia del sistema suelo-raíces.

Para el análisis de la cohesión generalmente se realizan las siguientes suposiciones (Schmidt y otros, 2001):

- La resistencia a la tensión de las fibras individuales de las raíces se moviliza totalmente. Esta suposición sobre estima el efecto de las raíces.
- El ángulo de fricción del suelo no se afecta por las raíces. No es claro la contribución friccionante de las raíces.
- Todas las raíces fallan simultáneamente en un deslizamiento. En la práctica la falla de las raíces es progresiva.
- Las raíces son flexibles e inicialmente se encuentran orientadas perpendicularmente a la superficie de falla.

Sin embargo, los ensayos de laboratorio muestran que el efecto en las raíces es similar así se encuentren perpendiculares u orientadas a la superficie de falla.

- La cohesión aportada por las raíces es directamente proporcional a la relación A_r/A_s , donde A_r es el área cubierta por raíces y A_s el área de suelo. Algunos autores (Shewbridge y Sitar, 1989) argumentan que el aumento del refuerzo es no lineal. Esta suposición puede sobre-estimar la cohesión en sitios con altos valores de densidad de raíces.
- El efecto potencial de las raíces sobre la presión de poros se desprecia.
- La cohesión de las raíces desprecia los momentos flectores de las raíces individuales.

Generalmente, se utilizan valores típicos regionales de cohesión de acuerdo a las características del bosque. Los valores de cohesión del sistema suelo-raíces varían de 6 a 23 kPa en bosques industriales y de 25 a 94 kPa en bosques naturales (Schmidt y otros, 2001).

LA DEFORESTACIÓN

Los efectos de la deforestación sobre la estabilidad de los taludes pueden no ser inmediatos. Inicialmente se produce un cambio hidrológico y un aumento de la erosión superficial y de la infiltración, pero los efectos desastrosos se observan cuando la infraestructura radicular original se descompone, generalmente entre 2 a 5 años después de la deforestación.

Bache (1984) reportó que en árboles de raíces profundas a los 30 meses después de la deforestación, la resistencia a la tensión de las raíces disminuyó entre 65 y 86% dependiendo de la especie.

Las raíces más pequeñas, que son las que tienen mayor resistencia a la tensión o al arrancamiento son las primeras en descomponerse. La rapidez con que se descomponen depende de la especie de árbol y de las condiciones del sitio y del suelo.

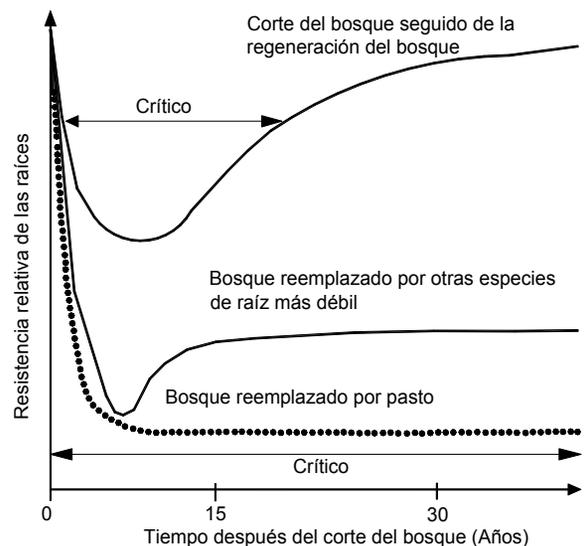


Figura 9.14 Cambio de resistencia relativa de las raíces al realizar conversión del bosque por prácticas de agricultura (Siddle y Dhakal, 2002).

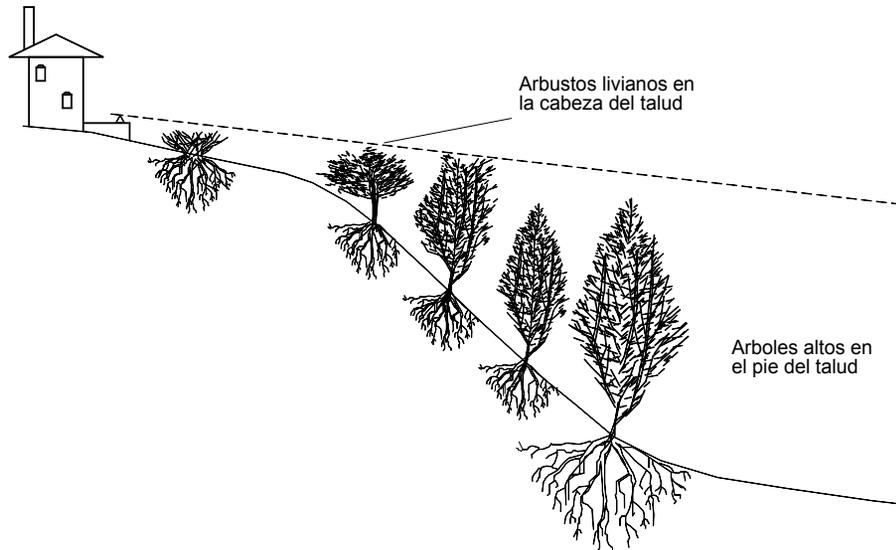


Figura 9.15 Elementos de arquitectura y paisajismo en el diseño de revegetalización.

De acuerdo con O'Loughlin y Watson (1979), la tensión en el proceso de descomposición puede determinarse por la expresión:

Donde:

$$T_{rt} = T_{r0}e^{-bt}$$

T_{rt} = Tensión de las raíces un tiempo t después de cortado

T_{r0} = Tensión de las raíces con el árbol vivo

b = Probabilidad de descomposición

t = Tiempo desde el momento del corte

Las tasas de deforestación en los países tropicales son muy altas y son muy escasos los programas de recuperación de estas áreas.

Si la vegetación de raíz profunda es removida, se reducen las tensiones capilares y se eleva el nivel de agua freática dentro del talud.

En bosques industriales se acostumbra cortar los árboles y resembrar. El efecto es que el deterioro de las raíces antiguas es más rápido que el crecimiento de las raíces nuevas. Como resultado hay un período de susceptibilidad alta a los deslizamientos, como se observa en las figuras 9.13 y 9.14.

Uno de los peores casos es la destrucción del bosque para uso del suelo en agricultura o ganadería. En este caso el bosque se reemplaza por una vegetación de menor profundidad y resistencia de las raíces y diferentes prácticas de manejo.

La destrucción de bosque para la siembra de café, cacao, frutales, palma, caucho y otras especies ocurre con frecuencia en los países tropicales. Sin embargo, la situación más crítica es el reemplazo del bosque por agricultura no arbórea como el maíz, tomate, etc. En este caso se pierde totalmente la resistencia aportada por las raíces del bosque original.

Igual situación ocurre con la destrucción de los bosques para uso del terreno en ganadería. La destrucción progresiva de los bosques ha incrementado la ocurrencia de deslizamientos (Harwood, 1996; Fischer y Vasseur, 2000; Sidle, 2005). La destrucción del bosque conduce necesariamente a un incremento de probabilidad de deslizamientos.

DISEÑO DE REVEGETALIZACIÓN

La revegetalización de un talud ayuda a controlar la erosión y a aumentar el factor de seguridad. Por esta razón cada día se utiliza más la vegetación en la estabilización de taludes.

El efecto de la vegetación es una interacción compleja entre factores hidrológicos y mecánicos de difícil cuantificación (Figura 9.15).

El establecimiento de vegetación no es fácil y deben tenerse consideraciones especiales para su diseño; sin embargo, todo diseñador debe considerar la vegetación como un sistema básico de estabilización para los taludes en suelo o roca meteorizada (Grados IV, V y VI).

Un caso específico de estabilización de taludes utilizando revegetalización, es el deslizamiento de Cucaracha en el corte Gaillard en el Canal de Panamá. El deslizamiento histórico de Cucaracha se reactivó en 1986 bloqueando prácticamente el canal (Berman, 1991).

Como parte de un programa combinado de estabilización se plantaron 60.000 árboles de rápido crecimiento, tales como Acacios y Gomelinas (Rivera, 1991). Generalmente el proceso de revegetalización de taludes se ha concentrado en el uso de pastos olvidándose de los arbustos, hierbas y árboles.

Como regla general, nunca debe plantarse una sola especie, sino una sucesión de variedades en tal forma que se recupere el sistema vegetativo original. Se debe considerar además el manejo apropiado de las técnicas de vegetación para ayudar en el proceso natural de sucesión.

Tabla 9.4 Sistemas de protección utilizando biotecnología (modificada de Gray y Sotir, 1992).

Categoría	Descripción
Vegetación convencional	Siembra por semillas estolones o macetas.
Plantas maderables utilizadas como refuerzo	Estacas vivas y colchones de maleza.
Estructuras con vegetación	Gaviones, estructuras de llantas usadas, muros criba, geomallas, revestimientos sintéticos.

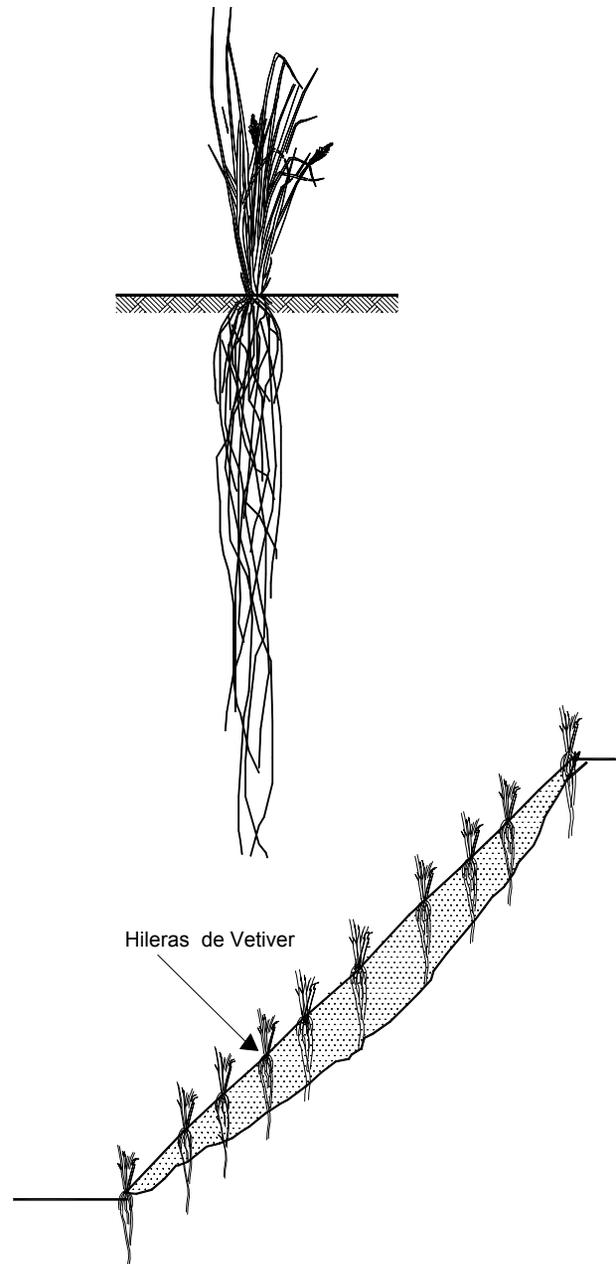


Figura 9.16 Esquema de una planta de vetiver y su efecto sobre la estabilidad de un talud.

Bioingeniería

La estabilización de taludes por el uso combinado de vegetación y elementos estructurales adicionales trabajando de una manera conjunta e integrada, se le conoce como estabilización Biotecnológica de taludes (Tabla 9.4). Este concepto de estabilización comprende parámetros ambientales muy importantes y su efectividad ha sido extraordinaria (Gray y Leiser, 1982).

Pastos y plantas diseñadas con el propósito de producir refuerzo del suelo se pueden plantar junto con muros de contención o sistemas estructurales abiertos en forma de grilla, con espacios para el crecimiento de la vegetación.

Por ejemplo, Gray y Sotir (1992) describen el uso de enrocados conjuntamente con vegetación para la estabilización de un talud, en el cual la vegetación ayudó a retener los bloques de roca y al mismo tiempo reforzar el talud.

La utilización de mantos orgánicos o mantos sintéticos junto con la vegetación conforman una protección integral contra la erosión. Generalmente estos materiales se desintegran después de que las plantas crecen y se establecen en forma permanente.

La utilización de trinchos empleando estacas con maderas y ramas de maleza, representan soluciones muy interesantes para el manejo de taludes. La biotecnología por sus características ambientales es muy atractiva para la estabilización de taludes.

Limitaciones de la Protección Vegetal

El establecimiento exitoso de vegetación en un talud está determinado por muchos factores tales como época de siembra, pendiente del talud, localización, y composición de los materiales del talud.

Las épocas ideales de plantación son las semanas anteriores a la temporada de lluvias; sin embargo, se puede realizar el plante en épocas secas disponiendo de un programa adecuado de riego.

La pendiente de los taludes tiene un efecto importante en el esfuerzo requerido para establecer la cobertura vegetal. Para taludes de pendiente alta, se requiere colocar elementos de anclaje para los pastos y bermas para los árboles.

En taludes de pendiente fuerte se aconseja no sembrar árboles, sino arbustos para disminuir las fuerzas del viento sobre ellos.

Si los materiales son muy duros se puede requerir la excavación de cajas profundas para la siembra de cada arbusto y deben utilizarse cantidades importantes de suelo orgánico o fertilizantes.

Con referencia a la localización del talud, los taludes que reciben la exposición directa del sol de la tarde presentan mayores dificultades para la vegetación, que los que reciben el sol de la mañana o poseen condiciones de sombra relativa.

Deben analizarse, además, los factores relacionados con la presencia del hombre: pisoteo, quemas, basuras, humo de los vehículos, contaminación, etc.

Tabla 9.5 Ventajas y desventajas de los diversos tipos de planta (Gray y Sotir, 1996).

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 las riberas de ríos.	Difíciles de obtener y el sistema de plantación no es sencillo.
Hierbas	Raíz relativamente profunda.	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.
Árboles	Raíces profundas, no requieren mantenimiento.	Es demorado su establecimiento y generalmente son más costosos.

Selección de Especies Vegetales

Como no existen especies universales se debe acudir a los expertos forestales para escoger la especie de pasto, hierba, arbusto o árbol que se debe utilizar para cada caso específico, teniendo muy en cuenta la experiencia local y las diferencias de tolerancias y hábitos de las diferentes especies.

El tipo de vegetación que cubre la superficie del talud tiene efecto sobre la estabilidad, por ejemplo, Campbell (1975) reportó que los deslizamientos de suelo eran 3 a 5 veces más frecuentes en taludes cubiertos por pastos que en aquellos cubiertos por maleza y arbustos.

La especie vegetal debe seleccionarse que sea compatible con las condiciones del suelo y el sitio, incluyendo disponibilidad de agua, nutrientes, PH, clima, regulaciones gubernamentales, etc.

Ciertos tipos de planta son intrínsecamente mejores que otras para objetivos de estabilización específicos (Tabla 9.5).

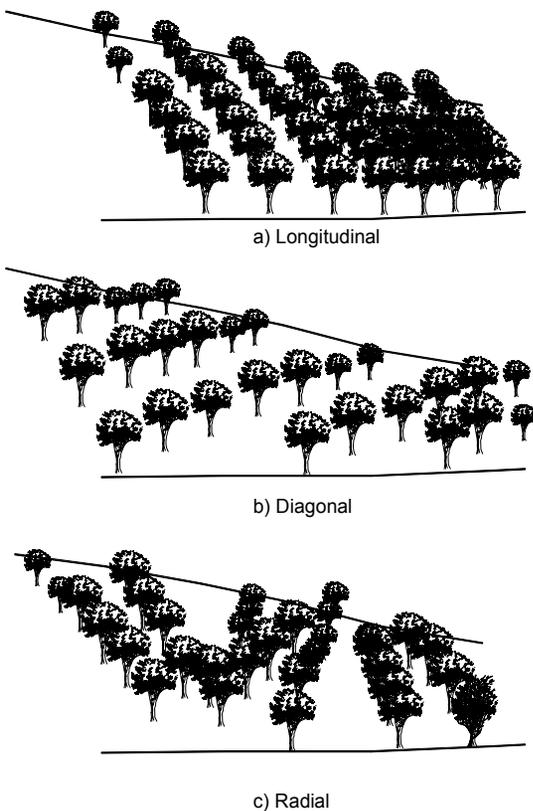


Figura 9.17 Arreglo de árboles en el talud.

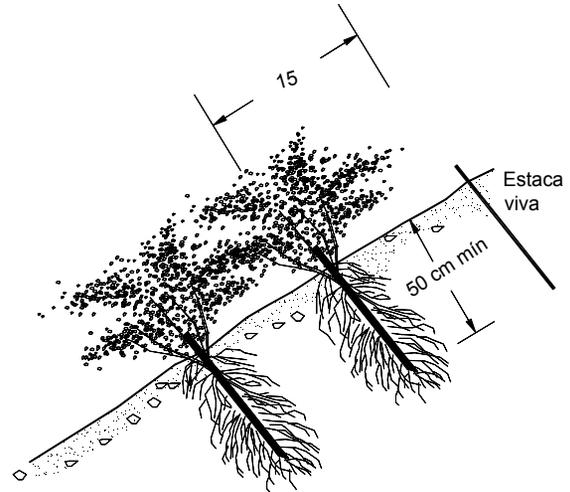


Figura 9.18 Estacas vivas.

La vegetación maderable posee raíces más profundas y más resistentes que las plantas herbáceas y pastos, y provee un mejor refuerzo y efecto de arco.

El Vetiver como Planta para Estabilizar Deslizamientos

El Vetiver (*Vetiveria Zizanioides* L.) es una especie de pasto originario de Asia, que se está utilizando con mucha frecuencia en los países tropicales para el control de erosión y para disminuir el potencial de deslizamiento de los taludes.

Esta planta es una gramínea perenne con apariencia de maleza, que alcanza una altura hasta de 1.6 metros en condiciones óptimas y posee un sistema de raíces con una gran cantidad de cilindros fibrosos capaces de alcanzar profundidades de 4 a 5 metros (Figura 9.16).

El Vetiver resiste fácilmente las sequías y la inmersión en agua, debido a la profundidad de sus raíces. Le gusta la exposición al sol y es capaz de adaptarse a gran cantidad de suelo, desde arena a arcilla y a altitudes climáticas desde el nivel del mar hasta 2500 metros.

El Vetiver crece tanto en ambientes ácidos como en ambientes alcalinos ($4 < \text{pH} < 11$). Resiste concentraciones grandes de contaminantes y no requiere de fertilidad alta del suelo. Idealmente requiere una temperatura de 15°C . La resistencia a la tensión de las raíces del Vetiver varía de 25 a 60 Mpa (Cazzuffi y otros, 2006).

Establecimiento de Vegetación

Los árboles son las especies más difíciles de establecer y deben localizarse en el talud en tal forma que la humedad sea lo más permanente posible. Es conveniente la construcción de terrazas o sistemas de concentración de aguas en las áreas de siembra de los árboles.

La poda de los árboles es una práctica muy útil para generar un crecimiento armónico. Existen épocas del año más propicias que otras para la poda de los árboles y debe tenerse cuidado de no malograr su crecimiento por poda en un período no propicio.

La forma como se localizan los árboles en el talud puede afectar su comportamiento. Los arreglos pueden ser longitudinales, transversales, diagonales, cruzados o radiales (Figura 9.17). Ciertos tipos de pastos requieren riego permanente y no es recomendable utilizarlos en taludes en los cuales se puedan producir épocas de sequía.

Estacas vivas

Las estacas vivas son longitudes de tallo de árboles y arbustos que se entierran en el suelo con el objeto de que broten árboles (Figura 9.18). El procedimiento es simple, rápido y económico. Las estacas vivas pueden utilizarse como un tratamiento primario en el cual las estacas cumplen un objetivo de anclar otros elementos como trinchos o mantos vegetales, las cuales posteriormente se convertirían en árboles o arbustos. Las estacas deben ser generalmente de uno a tres centímetros de diámetro y de 60 centímetros a un metro de longitud.

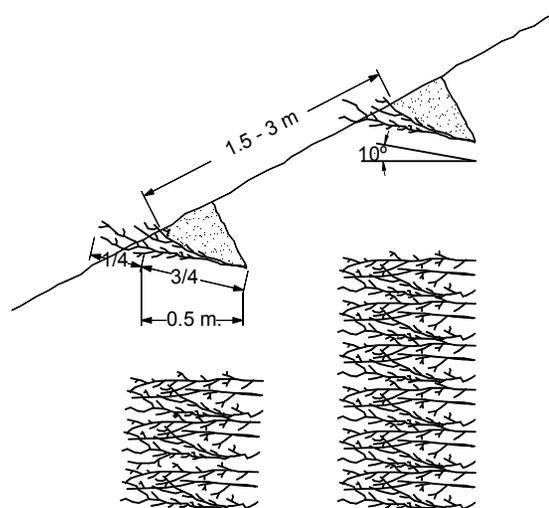


Figura 9.19 Fajinas vivas.

La parte superior de la estaca debe cortarse normal al eje y la parte inferior en forma de punta para facilitar su inserción.

Se recomienda seguir las siguientes instrucciones de instalación:

- Clavar la estaca normal a la superficie del talud utilizando martillos de caucho.
- La densidad de instalación debe ser de tres a cuatro estacas por metro cuadrado para garantizar un cubrimiento adecuado en corto tiempo.
- Las dos terceras partes de la estaca deben estar enterradas.

Tabla 9.6 Espaciamiento recomendado para fajinas vivas (Gray y Sotir, 1996).

Angulo del Talud H:V	Espaciamiento en Líneas de Igual Nivel (mts)	Espaciamiento en Ángulo (mts)
1:1 a 1.5:1	1 a 1.2	0.6 a 1.0
1.5 :1 a 2:1	1.2 a 1.5	1.0 a 1.2
2:1 a 2.5:1	1.5 a 1.8	1.0 a 1.2
2.5:1 a 3:1	1.8 a 2.4	1.2 a 1.5
3:5 a 4:1	2.4 a 2.7	1.5 a 2.1
4.5 :1 a 5:1	2.7 a 3.0	1.8 a 2.4

Fajinas vivas

Las fajinas son manojos de ramas que se entierran en zanjas poco profundas para que germinen en forma similar a como lo hacen las estacas vivas. Las zanjas generalmente, son excavadas a mano y forman un contorno a lo largo de las líneas de nivel del talud (Figuras 9.19 y 9.20)

En taludes muy húmedos también se pueden colocar fajinas siguiendo la pendiente para facilitar el drenaje. Después de colocar las fajinas las zanjas se rellenan con suelo, en tal forma que una parte de las fajinas queda enterrada y otra parte expuesta. La longitud de los ramos de fajina varía de 0.50 a 1.0 metro.

El principal uso de las fajinas es el control de erosión especialmente en zonas de cárcavas. Las fajinas a su vez forman unas líneas decorativas muy agradables al paisaje. Las fajinas generalmente, se hacen con hierbas y juncos adaptados a las condiciones climáticas del sitio.

En ocasiones se requiere colocar estacas para ayudar a la conformación de las fajinas vivas. El espaciamiento entre fajinas varía de acuerdo a la inclinación del talud (Tabla 9.6). Entre las hileras de fajinas vivas se acostumbra colocar una protección en manto vegetal utilizando un agrotextil o yute, el cual puede asegurarse a su vez, utilizando las fajinas vivas.

Una forma similar a las fajinas son las capas de maleza que consisten en ramos colocados en zanjas en la forma como se indica en la figura 9.20. Las ramas se colocan formando una red en cruz.

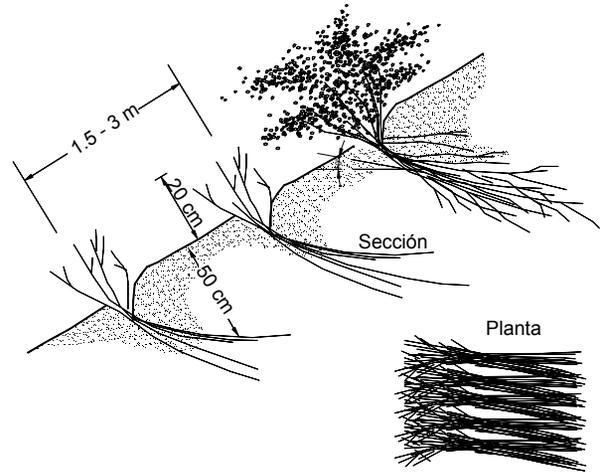


Figura 9.20 Fajinas vivas en cruz o capas de maleza.

Los espaciamientos de las hileras de maleza son similares a los de las fajinas vivas, aunque en términos generales los espaciamientos deben ser ligeramente menores. Otro sistema es el de relleno de malezas y suelo de cárcavas, utilizando hierbas y estacas vivas de arbustos, como se indica en la figura 9.21.

Estructuras y revestimientos artificiales con vegetación

La utilización de estructuras integradas con vegetación permite una gran variedad de esquemas, incluyendo muros criba, gaviones, llantas usadas, tierra reforzada, bloques de concreto y recubrimientos con diversos materiales sintéticos. La vegetación actúa como refuerzo del suelo, protección contra la erosión y fijador del recubrimiento.

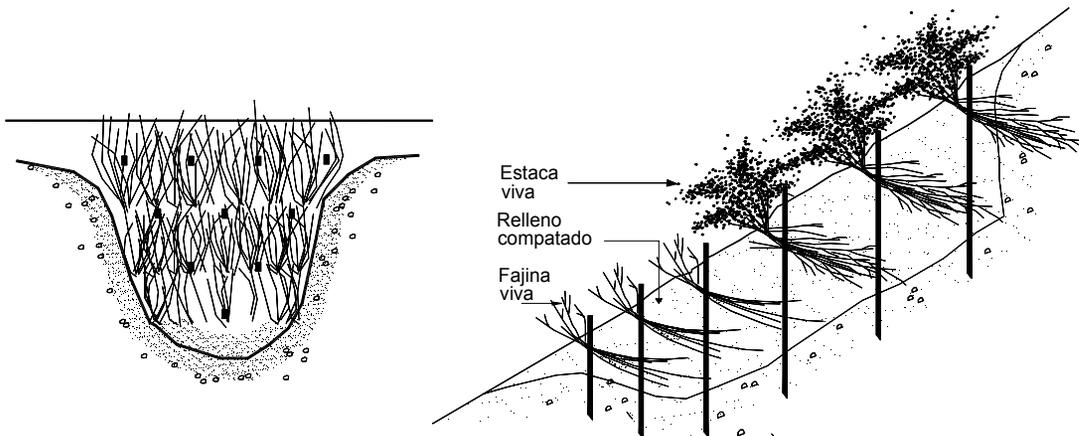


Figura 9.21 Relleno de una cárcava utilizando estacas vivas y fajinas.

REFERENCIAS CAPÍTULO 9

- Bache D.H., MacAskill I.A., (1984). "Vegetation in civil and landscape engineering". Granada Technical Books, London, 317 p.
- Barker D.H., Nordin A.R., Noraini M.T., Bayfield N.G. (1994). "Revegetating Slopes for Stability", International Conference on Landslides and Slope Stability, pp. 35-43, Kuala Lumpur Malaysia.
- Berman, G. (1991). "Landslides on the Panamá Canal". Landslide News (Japan landslide Society), No. 5 pp. 10-14.
- Burrough ER, Thomas BR. (1977). "Declining root strength in Douglas-fir after felling as a factor in slope stability". USDA Forest Service Research Paper INT-190. Intermountain Forest and Range Experiment Station: Ogden, UT.
- Burroughs, E.P., Thomas R.R. (1976). "Root Strength of Douglas Fir as a Factor in Slope Stability", USDA Forest Service Review, Draft, INT 1600-12 (9/66).
- Campbell, R.H. (1975). "Soil slips, Debris flows, and rainstorms in the Santa Monica mountains and Vicinity, southern California". U.S. Geological Survey professional paper 851 pp.
- Campos T.M.P., de-Andrade M.H.N., Vargas Jr E.A. (1991) "Unsaturated Colluvium over rock slide in a forested site in Rio de Janeiro, Brazil". Proceedings of the sixth International symposium on Landslides, New Zealand.
- Cazzuffi, D, Corneo, A., Crippa, E. (2006). "Slope stabilisation by perennial gramineae". In Southern Italy: plant growth and temporal performance. Geotechnical and Geological Engineering 24: pp. 429-447.
- Fischer, A., Vasseur, L., (2000). "The crisis in shifting cultivation practices and the promise of agroforestry: a review of the Panamanian experience". Biodiv. Conserv. 9, 739-756.
- Gray D. H., Ohashi H. (1983). "Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol 109, No. 3, pp. 335-353, New York.
- Gray D.H. (1974). "Reinforcement and Stabilisation of Soil by Vegetation", ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, GT6 pp. 695-699, New York.
- Gray D.H., Sotir R.B. (1996). "Biotechnical and soil Bioengineering Slope Stabilization. A Practical Guide for Soil Erosion Control". John Wiley and Sons 378 p.
- Gray, D.H. (1978). "Role of Woody Vegetation in Reinforcing Soils and Stabilizing Slopes", Symposium on Soil Reinforcing and Stabilizing Techniques, Sydney, Australia, pp. 253-306.
- Gray, D.H., Leiser A.T. (1982). "Biotechnical slope protection and erosional control". Van Nostrand Reinhold, New York, 271 pp.
- Gray, D.H., Sotir. R.B. (1992). "Biotechnical stabilisation of cut and fill slopes". In stability and performance of slopes and embankments: Proceedings of a specialty conference, Berkeley, Calif. (R.B. Seed and R.W. Boulanger, eds.) Geotechnical special Publication 31, American Society of civil engineers, New York, pp. 1395-1410.
- Gray, DH, Megahan, WF. (1981). "Forest vegetation removal and slope stability in the Idaho Batholith". USDA Forest Service Research Paper INT-271. Ogden, Utah.
- Greenway D.R. (1987). "Vegetation and Slope Stability", Slope Stability, edited by Anderson M.G, John Wiley and Sons Ltd. pp. 187-230, New York.
- Gregory K. J., Walling D. E. (1973) "Drainage Basin Form And Process: A geomorphological approach". Edward Arnold Publishers, London.
- Harwood, R.R., (1996). "Development pathways toward sustainable systems following slash-and-burn". Agric. Ecosyst. Environ. 58, 75-86.
- Janbú N. (1973). "Slope Stability Computations", Embankment Dam Engineering, Edited By Hirschfeld R.C. Poulos S.J., John Wiley and Sons, pp. 47-86, New York.
- Kozlowski, T.T. (1971). "Growth and Development of Trees", Vol.2. New York: Academic Press, 520 pp.
- Leventhal A.R., Mostyn G.R. (1987) "Slope Stabilization Techniques and Their Application", Soil Slope Instability and Stabilisation. Edited By Walker B. and Fell R., A.A. Balkema, pp. 183-230, Rotterdam.
- MacGregor J.P, McManus K.J. (1992) , "Management of Lands Subject to mass Movements", Proceedings of the Sixth International Symposium on Landslides, Vol 2, pp. 1437-1444, Christchurch New Zealand.
- Nordin A.R., (1994), "Slopes Vegetation Management for Stability". International Conference on Landslides and Slope Stability, pp. 287-291, Kuala Lumpur Malaysia.
- O'Loughlin, C.L., Watson A. (1979). "Root-wood strength deterioration in Radiata Pine after clearfelling". New Zealand Journal of Forestry Science 39(3): 284-293.
- Rice, R.M., Krames, J.S. (1970), "Mass-Wasting Process in Watershed Management" Proceedings on Interdisciplinary Aspects of Watershed Management, ASCE, pp. 231-260.
- Rivera, R. (1991). "Reforestation Programa - Gaillard cut". Panamá Canal Commission Report No. 1, 12 pp, plus appendix.
- Schiechl H.M. (1980), "Bioengineering for land Reclamation and Conservation". University of Alberta Press, 404 p. Edmonton Alberta Canadá.
- Schmidt, K.M., Roering, J.J., Stock, J.D., Dietrich, W.E., Montgomery, D.R. y Schaub, T. (2001). "The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range". Can. Geotech. J. 38: pp. 995-1024.

- Shewbridge, S.E., Sitar, N. (1989). "Deformation characteristics of reinforced sand in direct shear. *Journal of Geotechnical Engineering*", ASCE, 115: 1134–1147.
- Sidle RC, Swanston DN. (1982). "Analysis of a small debris slide in coastal Alaska". *Canadian Geotechnical Journal* 19: 167–174.
- Sidle RC. (1992). "A theoretical model of the effects of timber harvesting on slope stability". *Water Resource Research* 28: 1897–1910. DOI: 10.1029/92WR00804.
- Sidle, R, Ziegler, A, Negishi, J, Nik, A.R., Siew R, Turkelboom F. (2006). "Erosion processes in steep terrain—Truths, myths, and uncertainties related to forest management in Southeast Asia". *Forest Ecology and Management* 224 pp.199–225
- Sidle, R.C., (2005). "Influence of forest harvesting activities on debris avalanches and flows". In: Jakob, M., Hungr, O. (Eds.), *Debris Flow Hazards and Related phenomena*. Springer-Praxis, Heidelberg, pp. 345–367.
- Sidle, R.C., Chigira, M., (2004). "The July 20, 2003, landslides and debris flows in southern Kyushu, Japan". *Eos. Trans. Am. Geophys. Union* 85 (15), 145–151. *International Conference on Landslides and Slope Stability*, pp. 387-392, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Sidle, R.C., Dhakal, A.S., (2002). "Potential effects of environmental change on landslide hazards in forest environments". In: Sidle, R.C. (Ed.), *Environmental Change and eomorphic Hazards in Forests*, IUFRO Research Series No. 9. CAB International Press, Oxen, UK, pp. 123–165.
- Styczen M.E., Moran R.P.C.(1996). "Engineering properties of vegetation" *Slope Stabilization and Erosion Control*. Editors: Morgan R.P.C. Rickson R.J. E&FN SPON, London. pp 5-58.
- Suyama M. (1992), "Assessment of Biotechnical Stability Effect for Urban Forest in Japan", *Proceedings of the Sixth International Symposium on Landslides*, Vol 1, pp. 831-836. Christchurch New Zealand.
- Ter-Stepanian G., (1963), "On the Long Term Stability of Slopes" Publication No. 52, Norwegian Geotechnical Institute, pp 1-15. Norway.
- Tsukamoto Y., Kusakabe O. (1984) "Vegetative influences on Debris Slide Occurrences on Steep Slopes in Japan". *Symposium on effects of Forest Land Use on Erosion and Slope Stability*, Honolulu.
- Tsutiya A.M. , Macedo E.S. (1991) "Mechanism of natural Slope instability in Guaratinguetá, Brazil". *Proceedings of the sixth international symposium on Landslides*, New Zealand.
- Turmanina, V.I., (1965). "The Strength of Tree Roots", *Bulletin of the Moscow Society of Naturalists*, Biological Section, Vol. 70, pp. 36-45.
- Waldron LJ, Dakessian S, Nemson JA, (1983). "Shear resistance enhancement of 1.22-meter diameter soil cross sections by pine and alfalfa roots". *Soil Science Society of America Journal* 47: 9–14.
- Walker B.F., Mohen F.J. (1987) "Groundwater prediction and control, and negative pore water pressure". *Soil Slope Instability and Stabilization*, Walker and Fell-Editors. Balkema Rotterdam.
- Watson, A.J., O'Loughlin C.L. (1990). "Structural root morphology and biomass of three age classes of *Pinus radiata*". *New Zealand Journal of forestry science* 20 (1):97-110.
- Williams A.A.B., Pidgeon J.T. (1983) "Evapotranspiration and Heaving Clays in South Africa". *Geotechnique*, vol. 22, No. 2.
- Yagi N. Yatabe R., Enoki M., Hassandi A., (1994). "The effects of Root Networks on Slope Stability".