

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**ESTABILIZACION DE TALUDES CON  
REFORESTACIÓN**

**TESIS**

Para Optar el Título Profesional de:

**INGENIERO CIVIL**

**LUIS MARTÍN MARTÍNEZ GÁLVEZ**

Lima – Perú

2006

Dedico este trabajo a mis padres por su amor, paciencia e incondicional apoyo en todo momento de mi vida.

Agradezco a Dios por sus bendiciones y las personas que hicieron posible la realización de la presente tesis, mediante información y consejos recibidos:

Al Ingeniero José Luis Medina Alvarado, a mi tío el Ingeniero Daniel Martínez Gabaldoni, a la Municipalidad Provincial de Yauli en la persona del Ingeniero Javier Albornoz y a mi asesor el Ingeniero PhD. Jorge Alva Hurtado.

## INDICE

### INTRODUCCION

#### 1. TALUDES: REVISIÓN TEÓRICA

- 1.1 Definición de Taludes
- 1.2 Estabilidad de Taludes
  - 1.2.1 Deslizamiento de Translación en una Pendiente Infinita
  - 1.2.2 Deslizamiento Rotacional
- 1.3 Degradación de Taludes
  - 1.3.1 Movimientos en Masa
  - 1.3.2 Erosión en Taludes

#### 2. LA BIOINGENIERÍA EN EL TRATAMIENTO DE TALUDES

- 2.1 Funciones de la Vegetación en la Estabilidad de Taludes
  - 2.1.1 Efectos Hidrológicos de la Vegetación
  - 2.1.2 Protección de la Superficie del Suelo
  - 2.1.3 Modificación de la Propiedades Mecánicas
- 2.2 Técnicas de Bioingeniería en el Tratamiento de Taludes
  - 2.2.1 Construcciones Vivas
  - 2.2.2 Construcciones Mixtas

#### 3. REFORESTACIÓN EN TALUDES

- 3.1 Criterios de Selección de Especies Vegetales
- 3.2 Especies Vegetales Usadas
  - 3.2.1 Especies Herbáceas
  - 3.2.2 Especies de Árboles y Arbustos
- 3.3 Técnicas de Siembra e Implantación
- 3.4 Implantación y Siembra de la Vegetación
- 3.5 Cuidados Posteriores

#### 4. APLICACIONES DE LA BIOINGENIERIA EN TALUDES

- 4.1 Aplicación de la Bioingeniería en la Minería
  - 4.1.1 Generalidades
  - 4.1.2 Objetivos.
  - 4.1.3 Área de Trabajo

- 4.1.4 Acciones Realizadas
- 4.2 Aplicación de la Bioingeniería en la Línea de Conducción del Gasoducto
  - 4.2.1 Generalidades
  - 4.2.2 Problemas Presentados
  - 4.2.3 Acciones Realizadas
- 4.3 Experiencia de Bioingeniería: Acopalca
  - 4.3.1 Generalidades
  - 4.3.2 Presentación del Problema
  - 4.3.3 Acciones Realizadas
- 4.4 Experiencia de Bioingeniería: Torre – Torre
  - 4.4.1 Generalidades
  - 4.4.2 Presentación del Problema
  - 4.4.3 Acciones Realizadas
- 5. EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD: LOCALIDAD CARHUASCAYÁN – LA OROYA.**
  - 5.1 Generalidades sobre el Proyecto
  - 5.2 Problemática Presentada
  - 5.3 Objetivos de la Evaluación
  - 5.4 Marco de Referencia del Proyecto
  - 5.5 Análisis de Suelos
  - 5.6 Estudio de Topografía
  - 5.7 Análisis de Falla Global
  - 5.8 Análisis de Estabilidad de Elementos de Contención
  - 5.9 Análisis de Deslizamiento Translacional
  - 5.10 Evaluación de los Análisis y Propuesta de Solución
  - 5.11 Anexos
- 6. CONCLUSIONES**
  - 6.1 Conclusiones Teóricas
  - 6.2 Conclusiones Aplicativas

## **BIBLIOGRAFIA**

## INTRODUCCIÓN

Definimos un talud como la superficie inclinada respecto a la horizontal que haya de adoptar permanentemente una estructura de tierra y los encontramos en la naturaleza como laderas o en construcciones civiles como terraplenes.

La importancia en la estabilidad de un talud está determinada por la probabilidad de falla y el riesgo de daños en su ocurrencia. La probabilidad de falla está en función de las condiciones propias y del entorno del talud, tales como su geometría, propiedades geotécnicas, condiciones topográficas, condiciones hidrológicas, etc. Mientras que el riesgo de daños en la ocurrencia esta determinado por los bienes materiales, estructuras y vidas de personas y animales que están expuestas a una posible falla. Luego bajo estas condiciones se determinan los factores de seguridad con los que se diseña un talud.

Sin embargo, durante la vida del talud, éste está expuesto a efectos de degradación que pueden originar procesos de desestabilización. Por tanto es importante garantizar la estabilidad del talud durante toda su vida útil. Bajo estos conceptos, se busca estabilizar un talud mediante diversos métodos y tecnologías, los cuales buscan ser más efectivos, económicos y adaptables al medio, tanto estéticamente como ecológicamente.

Surge como alternativa, la aplicación de la bioingeniería, para estabilización de taludes, mediante el uso de plantas o partes de ellas (materia viva) que serán acomodadas y emplazadas para ser usadas como refuerzo del suelo, drenaje y barreras para el movimiento de suelos. Las funciones que cumple la cobertura vegetal van desde el mejoramiento del paisaje, el control de la fluctuación de las temperaturas, el control de la erosión, la regulación de caudales líquidos, hasta el reforzamiento de los suelos por los sistemas radicales. Mediante estas acciones se busca evitar o disminuir la degradación del talud, garantizando así la estabilidad del talud durante toda su vida útil. La principal característica y diferencia con otros métodos radica en que el principal elemento estabilizador del talud son las raíces, tallos y hojas de las plantas y no requieren de otros elementos externos.

Entre las ventajas que ofrece este método está su bajo costo de instalación y mantenimiento, su alta efectividad para controlar problemas de erosión, su significativo aporte en la estabilización de taludes y control de deslizamientos, su adaptabilidad ecológica con el medio, su importante aporte a

la estética paisajística de la estructura y su capacidad de combinación con otras técnicas de estabilización.

Sin embargo, cuando la probabilidad de falla y/o el riesgo de daños es alto, esta técnica no es aplicable en su forma pura, debido a la incertidumbre en el comportamiento, supervivencia y adaptación de las plantas. Pero si es aplicable junto a otros métodos (biotécnica), llegando a convertirse en un componente importante en el control de la humedad y erosión, así como también como componente paisajístico; pero no como elemento principal de estabilización.

En el Perú, se ha aplicado exitosamente este método en distintos escenarios (tanto en la costa, sierra y selva) y en distintas obras civiles tales como carreteras, conducción del gas, represas, defensas ribereñas, obras urbanas, muros de contención, etc.

El presente trabajo es una recopilación de la información existente sobre la teoría de análisis a taludes, los problemas que afectan a la estabilidad del talud, la función de las plantas en la estabilidad de taludes, los métodos y la aplicación de la bioingeniería a la estabilización de taludes, las especies recomendadas y usadas en nuestro medio, los trabajos complementarios que garanticen la efectividad del método y la experiencia obtenida en distintos trabajos realizados. Las especies forestales recomendadas son principalmente de la zona central andina, que es donde se ha realizado el estudio. La inclusión de otras especies forestales implicaría la observación e investigación en otras zonas y un estudio mucho más extenso.

De manera aplicativa se ha realizado una evaluación de estabilidad a un proyecto en ejecución, con problemas de deslizamientos. Los objetivos de la evaluación fueron, mediante una revisión a los diseños de los muros de contención planeados y análisis de estabilidad global y local al talud, los motivos del deslizamiento sucedido y plantear una solución al problema dentro del contexto de la tesis.

La tesis "Estabilización de Taludes con Reforestación" está organizada de la siguiente manera:

- El primer capítulo realiza una revisión teórica del tema, donde se presenta una definición de taludes, análisis de la estabilidad de taludes y los tipos de degradación a los que están expuestos.

- El segundo capítulo muestra la aplicación de la bioingeniería en la estabilidad de taludes, estableciendo los efectos hidrológicos y mecánicos de las plantas en los taludes (efectos a favor y en contra) y las técnicas existentes para el tratamiento de taludes, tales como las construcciones vivas y mixtas.
- El tercer capítulo trata sobre la reforestación de taludes, para ello establecemos los criterios de selección, las especies forestales usadas en el tratamiento de taludes (entiéndase como especies forestales a las especies herbáceas, arbustivas y arbóreas), las técnicas de siembra e implantación usadas y los cuidados que se deben tener posteriormente para que se tenga éxito en el tratamiento de taludes.
- El cuarto capítulo presenta casos de la utilización de la Bioingeniería en la estabilización de taludes en el Perú para obras mineras y civiles. Los casos abordados incluyen la experiencia obtenida para el control de la erosión y estabilidad de taludes por las mineras Yanacocha y Atacocha, la experiencia obtenida por la empresa INMAC para trabajos de control de erosión y estabilización de taludes en la conducción del gasoducto, la experiencia obtenida por el Ministerio de Agricultura y la comunidad de Acopalca (Huancayo) en trabajos de estabilización de taludes y conformación de áreas de siembra (andenes) en su localidad y la experiencia obtenida por la comunidad de Palián y la UNCP en trabajos de control de erosión, estabilización de taludes y tratamiento paisajístico en la zona de “Torre Torre” – Palián.
- El quinto capítulo presenta, como aplicación del tema, la evaluación de estabilidad al proyecto en ejecución “Escalinatas, Muro de Contención y Forestación en Acceso a La Oroya”, realizado por la Municipalidad Provincial de Yauli en el año 2006, el cual presenta problemas de deslizamientos ocurridos durante su ejecución. La finalidad fue determinar las causas del problema mediante análisis y revisiones a los diseños y proponer una solución de bioingeniería al problema.
- El sexto capítulo presenta las principales conclusiones llegadas en la elaboración de la presente tesis, tanto en el campo teórico como en el campo aplicativo.

# CAPÍTULO I

## TALUDES: REVISIÓN TEÓRICA

### 1.1 Definición de Taludes

Un talud o ladera se define como aquella masa de tierra o roca que posee pendiente y que conecta dos puntos distintos que se encuentran a diferente altura. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente.

Según Roy Whitlow (14) "Todos los taludes (naturales o artificiales) tienen una tendencia inherente a degradarse a una forma más estable (en última instancia, a una superficie horizontal) y, bajo este punto de vista, la inestabilidad equivale a la tendencia a moverse y la falla es el movimiento real de masas. Las fuerzas que causan la inestabilidad son la gravedad y la infiltración, mientras que la resistencia a la falla proviene de la geometría del talud y de la resistencia al corte de las rocas y el propio suelo".

Bajo este concepto, un talud debe ser diseñado de tal manera que las fuerzas desestabilizadoras sean menores que las fuerzas resistentes (definición de Factor de Seguridad).

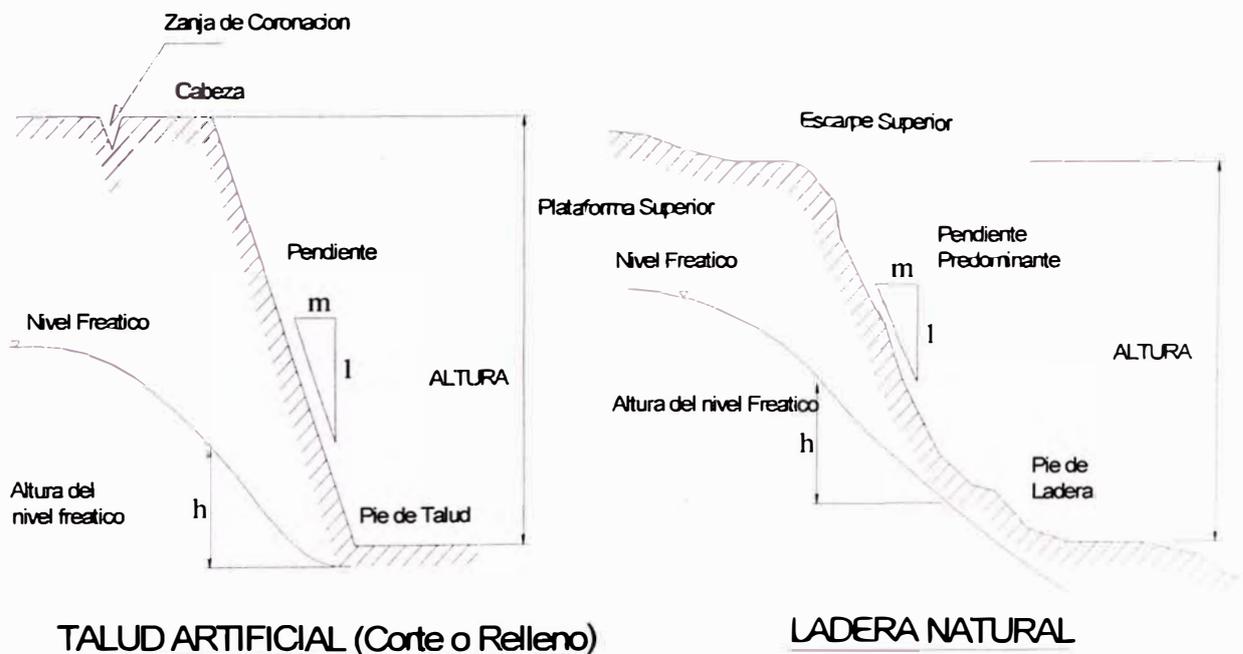


Fig. N° 1.1 Tipo de Taludes: Artificial y Natural

En el talud o ladera se definen los siguientes elementos constitutivos:

- *Altura*: Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.
- *Pie*: Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
- *Cabeza o escarpe*: Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.
- *Altura de nivel freático*: Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.
- *Pendiente*: Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación m/1, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical, por ejemplo: Pendiente: 45°, 100%, o 1H: 1V.

Existen, además, otros factores topográficos que se requiere definir como son longitud, convexidad (vertical), curvatura (horizontal) y área de cuenca de drenaje, los cuales pueden tener influencia sobre el comportamiento geotécnico del talud.

## 1.2 Estabilidad de Taludes

Un talud es diseñado según sus características geométricas y geotécnicas y teniendo en cuenta el entorno al que está expuesto, de tal forma que se mantenga estable durante su vida útil.

El análisis de la estabilidad de un talud se basa en la medida del factor de seguridad, el cual se define como:

$$\text{Factor de Seguridad} = \frac{\text{Momentos Resistentes}}{\text{Momentos Actuales}}$$

El movimiento de masas puede darse como resultado de una falla al corte a lo largo de cierta superficie interna, o bien cuando una disminución general del esfuerzo efectivo entre las partículas causa una licuación total o parcial.

### 1.2.1 Deslizamiento de Translación en una Pendiente Infinita

Según Roy Whitlow (14), describe este término como un movimiento a poca profundidad paralelo a una pendiente larga. Con frecuencia una capa subyacente de mayor dureza es la que obliga a la superficie de falla a un plano. Frecuentemente la falla se origina por un aumento repentino en la presión de poro, en especial en suelos parcialmente desecados en los cuales la capa superficial se une y se mueve como una laja delgada y plana. Tenemos dos condiciones:

#### **Pendiente Infinita sin Drenado**

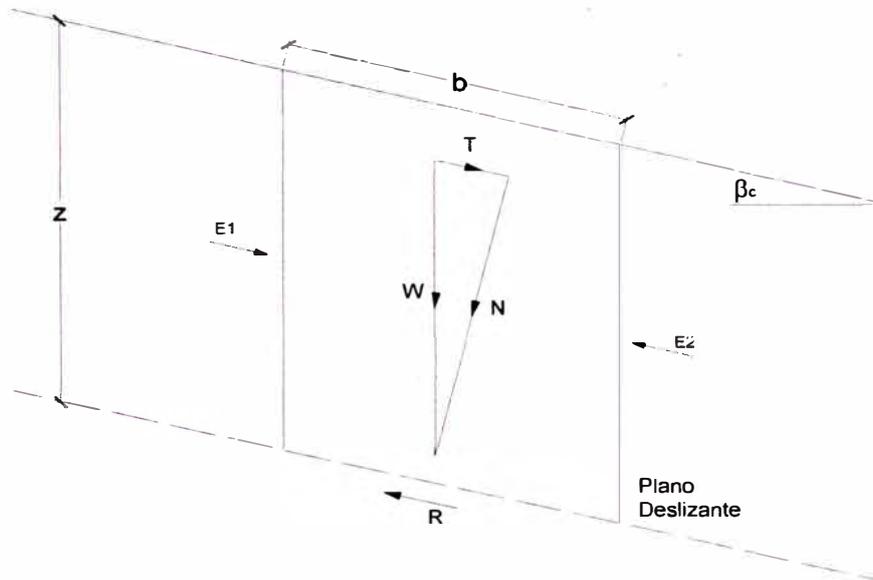


Fig. N° 1.2 Fuerzas sobre un elemento en un talud sin drenado

La estabilidad de un elemento prismático depende de las siguientes fuerzas:

Peso del Elemento:	$W = \gamma z b \cos \beta_c$
Reacción Normal:	$N = W \cos \beta_c$
Fuerza Tangencial:	$T = W \sen \beta_c$
Fuerza de Resistencia:	$R = \tau b$

Donde:

$\beta_c$  = ángulo crítico de la pendiente

$\tau$  = Resistencia al cortante sin drenado del suelo =  $c_u$

Luego, en el equilibrio:

$$R - T = 0$$

Reemplazando y desarrollando, tenemos:

$$\sen \beta_c = \frac{2 c_u}{\gamma z}$$

Considerando que  $\beta_c < 45^\circ$ :

$$\frac{2 c_u}{\gamma z} < 1$$

Según la fórmula anterior, hallamos la profundidad crítica, es decir la profundidad a la que se espera que se desarrolle la superficie de deslizamiento:

$$z_c = \frac{2 c_u}{\gamma \operatorname{sen} \beta_c}$$

### **Pendiente Infinita Drenada**

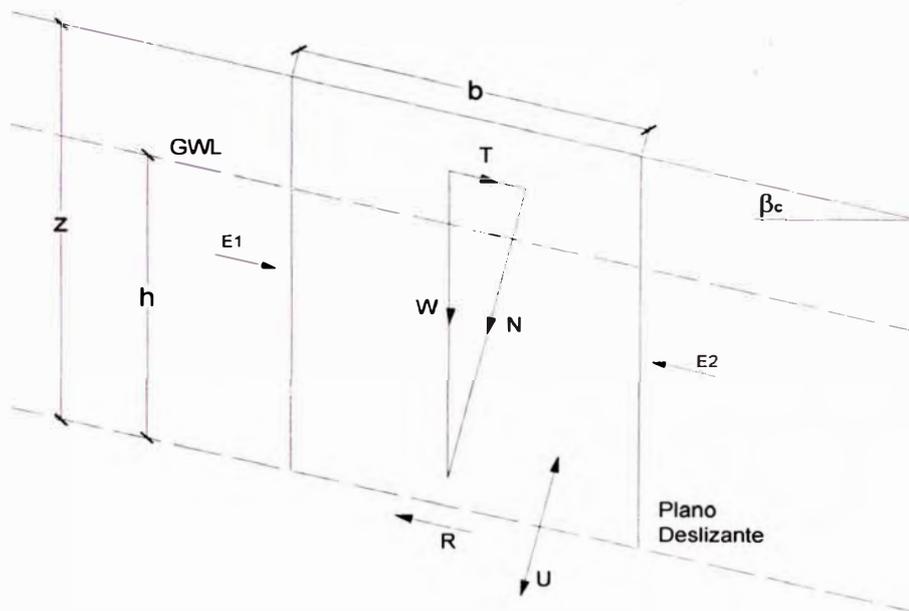


Fig. N° 1.3 Fuerzas sobre un elemento de una pendiente drenada

En condiciones drenadas, el análisis se realiza en esfuerzos efectivos:

Peso del Elemento:	$W = \gamma z b \cos \beta_c$
Reacción Normal:	$N = W \cos \beta_c$
Fuerza Tangencial:	$T = W \operatorname{sen} \beta_c$
Fuerza de Presión de Poro:	$U = \gamma_w h b \cos^2 \beta_c$
Fuerza de Resistencia:	$R = \tau' b$

donde:

$\beta_c$  = ángulo crítico de la pendiente

$\tau$  = Resistencia al cortante drenado del suelo

Expresión general cuando  $c' = 0$ .

Luego, en el equilibrio:

$$R - T = 0$$

Reemplazando y desarrollando, tenemos:

$$F = \left[ 1 - \frac{\gamma_w h}{\gamma z \cos^2 \beta} \right] \cdot \frac{\tan \varphi'}{\tan \beta}$$

Si, hacemos que la presión de poro:

$$F = \left[ 1 - \frac{u}{\gamma z \cos^2 \beta} \right] \cdot \frac{\tan \varphi'}{\tan \beta}$$

Consideramos los siguientes escenarios:

a) Arena seca o grava:

$$h = 0 \quad \text{y} \quad c' = 0$$

$$\tan \beta_c = \tan \varphi'$$

b) El nivel freático coincide con el plano deslizante:

$$h = 0 \quad \text{y} \quad c' = 0$$

$$\tan \beta_c = \tan \varphi'$$

c) El nivel freático esta situado debajo del plano deslizante:

En las arenas y limos finos se desarrolla presión de poro negativa debido a la atracción capilar por lo que el esfuerzo efectivo en el plano deslizante se incrementa por succión. De modo que  $\beta_c$  puede llegar a ser muy empinado.  $h_s$  = distancia del nivel freático al plano deslizante.

$$\tan \beta_c = \left[ 1 - \frac{\gamma_w h_s}{\gamma z} \right] \cdot \tan \varphi'$$

d) Tenemos una pendiente saturada con infiltración paralela uniforme:

Cuando la infiltración se presenta paralela a la pendiente, la línea superior de flujo coincide con la superficie del terreno y  $h = z$ .

$$\tan \beta_c = \left[ 1 - \frac{\gamma_w}{\gamma} \right] \cdot \tan \varphi'$$

e) Tenemos una pendiente saturada con infiltración vertical uniforme:  $h = 0$

$$\tan \beta_c = \left[ \frac{\gamma_w}{\gamma} \right] \tan \varphi'$$

f) Pendiente para la cual la cohesión es considerada,  $c' > 0$

$$\tau' = c' + \sigma'_n \tan \varphi'$$

$$F = \frac{c' + (\gamma z - \gamma_w h) \cos^2 \beta \cdot \tan \varphi'}{\gamma z \sin \beta \cdot \cos \beta}$$

### 1.2.2 Deslizamiento Rotacional

Los métodos más comunes para el análisis de la estabilidad de taludes en suelos cohesivos se basan en una consideración de equilibrio plástico límite. Se evalúan las fuerzas y momentos que actúan en este cuerpo libre y las fuerzas cortantes en la superficie de deslizamiento se comparan con las resistentes al cortante suministradas por el suelo.

Se pueden considerar diversas formas de superficies de deslizamiento para suelos cohesivos, sin embargo resulta ser más adecuada una superficie cilíndrica, esto es una sección transversal circular, porque produce resultados de exactitud satisfactoria sin que intervengan procedimientos analíticos complejos.

Según Rico y Del Castillo (13), los métodos de análisis límite disponibles para calcular la posibilidad de que se desarrolle un deslizamiento de tipo rotacional en el cuerpo de un talud, al igual que prácticamente todos los métodos de cálculo de estabilidad de taludes, siguen tres pasos fundamentales:

- a) Se establece una hipótesis sobre el mecanismo de la falla que se producirá. Ello incluye tanto la forma de la superficie de falla como una descripción cinemática completa de los movimientos que se producirán sobre ella y un análisis detallado de las fuerzas motoras.
- b) Se adopta una ley de resistencia para el suelo. Con base en tal ley se podrán analizar las fuerzas resistentes disponibles.
- c) Se establece algún procedimiento matemático de confrontación, para definir si el mecanismo de falla propuesto podrá ocurrir o no bajo la acción de las fuerzas motoras, venciendo el efecto de las fuerzas resistentes.

#### **Análisis por el Método Sueco**

Fellenius, propuso la superficie circular como forma apropiada de la superficie de falla para muchos casos de deslizamiento en el cuerpo del talud. Tenemos los siguientes casos de análisis:

##### **Caso 1: $\tau = c_u$**

Se analiza los casos en que la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos se expresa en base a los resultados de una prueba sin consolidación y sin drenaje (esfuerzos totales). Este procedimiento es aplicable a taludes y laderas formadas por arcillas blandas, en las que los efectos de

consolidación tienden a que la resistencia se incremente con el tiempo, con el correspondiente aumento en el factor de seguridad.

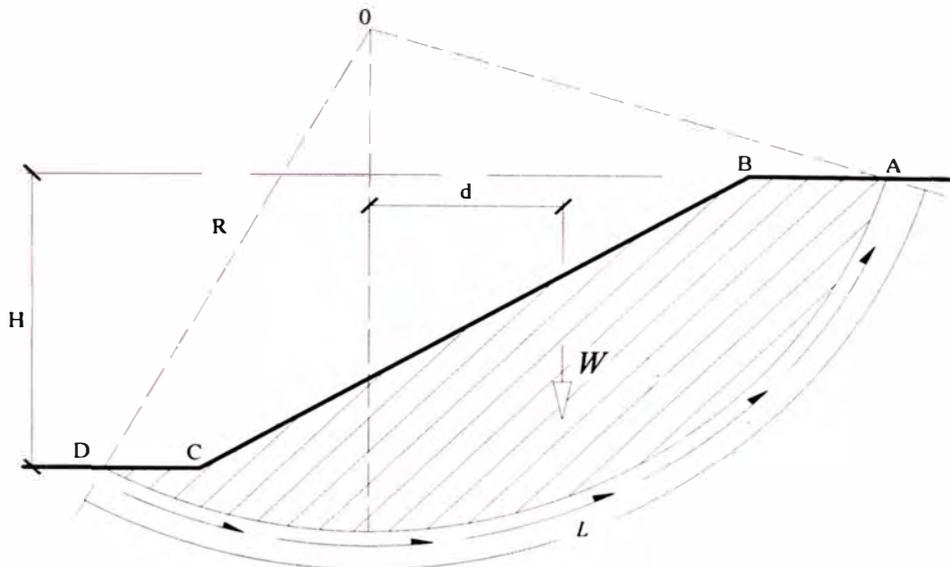


Fig. N° 1.4: Falla Rotacional: Caso 1

Las fuerzas actuantes, es decir, las que tienden a producir el deslizamiento, serán el peso  $W$  del área  $ABCD$ , más cualquier sobrecarga que pudiera actuar en la corona del talud. El peso  $W$  se calcula considerando un espesor de la sección unitario en la dirección normal al plano del papel.

El momento de las fuerzas motoras se expresa como:

$$Mm = \Sigma Wd$$

que incluye el peso de tierra más las sobrecargas que pudieran existir .

Las fuerzas resistentes las generará la resistencia al esfuerzo cortante a lo largo de toda la superficie de falla supuesta y su momento en relación al mismo polo  $O$  será:

$$Mr = c_u LR$$

En el instante de la falla incipiente,

$$Mm = Mr$$

y por lo tanto se podrá escribir para ese instante:

$$Wd = c_u LR$$

Si se define un factor de seguridad  $F_s$ , como

$$F_s = \frac{Mr}{Mm} = \frac{c_u LR}{Wd}$$

Se podrá expresar la seguridad del talud en términos del valor de  $F_s$ , siendo evidente que la condición de falla incipiente es  $F_s = 1$ .

Desde luego, no existe ninguna garantía de que el círculo escogido para efectuar el análisis sea el que conduce al factor de seguridad mínimo, por lo que el procedimiento anterior desembocará en un cálculo a base de tanteos, en el que se probará el número suficiente de círculos, hasta obtener una garantía razonable de haber encontrado el que produce el mínimo factor de seguridad susceptible de presentarse (círculo crítico); en este proceso de cálculo se analizarán tanto los círculos por el pie del talud como los correspondientes a falla de base, hasta garantizar la determinación del factor de seguridad mínimo en cualquier condición.

**Caso 2:  $\tau = c_u + \sigma \tan \phi_u$**

Se trata del caso de un análisis que se haga con esfuerzos totales para suelos situados sobre el nivel de aguas freáticas. En tales casos, se dispone en general de los parámetros de resistencia que se obtengan en una prueba sin consolidación y sin drenaje (triaxial rápida o una prueba de campo o laboratorio equivalente). Este es el método de las dovelas y fue propuesto por Fellenius.

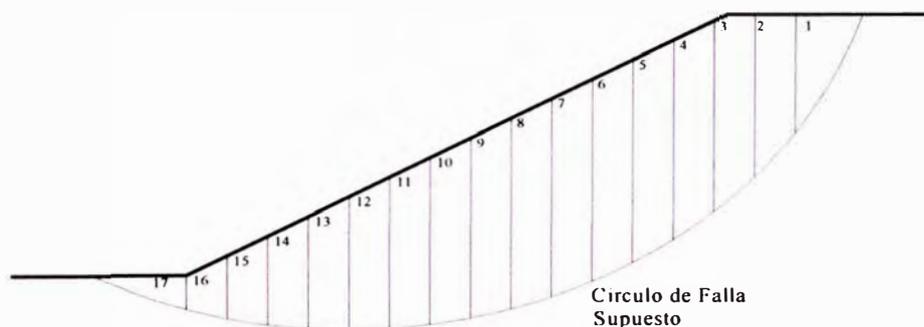


Fig. N° 1.5: Falla Rotacional: Caso 2

En primer lugar se propone un círculo de deslizamiento y la masa deslizante se divide en dovelas. Se analiza el conjunto de fuerzas que actúa en una dovela, cuando la masa deslizante está situada sobre el nivel freático y no se toma en cuenta fuerzas de agua en el análisis. Las fuerzas en cada dovela, al igual que las fuerzas actuantes en todo el conjunto de la masa deslizante, deben estar en equilibrio. Sin embargo, las fuerzas E y S, actuantes en los lados de las dovelas, dependen de las características de esfuerzo-deformación del material y no se pueden evaluar rigurosamente; para poder manejarlas es preciso hacer una hipótesis razonable sobre su valor.

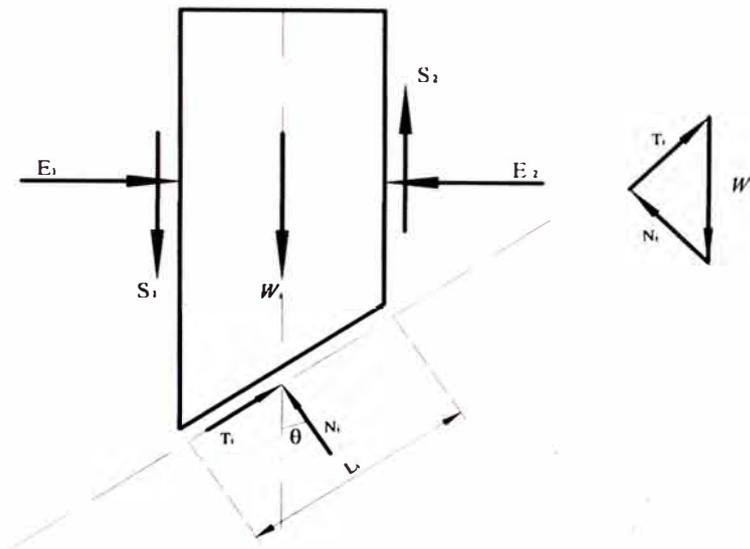


Fig. N° 1.6: Esquema de análisis para el caso 2.

La hipótesis más simple a este respecto es que el efecto conjunto de las cuatro fuerzas laterales es nulo y que, por lo tanto esas fuerzas no ejercen ningún papel en el análisis, de hecho ésta fue la hipótesis de Fellenius en el procedimiento de cálculo original que presentó, que equivale a considerar que cada dovela actúa independiente de las demás y que las componentes  $N_i$  y  $T_i$ , equilibran el peso  $W_i$  de la dovela  $i$ -ésima.

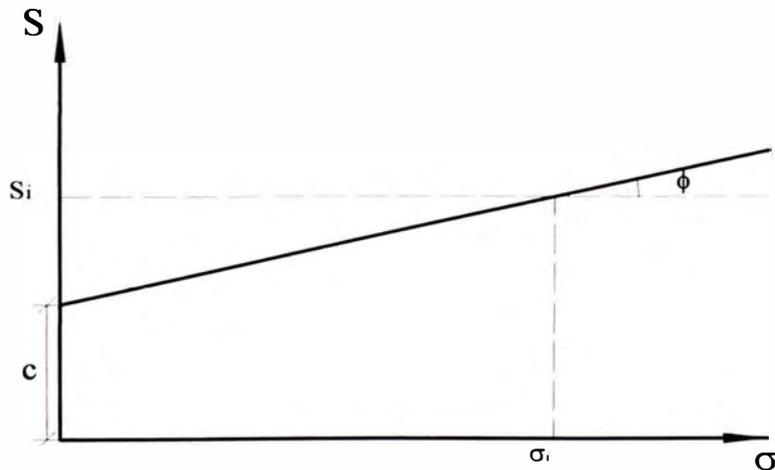


Fig. N° 1.7: Análisis de esfuerzos para el Caso 2

Para cada dovela se puede calcular el cociente de  $N_i$  y  $L_i$ , el cual se considera una buena aproximación al valor de  $\sigma_i$ , esfuerzo normal total medio actuante en la base de la dovela. Con este valor de  $\sigma_i$  puede entrarse a la ley de resistencia al esfuerzo cortante que se haya encontrado para el material (por lo general en este caso una ley ligada a los esfuerzos totales) y

determinar en ella el valor de  $s_i$ , resistencia al esfuerzo cortante media disponible en el arco  $L_i$ .

Ahora se puede calcular un momento motor en torno al punto 0, centro del círculo elegido para el análisis, correspondiente al peso de las dovelas; este momento será:

$$Mm = R \sum |T_i|$$

Nótese que la componente normal del peso de la dovela  $N_i$ , no da momento respecto a 0 por ser la superficie circular y pasar por 0 su línea de acción. Si hubiere sobrecargas en la corona del talud, su efecto se incluirá en la suma de la ecuación.

Nótese también que la suma es algebraica, pues para las dovelas situadas más allá de la vertical que pasa por 0, la componente del peso actúa en forma contraria, tendiendo a equilibrar la masa.

El momento resistente depende de la resistencia al esfuerzo cortante  $s_i$ , que se desarrolla en la base de las dovelas.

$$M_r = R \sum s_i L_i$$

que es una suma aritmética, pues la resistencia siempre actúa en el mismo sentido.

Calculados  $Mm$  y  $M_r$  se podrá definir un factor de seguridad:

$$F_s = \frac{M_r}{Mm} = \frac{\sum s_i L_i}{|T_i|}$$

El método de cálculo desemboca naturalmente en un método de tanteos, siendo preciso encontrar el círculo crítico, con el factor de seguridad mínimo. Se deberá analizar tanto los círculos de falla de pie del talud como los de falla de base.

### **Caso 3: $\tau' = c'_u + \sigma' \tan \phi'$**

Se trata del caso de un análisis que haya de hacerse con esfuerzos efectivos, para taludes situados total o parcialmente bajo el nivel freático o sometidos a una condición de flujo.

Este tipo de análisis habrá de efectuarse con base en esfuerzos efectivos, que se obtengan de una prueba triaxial con consolidación y con drenaje (lenta) o con consolidación y sin drenaje (rápida consolidada), que se realice con medición de presiones de poro en el plano de falla en el instante de falla.

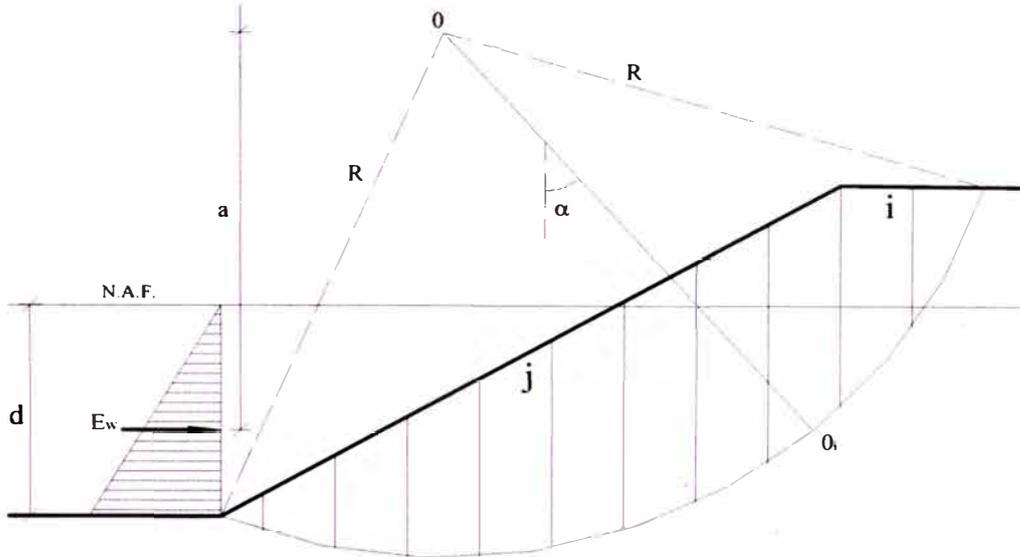


Fig. N° 1.8: Falla Rotacional: Caso 3

El procedimiento es muy similar al caso anterior, donde sólo cambian las consideraciones sobre las fuerzas que actúan sobre las dovelas.

En la figura se muestra un croquis general del talud, con una superficie circular de falla supuesta como uno de los tanteos que se deben efectuar. Se hace un análisis de las fuerzas actuantes en una dovela típica y finalmente, se presentan polígonos dinámicos correspondientes al equilibrio en esa dovela.

El piezómetro señalado en la figura indica que en añadidura a la parcial sumergida del material existe una presión neutral o por flujo en el punto  $O_i$ .

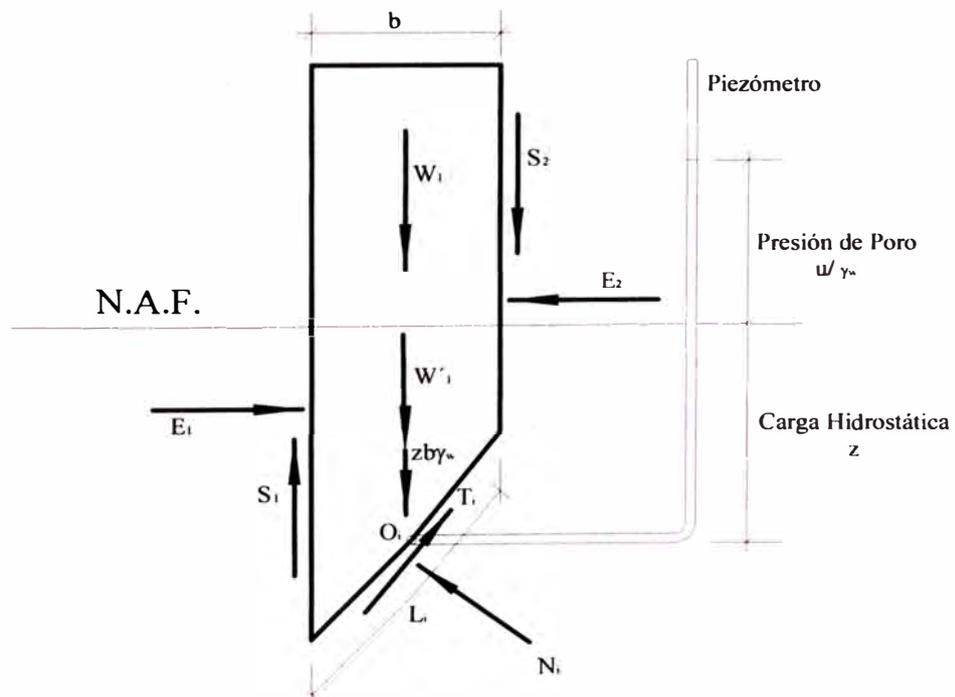


Fig. N° 1.9: Análisis de dovela para el Caso 3

- ✓ Un polígono de fuerzas donde se muestran la totalidad de las fuerzas que actúan en la dovela.

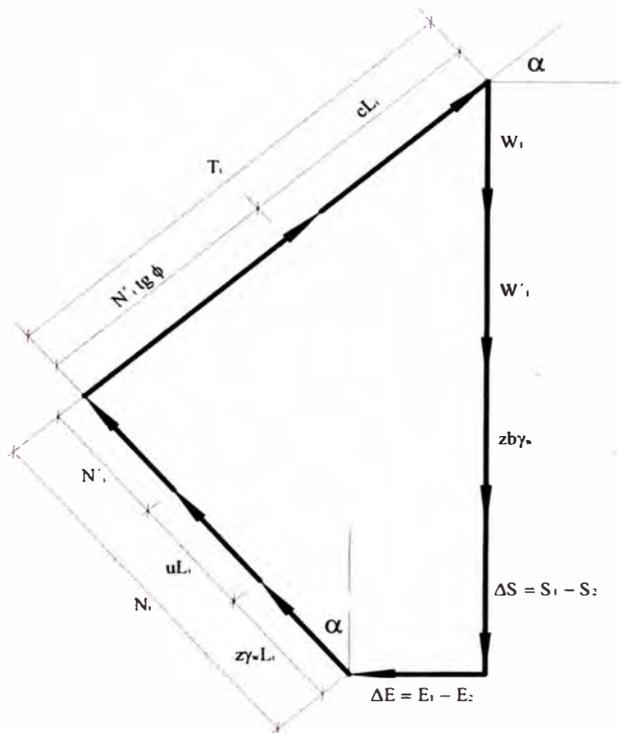


Fig. N° 1.10: Polígono de Fuerzas Totales para el Caso 3

- ✓ Un polígono de fuerzas donde E y S son nulas en las caras verticales de la dovela, como suele aceptarse en la versión original del método sueco establecido por Fellenius.

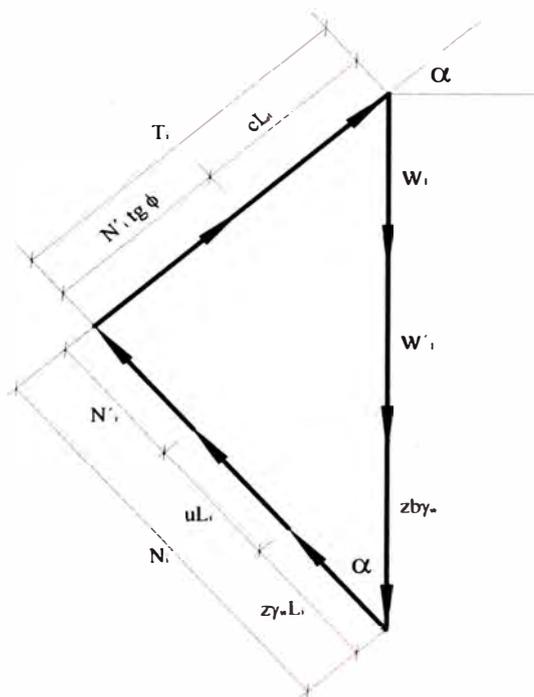


Fig. N° 1.11: Polígono de fuerzas donde E y S son nulas.

La fuerza actuante será el peso de la dovela que se podrá calcular con la expresión:

$$W = W_1 + W' + zb\gamma_w$$

$W_1$  corresponde a la parte de la dovela situada sobre el N.A.F. y se debe calcular con el  $\gamma_m$  del material.  $W'$  corresponde a la parte sumergida y se debe calcular con  $\gamma'_m$ . La componente  $zb\gamma_w$  representa el peso del agua incluido en la parte sumergida de la dovela. Si toda la dovela estuviera bajo agua, como la dovela  $j$  que se muestra en la figura, se debería considerar en el último término de la expresión el peso de toda el agua sobre ella.

La presión total del agua en  $O_i$  está dada por el piezómetro señalado y vale:

$$u_t = z\gamma_w + u$$

donde  $z\gamma_w$  es la presión hidrostática correspondiente a la posición del nivel freático y  $u$  es una presión neutral en exceso de la hidrostática, causada por ejemplo, por flujo.

Este exceso de presión se debe conocer para que sea posible efectuar el análisis, bien sea por medio de una red de flujo, por pruebas triaxiales o por mediciones de campo.

Si el NAF está colocado bajo  $O_i$ , la presión de poro en  $O_i$  es  $h\gamma_w$ , siendo  $h$  la altura a la cual subiría el agua en un piezómetro colocado en  $O_i$ . Si la presión de poro se debe a la capilaridad (tensión en el agua), se deberá considerar como negativa en todos los análisis que siguen.

El momento motor valdría:

$$Mm = \Sigma (W_1 + W' + zb\gamma_w) R \text{ sen } \alpha$$

pero como bajo el nivel freático el agua debe estar en equilibrio, se debe tener :

$$\Sigma zb\gamma_w R \text{ sen } \alpha = \frac{1}{2} \gamma_w d^2 a$$

donde el segundo miembro de la ecuación anterior representa el efecto del empuje hidrostático del agua al pie del talud.

Así en definitiva, el momento motor debe valer:

$$Mm = \Sigma (W_1 + W') R \text{ sen } \alpha = R \Sigma T'_i$$

de manera que el momento motor depende de lo que podría considerarse el peso efectivo de la dovela, cuya componente en la dirección del deslizamiento se denomina  $T'_i$ .

El momento resistente dependerá de la resistencia al esfuerzo cortante que realmente se desarrolle en la base de la dovela. Dicha resistencia se

podrá calcular si se multiplica el peso total por  $\cos\alpha$ , lo cual proporcionará la fuerza normal total  $N_i$ . Dicho valor de  $N_i$  dividido entre  $L_i$  proporcionará la presión normal total en la base de la dovela,  $\sigma_i$ .

Es evidente que la presión normal efectiva,  $\sigma'_i$  será:

$$\sigma'_i = \sigma_i - Z \gamma_w - u = \sigma_i - u_r$$

Valor con el cual habrá que entrar en la envolvente de resistencia al esfuerzo cortante con base en esfuerzos efectivo, para obtener  $s'_i$ , resistencia al esfuerzo cortante a considerar en la base de la dovela.

El momento resistente valdrá por lo tanto:

$$Mr = \sum s'_i L_i R$$

el factor de seguridad al círculo será:

$$Fs = \frac{\sum s'_i L_i}{\sum T_i}$$

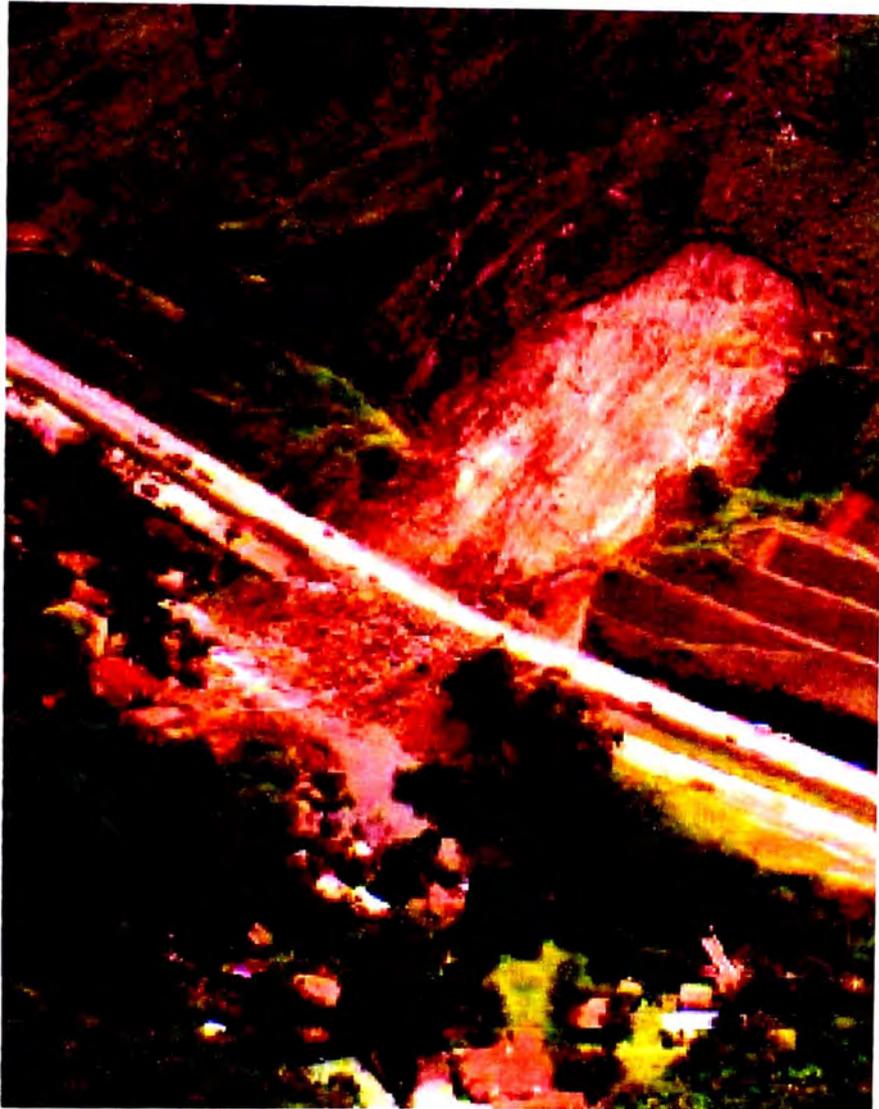
Por lo demás habrá que realizar un procedimiento de tanteos para llegar a determinar el círculo crítico ligado al factor de seguridad mínimo.

### 1.3 Degradación de Taludes

Según plantea Jaime Suárez Díaz (6) un talud durante su vida útil se ve degradado por factores diversos que afectan su estabilidad. Si estos factores no son controlados pueden llegar a provocar la falla y colapso del talud.

La falla en la estabilidad de un talud produce un deslizamiento, en el cual una parte determinada de la superficie del terreno se destaca del conjunto y se desplaza hasta una cota inferior a la original. Estos son procesos netamente gravitatorios, interviniendo básicamente dos grupos de fuerzas: las resistentes del terreno y las desestabilizadoras. En el proceso de falla de un talud, se puede observar estas etapas:

- *Etapa de deterioro* o antes de la falla donde el suelo es esencialmente intacto (proceso erosivo).
- *Etapa de falla* caracterizada por la formación de una superficie de falla o el movimiento de una masa importante de material.
- *La etapa post-falla* que incluye los movimientos de la masa involucrada en un deslizamiento desde el momento de la falla y hasta el preciso instante en el cual se detiene totalmente.
- *La etapa de posible reactivación* en la cual pueden ocurrir movimientos que pueden considerarse como un nuevo proceso de falla.



*Imagen N° 1.01: Deslizamiento ocurrido en Brasil, 1996 – Imagen publicada en la Conferencia Internacional de Ingeniería Geotécnica y Sísmica (1)*

Dentro de la etapa de deterioro de un talud podemos distinguir como principal causa la erosión superficial del talud y en la etapa de falla como principal acción el movimiento de masa del talud, ambas acciones se encuentran relacionadas y son las principales causas de la degradación de un talud.

Estos procesos se vuelven a repetir, durante la etapa post falla, en menor escala; hasta que el talud quede estabilizado o en equilibrio. Durante la etapa de posible reactivación, estos procesos se vuelven a repetir dando nuevamente origen al ciclo de deslizamientos. Luego, es necesario conocer la naturaleza de ambos procesos de degradación de taludes, para poder analizar sus posibles soluciones o en nuestro caso plantear una solución de bioingeniería.



Imagen N° 1.02: Deslizamiento por saturación – Santa María del Valle, Huanuco 2006

En la siguiente tabla presentamos un resumen ambos procesos de degradación de taludes y sus respectivas soluciones propuestas en bioingeniería:

### Degradación de Taludes

<b>Características</b>	<b>Erosión Superficial</b>	<b>Movimiento de Masa</b>
<i>Proceso</i>	Separación y Transporte de Sedimentos.	Movimiento de masa de Suelos, Superficie de Falla
<i>Modelo Físico</i>	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)	Modelo de Bishop y otros.
<i>Propiedad más importante</i>	Erodibilidad	Resistencia al corte
<i>Rol de Protección</i>	Intercepción, represamiento, infiltración.	Refuerzo, extracción de humedad.
<i>Vegetación más Efectiva</i>	Herbáceas: Grass y plantas densas con raíces densas próximas a la superficie.	Leñosos: Arbustos y árboles fuertes, raíces profundas y con alto radio de alcance.

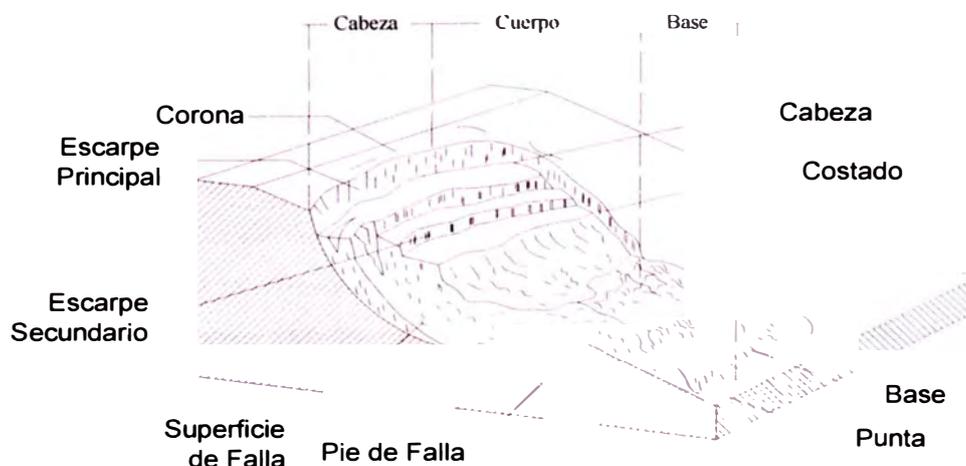
Tabla N°1.1: Procesos de Degradación en Taludes



Imagen N° 1.03: Deslizamiento por falla interna – Imagen publicada en el II Simposio Internacional de Geotecnia y Medio Ambiente (2)

### 1.3.1 Movimientos en Masa

Los procesos geotécnicos activos de los taludes y laderas corresponden generalmente, a movimientos hacia abajo y hacia afuera de los materiales que conforman un talud de roca, suelo natural o relleno, o una combinación de ellos. Los movimientos ocurren generalmente, a lo largo de superficies de falla, por caída libre, movimientos de masa, erosión o flujos. Algunos segmentos del talud o ladera pueden moverse hacia arriba, mientras que a otros se mueven hacia abajo.



NOMENCLATURA DE UN DESLIZAMIENTO

Fig. N° 1.12: Esquema de un Deslizamiento

En la figura se muestra un deslizamiento o movimiento en masa típico, con sus diversas partes cuya nomenclatura es la siguiente:

- *Escarpe principal*: Corresponde a una superficie muy inclinada a lo largo de la periferia del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material fuera del terreno original. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material forma la superficie de falla.
- *Escarpe secundario*: Una superficie muy inclinada producida por desplazamientos diferenciales dentro de la masa que se mueve.
- *Cabeza*: Las partes superiores del material que se mueve a lo largo del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- *Cima*: El punto más alto del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- *Corona*: El material que se encuentra en el sitio, prácticamente inalterado y adyacente a la parte más alta del escarpe principal.
- *Superficie de falla*: Corresponde al área debajo del movimiento que delimita el volumen de material desplazado. El volumen de suelo debajo de la superficie de falla no se mueve.
- *Pie de la superficie de falla*: La línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.
- *Base*: El área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.
- *Punta o uña*: El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.
- *Costado o flanco*: Un lado (perfil lateral) del movimiento.
- *Superficie original del terreno*: La superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.
- *Derecha e izquierda*: Para describir un deslizamiento se prefiere usar la orientación geográfica, pero si se emplean las palabras derecha e izquierda debe referirse al deslizamiento observado desde la corona mirando hacia el pie.

El volumen de material medido antes del deslizamiento generalmente, aumenta con el movimiento debido a que el material se dilata. El término "Factor de expansión" puede ser utilizado para describir este aumento en volumen, como un porcentaje del volumen antes del movimiento. En algunas ocasiones, como en el caso de roca, el factor de expansión puede ser hasta de un 70%.

### **Clasificación de los Movimientos de Masa**

Según Jaime Suárez Díaz (6), clasifica los movimientos de masa, utilizando la clasificación presentada por Varnes (1978):

- **Caído:** En los caídos una masa de cualquier tamaño se desprende de un talud de pendiente fuerte, a lo largo de una superficie, en la cual ocurre ningún o muy poco desplazamiento de corte y desciende principalmente, a través del aire por caída libre, a saltos o rodando. El movimiento es muy rápido a extremadamente rápido y puede o no, ser precedido de movimientos menores que conduzcan a la separación progresiva o inclinación del bloque o masa de material. La observación muestra que los movimientos tienden a comportarse como caídos de caída libre cuando la pendiente superficial es de más de 75 grados. En taludes de ángulo menor generalmente, los materiales rebotan y en los taludes de menos de 45 grados los materiales tienden a rodar. Los "caídos de roca" corresponden a bloques de roca relativamente sana, los caídos de residuos o detritos están compuestos por fragmentos de materiales pétreos y los caídos de tierra corresponden a materiales compuestos de partículas pequeñas de suelo o masas blandas.
- **Inclinación o Volteo:** Este tipo de movimiento consiste en una rotación hacia adelante de una unidad o unidades de material térreo con centro de giro por debajo del centro de gravedad de la unidad y generalmente, ocurren en las formaciones rocosas. Las fuerzas que lo producen son generadas por las unidades adyacentes, el agua en las grietas o juntas, expansiones y los movimientos sísmicos. La inclinación puede abarcar zonas muy pequeñas o incluir volúmenes de varios millones de metros

cúbicos. Dependiendo de las características geométricas y de estructura geológica, la inclinación puede o no terminar en caídos o en derrumbes. Las inclinaciones pueden variar de extremadamente lentas a extremadamente rápidas. Las características de la estructura de la formación geológica determinan la forma de ocurrencia de la inclinación.

- **Reptación:** La reptación consiste en movimientos muy lentos a extremadamente lentos del suelo subsuperficial sin una superficie de falla definida. Generalmente, el movimiento es de unos pocos centímetros al año y afecta a grandes áreas de terreno. Se le atribuye a las alteraciones climáticas relacionadas con los procesos de humedecimiento y secado en suelos, usualmente, muy blandos o alterados. La reptación puede preceder a movimientos más rápidos como los flujos o deslizamientos.
- **Deslizamiento:** Este movimiento consiste en un desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies, que pueden detectarse fácilmente o dentro de una zona relativamente delgada. El movimiento puede ser progresivo, o sea que no se inicia simultáneamente a lo largo de toda la superficie de falla. Los deslizamientos pueden ser de una sola masa que se mueve o pueden comprender varias unidades o masas semi-independientes. Los deslizamientos pueden obedecer a procesos naturales o a desestabilización de masas de tierra por el efecto de cortes, rellenos, deforestación, etc. Los deslizamientos se pueden a su vez dividir en dos subtipos denominados deslizamientos rotacionales y translacionales o planares. Esta diferenciación es importante porque puede definir el sistema de análisis y estabilización a emplearse.
  - *Deslizamiento Rotacional:* En un deslizamiento rotacional la superficie de falla es formada por una curva cuyo centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento. Visto en planta el deslizamiento posee una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento. El movimiento produce un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento generándose

comúnmente, flujos de materiales por debajo del pie del deslizamiento. En muchos deslizamientos rotacionales se forma una superficie cóncava en forma de "cuchara". Generalmente, el escarpe debajo de la corona tiende a ser semi vertical, lo cual facilita la ocurrencia de movimientos retrogresivos. El movimiento aunque es curvilíneo no es necesariamente circular, lo cual es común en materiales residuales donde la resistencia al corte de los materiales aumenta con la profundidad. En la cabeza del movimiento, el desplazamiento es aparentemente semi vertical y tiene muy poca rotación, sin embargo se puede observar que generalmente, la superficie original del terreno gira en dirección de la corona del talud, aunque otros bloques giren en la dirección opuesta. Los deslizamientos rotacionales en suelos generalmente tienen una relación  $D_r/L_r$  entre 0.15 y 0.33. Frecuentemente la forma y localización de la superficie de falla está influenciada por las discontinuidades, juntas y planos de estratificación. El efecto de estas discontinuidades debe tenerse muy en cuenta en el momento que se haga el análisis de estabilidad. Los deslizamientos estrictamente rotacionales ocurren usualmente, en suelos homogéneos, sean naturales o artificiales y por su facilidad de análisis son el tipo de deslizamiento más estudiado en la literatura. En zonas tropicales este tipo de suelos no es común y cuando existe rotación, la superficie de falla es usualmente curva pero no circular; Sin embargo, en zonas de meteorización muy profunda y en rellenos de altura significativa algunas superficies de falla pueden asimilarse a círculos. Dentro del deslizamiento comúnmente, ocurren otros desplazamientos curvos que forman escarpes secundarios y ocasionalmente ocurren varios deslizamientos sucesivos en su origen pero que conforman una zona de deslizamientos rotacionales independientes.

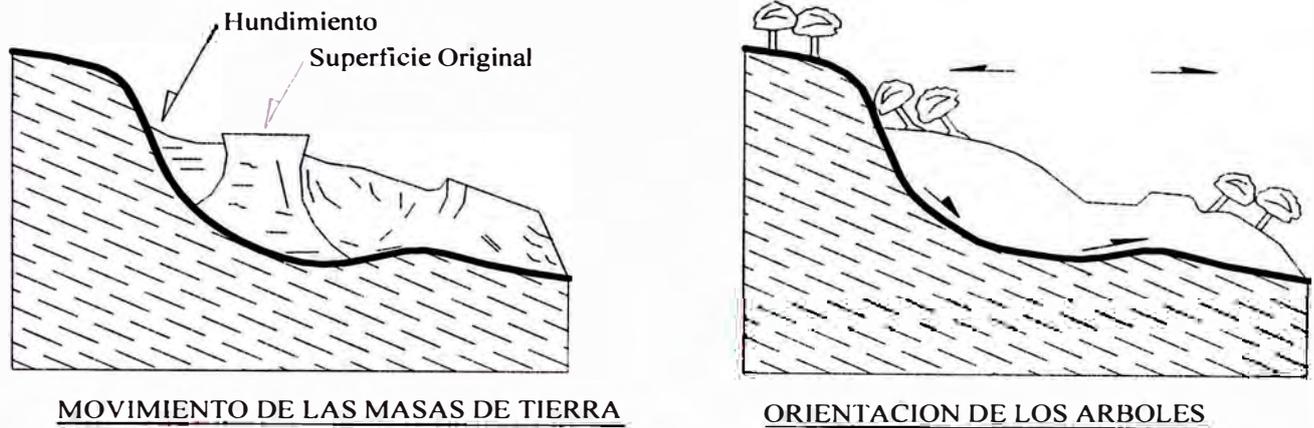


Fig. N° 1.13: Esquema de un Deslizamiento Rotacional

- **Deslizamiento de Traslación:** En el deslizamiento de traslación el movimiento de la masa se desplaza hacia fuera o hacia abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana o ligeramente ondulada y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo. La diferencia importante entre los movimientos de rotación y traslación está principalmente, en la aplicabilidad o no de los diversos sistemas de estabilización. Sin embargo, un movimiento de rotación trata de auto estabilizarse, mientras uno de traslación puede progresar indefinidamente a lo largo de la ladera hacia abajo. Los movimientos de traslación son comúnmente controlados por superficies de debilidad tales como fallas, juntas, fracturas, planos de estratificación y zonas de cambio de estado de meteorización que corresponden en términos cuantitativos a cambios en la resistencia al corte de los materiales o por el contacto entre la roca y materiales blandos o coluviones. En muchos deslizamientos de traslación la masa se deforma y/o rompe y puede convertirse en flujo. Los deslizamientos sobre discontinuidades sencillas en roca se les denomina deslizamientos de bloque, cuando ocurren a lo largo de dos discontinuidades se le conoce como deslizamiento de cuña y cuando se presentan sobre varios niveles de una familia de discontinuidades se le puede denominar falla en escalera.

## DESLIZAMIENTO DE TRANSLACION

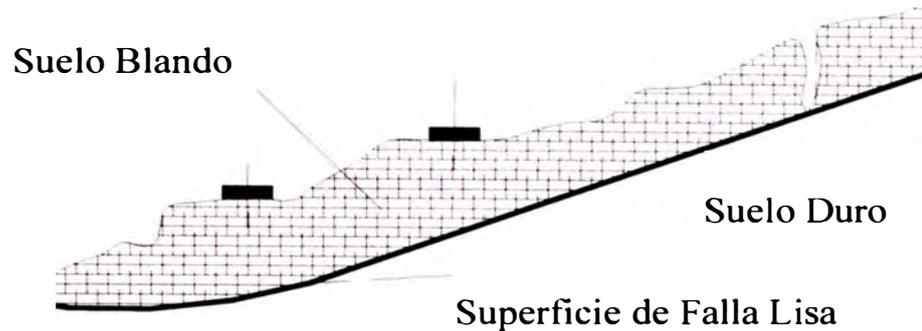


Fig. N° 1.14: Esquema de un Deslizamiento de Translación

- **Esparcimiento Lateral:** El modo de movimiento dominante es la extensión lateral acomodada por fracturas de corte y tensión. El mecanismo de falla puede incluir elementos no solo de rotación y translación sino también de flujo. Generalmente, los movimientos son complejos y difíciles de caracterizar. La razón de movimiento es por lo general extremadamente lenta. Los esparcimientos laterales pueden ocurrir en masas de roca sobre suelos plásticos y también se forman en suelos finos, tales como arcillas y limos sensibles que pierden gran parte de su resistencia al remodelarse. La falla es generalmente progresiva, o sea, que se inicia en un área local y se extiende. Los esparcimientos laterales son muy comunes en sedimentos glaciales y marinos pero no lo son en zonas de suelos tropicales residuales.
- **Flujo:** En un flujo existen movimientos relativos de las partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla. Los flujos pueden ser lentos o rápidos, así como secos o húmedos y los puede haber de roca, de residuos o de suelo o tierra. Los flujos muy lentos o extremadamente lentos pueden asimilarse en ocasiones, a los fenómenos de reptación y la diferencia consiste en que en los flujos existe una superficie fácilmente identificable de separación entre el material que se mueve y el subyacente, mientras en la reptación la velocidad del movimiento disminuye al profundizarse en el perfil,

sin que exista una superficie definida de rotura. La ocurrencia de flujos está generalmente, relacionada con la saturación de los materiales sub superficiales. Algunos suelos absorben agua muy fácilmente cuando son alterados, fracturados o agrietados por un deslizamiento inicial y esta saturación conduce a la formación de un flujo. Algunos flujos pueden resultar de la alteración de suelos muy sensibles tales como sedimentos no consolidados. Tenemos los siguientes tipos de flujos:

- *Flujo en roca*: Los movimientos de flujo en roca comprenden las deformaciones que se distribuyen a lo largo de muchas fracturas grandes y pequeñas. La distribución de velocidades puede simular la de líquidos viscosos. Este tipo de movimiento ocurre con mucha frecuencia en zonas tropicales de alta montaña y poca vegetación, especialmente en la cordillera de los Andes. Se observa la relación de estos flujos con perfiles de meteorización poco profundos en los cuales las fallas están generalmente, relacionadas con cambios de esfuerzos y lixiviación, ocasionados por la filtración momentánea del agua en las primeras horas después de una lluvia fuerte. Las pendientes de estos taludes son comúnmente muy empinadas (más de 45°). Estos flujos tienden a ser ligeramente húmedos y su velocidad tiende a ser rápida a muy rápida.
- *Flujo de residuos (Detritos)*: Por lo general, un flujo de rocas termina en uno de residuos. Los materiales se van triturando por el mismo proceso de flujo y se puede observar una diferencia importante de tamaños entre la cabeza y el pie del movimiento. El movimiento de los flujos de detritos puede ser activado por las lluvias, debido a la pérdida de resistencia por la disminución de la succión al saturarse el material o por el desarrollo de fuerzas debidas al movimiento del agua subterránea. Los daños causados por los flujos de detritos abarcan áreas relativamente grandes. El flujo típico de detritos es una onda larga de materiales sólidos y líquidos entremezclados, que se mueve en forma constante a través de

un canal con algunas ondas menores súper impuestas que se mueven a velocidades superiores a aquellas del flujo mismo.

- **Flujo de suelo:** Los flujos de suelo también pueden ser secos y más lentos de acuerdo a la humedad y pendiente de la zona de ocurrencia. En zonas de alta montaña y desérticas ocurren flujos muy secos, por lo general pequeños pero de velocidades altas.
- **Flujos de lodo:** Dentro de los flujos de tierra están los “flujos de lodo”, en los cuales los materiales de suelo son muy finos y las humedades muy altas y ya se puede hablar de viscosidad propiamente dicha, llegándose al punto de suelos suspendidos en agua. Los flujos de lodo poseen fuerzas destructoras grandes que dependen de su caudal y velocidad. Un flujo de lodo posee tres unidades morfológicas: un origen que generalmente es un deslizamiento, un camino o canal de flujo y finalmente una zona de acumulación. El origen consiste en una serie de escarpes de falla o deslizamientos de rotación o translación, el camino o canal es generalmente un área estrecha, recta o una serie de canales a través del cual fluye el material viscoso, el ancho, profundidad y pendiente del camino del flujo varía de acuerdo a las condiciones topográficas y morfológicas. La zona de acumulación es generalmente, un área de menor pendiente en la cual el flujo pierde velocidad y forma un abanico de depositación.
- **Avalancha:** En las avalanchas la falla progresiva es muy rápida y el flujo desciende formando una especie de “ríos de roca y suelo”. Estos flujos comúnmente se relacionan con lluvias ocasionales de índices pluviométricos excepcionales muy altos, deshielo de nevados o movimientos sísmicos en zonas de alta montaña y la ausencia de vegetación, aunque es un factor influyente, no es un prerequisite para que ocurran. Las avalanchas son generadas a partir de un gran aporte de materiales de uno o varios deslizamientos o flujos combinados con un volumen importante de agua, los cuales forman una masa de comportamiento de líquido

viscoso que puede lograr velocidades muy altas con un gran poder destructivo y que corresponden generalmente, a fenómenos regionales dentro de una cuenca de drenaje. Las avalanchas pueden alcanzar velocidades de más de 50 metros por segundo en algunos casos. El movimiento de las avalanchas se le puede relacionar con “flujo turbulento de granos”.

- **Movimientos Complejos:** Con mucha frecuencia los movimientos de un talud incluyen una combinación de dos o más de los principales tipos de desplazamiento descritos anteriormente, este tipo de movimientos se les denomina como “Complejo”. Adicionalmente, un tipo de proceso activo puede convertirse en otro a medida que progresa el fenómeno de desintegración; es así como una inclinación puede terminar en caído o un deslizamiento en flujo.

### 1.3.2 Erosión en Taludes.

Tal como lo define R.P.C. Morgan (12), la erosión es un fenómeno complejo que básicamente consiste en la disgregación o meteorización de un suelo o de un material rocoso por la acción de los agentes atmosféricos, y la posterior denudación por arrastre de las partículas disgregadas. Erosión etimológicamente proviene del verbo latino *erodere* que significa roer.

En breve puede decirse que la erosión es el resultado de la acción de fuerzas de fricción de gases o fluidos en movimiento, que cuando superan las fuerzas cohesivas del suelo producen su desprendimiento y transporte debilitándolo así.

La recuperación del suelo perdido como consecuencia de los procesos erosivos, mediante formación natural de suelo nuevo a partir de la roca madre, es lentísimo, calculándose que para formar, en condiciones naturales una capa de 2 a 3 cm de espesor son necesarios de 300 a 1000 años. Por medio de operaciones agrícolas puede acortarse ese periodo, siendo necesarios de 15 a 25 años para que, con las labores y correspondientes procesos edáficos, se forme una capa de 1 cm de espesor de suelo nuevo.

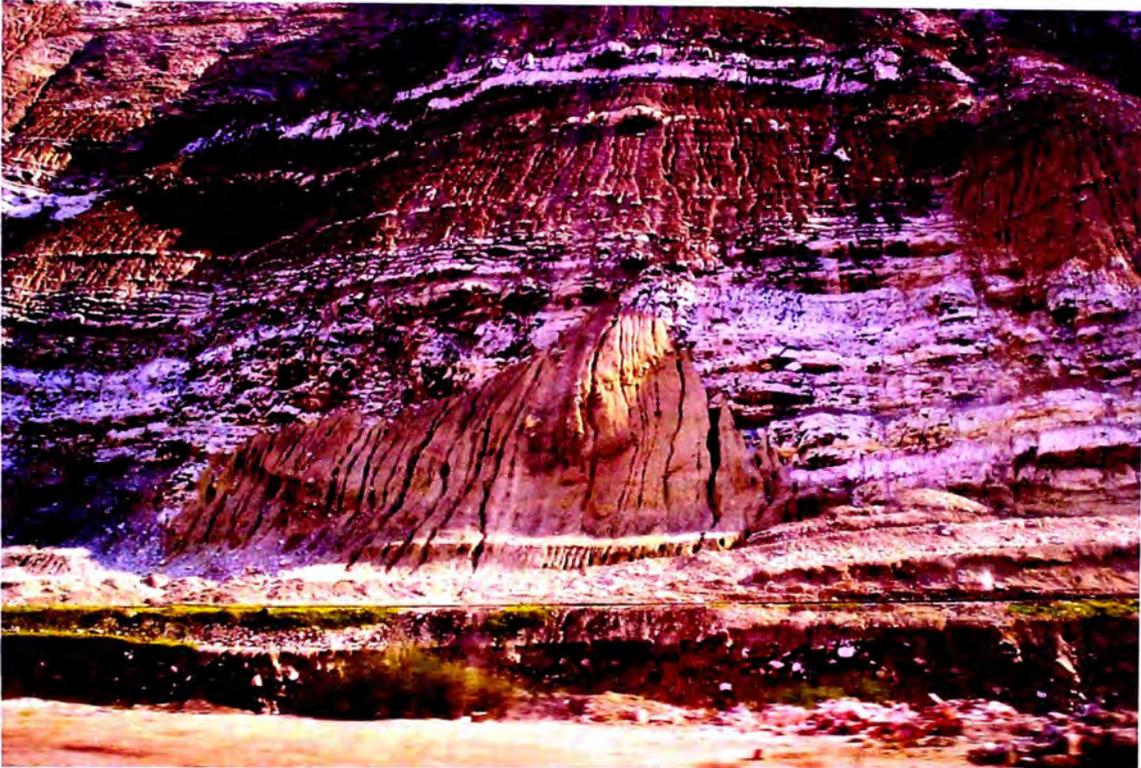


Imagen N° 1.04: Procesos erosivos en superficies desnudas (La Oroya – Junín 2006).

### **Tipos de Erosión**

Según se conoce, los diferentes tipos de erosión, pueden agruparse en siete categorías: erosión hídrica, erosión eólica, erosión fluvial, erosión marina y litoral, erosión glacial, erosión peri glacial y erosión cárstica. A menor escala, los tipos de erosión que cobran importancia son la erosión eólica y la erosión hídrica:

#### **Erosión Hídrica**

Es aquella en la que los procesos de disgregación de la roca o suelo, y de denudación y transporte, son efectuados por el agua. Su puede diferenciar cuatro modalidades:

*Erosión por gotas de lluvia:* Este tipo de erosión se presenta por el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo, que desprenden el suelo y lo transportan por escorrentía, se calcula que una gota de lluvia reparte partículas de suelo en un área aproximada de 1 m<sup>2</sup>, en lluvias de consideración en un suelo sin vegetación, puede llegarse a remover hasta 50 m<sup>3</sup> de éste durante una hora. La erosión por lluvia depende principalmente de la intensidad y duración de la lluvia, según

el tamaño de la pendiente la erosión puede llegar a ser laminar o por surcos.

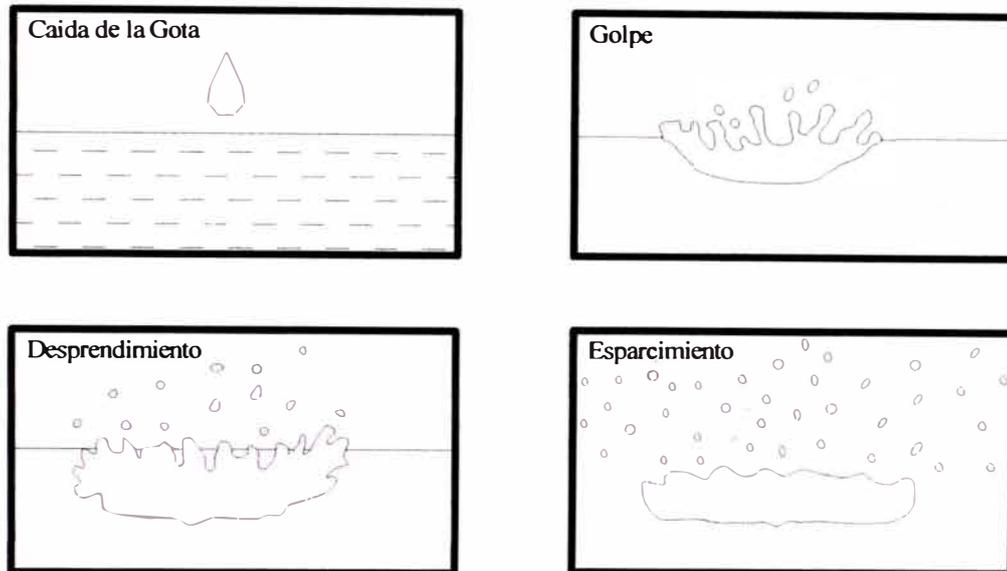


Fig. N° 1.15: Esquema de Erosión por Gotas de Lluvias

**Erosión Laminar:** Esta es el resultado del desprendimiento de capas de suelo superficiales a causa de la escorrentía, debido a que cuando llueve una parte del agua se infiltra y la otra se acumula en la superficie formando una capa de agua que fluye, cuando este flujo se hace turbulento es cuando presenta la mayor erosión, además en la parte baja del talud la erosión también aumenta debido que allí se presenta una mayor acumulación de agua y ésta llega con mayor velocidad. Este tipo de erosión es común en suelos sin vegetación y expuestos al sobre pastoreo de animales.

**Erosión en Surcos:** Esta se genera cuando en terrenos irregulares se producen flujos de agua superficial, esta corriente es la que causa la erosión formando pequeños canales o surcos que en un principio pueden parecer despreciables o ser imperceptibles, pero con el paso del tiempo y el agua crecen. Aquí el agua adquiere gran cantidad de energía lo que le proporciona un mayor poder erosivo. Dentro de los surcos el agua presenta un grado alto de turbulencia lo que le permite erosionar partículas de tamaño considerable. Los surcos son la mayor fuente de producción de sedimentos en el planeta, el mas alto porcentaje de sedimentos transportados por erosión se hace a través

de surcos. Esto es común en suelos con poca vegetación o raíces poco densas, o a lo largo de grietas o cavernas de animales.

**Erosión en Cárcavas:** Las cárcavas se pueden formar por distintas causas, una de las mas comunes es cuando se amplían y profundizan los surcos de erosión, o cuando hay un conjunto de ellos y se unen. Para que uno de esos canales pueda ser catalogado como una cárcava su sección transversal debe de ser mayor o igual a  $1\text{pie}^2$ .

Las zonas más susceptibles son

- Cuando tienen una topografía con alta pendiente y mantos de suelo de gran espesor.
- Mesetas semi planas que recogen gran cantidad de agua de escorrentía.
- Suelos dispersivos o altamente erosionables.



Fig. N° 1.16: Gráfico de la Formación de Cárcavas – Gráfico Proyecto JALDAS (11)

Cuando se trata de suelos expansivos habrá mas probabilidad que se produzcan cárcavas si continuamente el terreno está expuesto a cambios bruscos de temperatura (Sol y lluvia). La parte más crítica es la superficie del terreno en la parte alta del talud, por debajo de las raíces de la vegetación. Si en la formación de la cárcava se encuentra un suelo duro que el proceso erosivo no puede arrastrar o roca, lo

que ocurrirá será que se forman gradas y la cárcava va avanzando en cada nivel (11).



*Imagen N° 1.05: Cárcavas terminan conformando quebradas profundas  
(Torre Torre – Huancayo).*

El proceso de formación de las cárcavas se divide en cuatro frentes principales:

- Profundización del fondo de la cárcava; el fondo se va erosionando hasta llegar a un estrato resistente o hasta que llegue a una pendiente de equilibrio.
- Avance lateral; a medida que se da la profundización de la cárcava, las paredes laterales se vuelven inestables y se produce una ampliación lateral de la cárcava.
- Avance de la cabeza de la cárcava; cuando más se acentúe la profundización del fondo y lateral de la cárcava, más rápido será el desarrollo de ésta.
- Cambios bruscos de topografía hacen que en algunos tramos la corriente de agua se acelere, produciendo procesos de erosión locales que agudizan el problema.

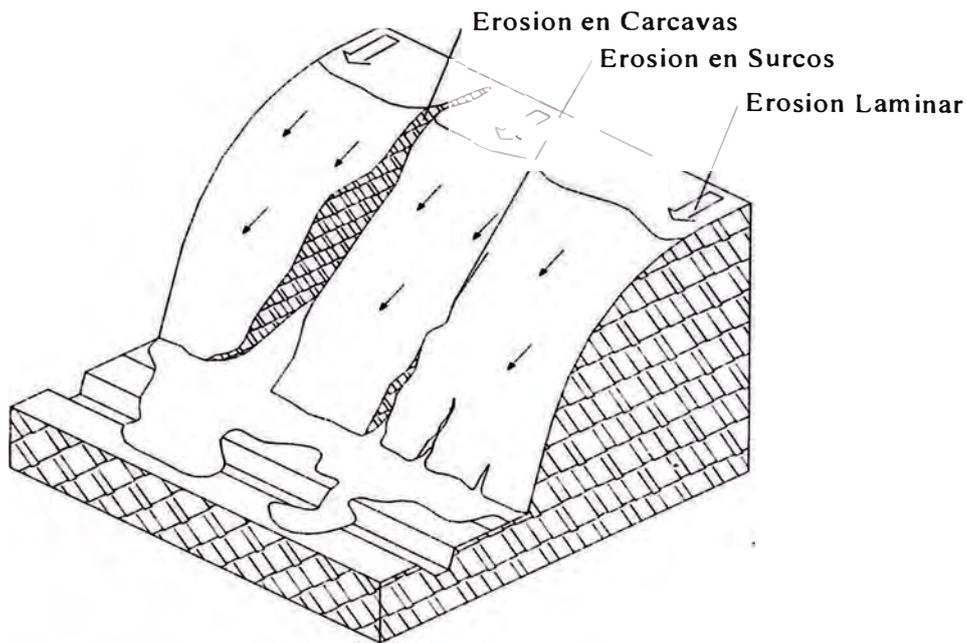


Fig. N° 1.17: Tipos de Erosión Hídrica

### **Erosión Eólica**

Esta generalmente se presenta cuando suelos sin vegetación se exponen al viento que circula a altas velocidades, cuando la fuerza que genera el viento es superior a las fuerzas gravitacionales y a las de cohesión del propio suelo, se produce su desprendimiento y arrastre. Para partículas finas el transporte se hace en suspensión, para tamaños aproximados de 0.1 a 0.5 mm el transporte se presenta en forma de saltos, cuando las partículas son de un tamaño mayor a estos, se mueven rodando.

En la erosión por viento se presentan 3 fases:

- ✓ *Desprendimiento*: Cuando se genera turbulencia en el viento debido a su velocidad se inicia el movimiento de las partículas, aproximadamente a una velocidad de 20 km/h.
- ✓ *Transporte*: Una vez desprendidas las partículas, la velocidad que se requiere para su transporte es menor, y estas generalmente viajan a bajas alturas, no mayores de 1 m.
- ✓ *Deposición*: cuando la velocidad del viento disminuye o cuando se presenta alguna barrera las partículas se sedimentan

Para el caso de erosión por viento la longitud y pendiente tienen poca influencia, siendo más relevantes la humedad y temperatura del suelo, ya que la erosión por viento solo se presenta en suelos secos.

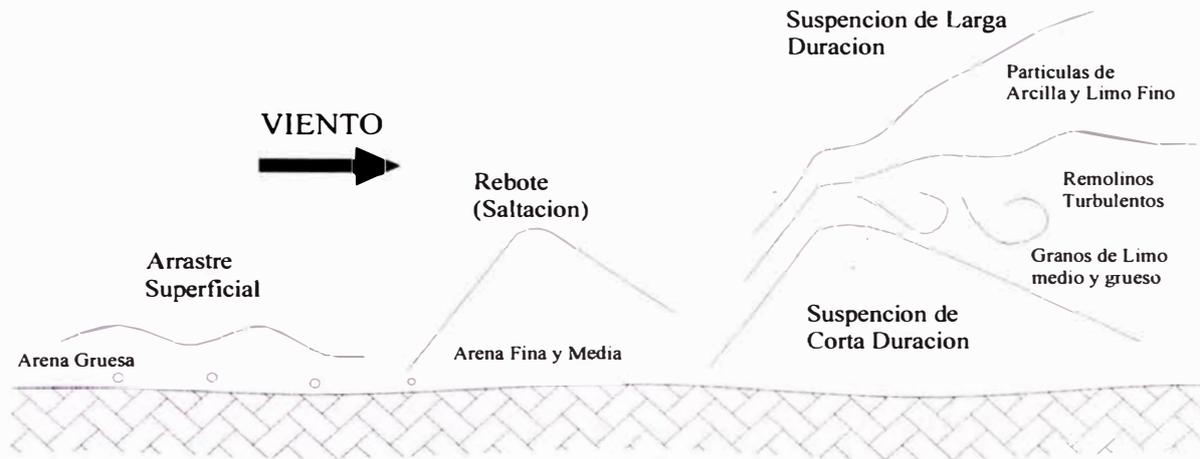


Fig. N° 1.18: Principales Formas de Transporte Eólico de Sedimentos

### Factores Erosivos

Según la definición dada por Guillermo Llopis Trujillo (3) al nivel general de la superficie terrestre, los factores que en última instancia determinan la erosión son climáticos y geológicos. De ellos se derivan otros factores que pueden ser tectónicos, litológicos, edafológicos, geomorfológicos e incluso antrópicos, que en conjunto forman un entramado complejo, interdependiente y variable a lo largo del tiempo.

A la escala reducida de un talud, y a corto plazo, los factores que controlan la erosión son:

**Erosividad:** se define como la capacidad potencial para provocar la erosión. Es función de las características físicas de la lluvia y del viento y es independiente de la erosionabilidad, pero una medida cuantitativa de la misma sólo puede efectuarse cuando tiene lugar la erosión.

**Erosionabilidad:** se define como la susceptibilidad o vulnerabilidad de una formación edáfica o rocosa a la erosión. Es función tanto de las características del suelo o roca como del relieve y la vegetación de

cobertura, similarmente no está influenciado por la lluvia o por el viento, pero sólo pueden medirse cuando la lluvia o el viento, con una determinada erosividad, los pone de manifiesto.

La erosionabilidad es una medida bastante complicada, ya que depende de numerosas variables. En formaciones rocosas, la erosión hídrica se muestra más severa sobre rocas poco consolidadas o cementadas que sobre rocas competentes.

En el caso de formaciones edáficas, la erosionabilidad de un suelo depende de la textura, de la estructura, de la resistencia al esfuerzo cortante, de la capacidad de infiltración y de los contenidos minerales y orgánicos.

Luego, son más erosionables superficies que presentan deficiencias en los factores citados, tales como suelos con baja infiltración, de baja resistencia al corte, con ausencia de contenidos minerales y orgánicos, con alto contenido de finos, etc.

Dentro de este concepto, los tipos de suelo (según la clasificación SUCS) propensos a la erosión se pueden ordenar según el cuadro siguiente:

Símbolo	Descripción	Erosionabilidad
GW	Grava bien graduada, con pocos o sin finos	Menos
GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena.	EROSIONABLE
SW	Arenas bien graduadas, arenas con gravas.	
GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo.	
CH	Arcillas inorgánicas muy plásticas.	
CL	Arcillas inorgánicas poco plásticas.	
OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas poco plásticas.	
MH	Limos orgánicos, con mica o arena fina o suelos limosos.	
SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena – arcilla.	
SM	Arenas limosas, mezclas de arena – limo.	Mas
ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas. Poco plásticos.	

Tabla N°1.2: Susceptibilidad a la erosión según el tipo de suelo

El relieve topográfico es el factor geomorfológico que más influye en los procesos erosivos. Dentro del relieve no solamente son importantes la pendiente y longitud del talud, sino también la forma del perfil y la estructura o forma geométrica de las laderas.

Las pérdidas de suelo por erosión hídrica crecen al aumentar la inclinación y la longitud de un talud como consecuencia del incremento de la velocidad y volumen de la escorrentía superficial, y sus efectos se hacen sentir mucho más en las partes inferiores de las laderas, porque a igualdad de precipitación con las partes superiores, soportan el paso del agua que discurre por la ladera.

En tierras de labor, donde la protección de la vegetación es nula en determinados periodos, la erosión laminar, por arrastre de los elementos más finos, se inicia con pendientes de tan sólo el 2 o el 3%, es intensa cuando la pendiente alcanza el 4 o 5%, y la formación de cárcavas y el arrastre total son incontenibles cuando las pendientes alcanzan el 18 o 20%.

El ángulo de inclinación de un talud tiene un fuerte influencia sobre la erosión y sobre la revegetación, tal como se muestra en el cuadro siguiente:

Ángulo del Talud	Características de la Erosión
0°	Riesgos de erosión ligeros. Mínima influencia del talud.
10°	Riesgos de erosión moderados. Gran éxito de la revegetación.
15°	Riesgos de erosión moderados. Buen éxito de la revegetación.
20°	Riesgos de erosión moderados. Bastante éxito de la revegetación.
30°	Riesgos de erosión peligrosos. Escaso éxito de la revegetación.
45°	Riesgos de erosión graves. Revegetación improbable.

Tabla N°1.3: Relación del ángulo del Talud con la Erosión Superficial

La propia estructura del relieve condiciona extraordinariamente la escorrentía y, por lo tanto, los procesos de erosión que pueda

desencadenar. Según la forma que tenga la superficie del talud, se condiciona la erosión que este soporta; en consecuencia:

- Los taludes cóncavos son los que producen menor cantidad de sedimentos y los que ofrecen una superficie del terreno más estable
- Los taludes uniformes se ven afectados en grado intermedio, pero pueden ser fuertemente erosionados por una simple tormenta.
- Los taludes mixtos o convexos muestran un gran incremento de la erosión en la parte central y de la sedimentación al pie del talud.

Finalmente, la *cobertura vegetal* cumple un papel importante en la protección contra la erosión. La vegetación disminuye los efectos erosivos del viento, de la lluvia y de la escorrentía superficial, así como también incrementa la capacidad de infiltración, retiene el material transportado y mejora la estructura del suelo aportando materia orgánica y mineral. El papel que cumple la vegetación en los taludes será tratado más ampliamente en el capítulo siguiente.

### **Evaluación de la Erosión.**

Según plantea R.P.C. Morgan (12) se tiene la necesidad de disponer datos que cuantifiquen o, al menos, califiquen la magnitud de los procesos erosivos en un área determinada. Esto ha dado lugar al desarrollo de diferentes métodos para evaluar la erosión, estos métodos pueden ser cualitativos o cuantitativos, y la toma de datos puede ser indirecta o indirecta. Dentro de estos distintos métodos, el más usado es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).

### ***Ecuación Universal de Pérdida de Suelo: USLE***

La Ecuación Universal de Pérdida del Suelo o USLE (Universal Soil Loss Equation) es un modelo que fue desarrollado por Wischmeier y Smith (1965 y 1978) con fines de gestión a partir de datos empíricos de pérdida de suelo obtenidos en multitud de parcelas de cultivo del oeste de Estados Unidos. Su objetivo era cuantificar las pérdidas de suelo útil para la agricultura debidas a la erosión hídrica y relacionarlas con distintos parámetros del suelo y de

las propias precipitaciones para poder establecer un modelo que predijera la tasa de erosión a partir de unos pocos factores.

Este modelo es:

$$E = R . K . L . S . C . P$$

Donde:

**E:** es la pérdida media anual de suelo, generalmente expresada en Ton/ha.año porque es como habitualmente se cuantifican los sedimentos recogidos en los aforos de parcelas de erosión o en cuencas.

**R:** es el factor de agresividad de la lluvia o erosividad y es función de la energía cinética de la precipitación y de la escorrentía que genera. La tasa de erosión se relaciona positiva y fuertemente con la intensidad de la lluvia en eventos tormentosos intensos de corta duración que superan la capacidad de infiltración del suelo. Sin embargo, también se relaciona con la duración de las lluvias en el caso de eventos de larga duración, aunque sean poco intensos, porque acaban igualmente saturando el suelo y generando escorrentía.

**K:** es denominado factor de erosionabilidad y mide la susceptibilidad del suelo a ser desestructurado y arrastrado. La primera propiedad es función del tamaño y del tipo de agregados que conforman la estructura del suelo y de la fuerza con la que están unidas las partículas que forman dichos agregados, la segunda propiedad depende además de la capacidad de infiltración del suelo. Cuanto más débiles sean las uniones de los agregados al impacto de las gotas o al arrastre y cuanto más rápidamente se produzca la escorrentía y mayor sea ésta, mayor también será la erosionabilidad de un suelo. En el modelo USLE, este factor se estima en un monograma a partir de datos como la textura del suelo, contenido de materia orgánica, estabilidad de los agregados, estructura y permeabilidad.

**L y S:** son factores ligados a la topografía del terreno y son función de la longitud y ángulo de la pendiente respectivamente. La longitud se refiere a la máxima distancia que puede recorrer libremente la escorrentía en el terreno en donde estamos

aplicando la ecuación. Así, cuanto mayores sean el ángulo y la distancia que puede recorrer libremente la escorrentía, mayores podrán ser las tasas de erosión.

**C:** Factor de cultivo o de vegetación (adimensional). Es una relación que compara las pérdidas de suelo con las de una parcela experimental mantenida en constante labrado.

**P:** es el factor de prácticas de conservación de suelos (adimensional). Es una relación que compara las pérdidas de suelo con las de una parcela experimental arada en el sentido de la pendiente.

Esta es una ecuación establecida empíricamente para predecir exclusivamente la erosión laminar y en regueros en áreas relativamente pequeñas y, aunque tiene en cuenta todos los factores que afectan a la erosión pluvial tiene las siguientes limitaciones:

- Es empírica. Se necesita gran experiencia para asignar valores a alguno de los factores en determinadas situaciones, particularmente en el caso del factor de vegetación o cultivo.
- Sólo predice el valor medio de la pérdida anual de suelo. Las tormentas inusuales o los acontecimientos meteorológicos durante un año particular pueden producir mayor cantidad de sedimentos que los estimados.
- No debe ser utilizada para evaluar tasas de erosión debidas a causas geomorfológicas como movimientos en masas, erosión en cauces, etc; donde el agente activo no es la energía cinética de la lluvia sino la humedad del suelo, y que pueden llegar a producir problemas de drenaje, de estabilidad de taludes, etc.
- No pronostica la erosión en cárcavas. Este hecho no debe ser considerado un inconveniente a la hora de establecer criterios de diseño de taludes. Debe asumirse que la aparición de grandes surcos o cárcavas en un talud es un error de diseño.

### **Pérdida Tolerable de Suelo**

Se considera como pérdida tolerable de suelo aquella cantidad, en ton/ha.año, que un terreno puede perder sin que se vea afectada su productividad. Depende de diversos factores, como la profundidad del

suelo, sus propiedades físicas, desarrollo de sistemas radiculares de vegetación, reducción de materia orgánica, pérdida de nutrientes, etc. Definir el nivel de tolerancia como la intensidad de erosión que iguala a su velocidad de formación no es posible en la práctica, pues las velocidades de formación son tan lentas que no pueden determinarse con facilidad, además, en otras ocasiones, esa pérdida tolerable de suelo estará influenciada por la necesidad de evitar la contaminación de los cursos de agua, de limitar daños a cultivos por enterramiento bajo los sedimentos transportados por el agua, o de reducir las tasas de sedimentos en canales, ríos, lagos y embalses.

<b>Profundidad de las Raíces (cm)</b>	<b>Valores de Tolerancia de Pérdidas de Suelo (t/ha.año)</b>	
	(a)	(b)
0 – 25	2.2	2.2
25 – 50	4.5	2.2
50 – 100	6.7	4.5
> 150	9.0	6.7
	11.2	11.2

(a) Suelos con subsuelo favorable que pueden ser renovados por labores, fertilizantes, adición de materia orgánica y otras prácticas de cultivo.

(b) Suelos con subsuelo desfavorable como es el caso de rocas descompuestas en las que no resulta económica su renovación artificial.

Tabla N°1.4: Pérdida Tolerable de Suelo por profundidad de raíces

Otras cifras de referencia son establecidas por FAO, PNUMA y UNESCO como niveles de erosión hídrica en su Metodología Provisional para la evaluación de la degradación de Suelos:

<b>Pérdidas de Suelo (t/ha.año)</b>	<b>Grado de Erosión Hídrica</b>
< 10	Ninguna o Ligera
10 – 50	Moderada
50 – 200	Alta
> 200	Muy Alta

Tabla N°1.5: Pérdida Tolerable de Suelo según grado de Erosión

# CAPÍTULO II

## LA BIOINGENIERIA EN EL TRATAMIENTO DE TALUDES

“La Bioingeniería de suelos, término que refiere al uso de plantas y partes de ella (la que se conoce como materia viva) para dar soluciones a problemas de ingeniería. Las estacas vivas y ramas son acomodadas y emplazadas para ser usadas como refuerzo del suelo, drenaje, barreras para el movimiento de suelos y bombas hidráulicas”, definición según Gray D.H. y Sotir R. B. (5).

La bioingeniería comprende el uso de la vegetación, es decir las raíces y el follaje, como elementos únicos de refuerzo y protección para la estabilización de taludes y control de la erosión. Los elementos vegetales son protagonistas en la estabilización del talud, porque sus tallos y raíces contribuyen a la solución del problema.

La biotécnica comprende la utilización de la vegetación en combinación integrada de elementos inertes para la estabilización de taludes y control de la erosión. Los elementos inertes como muros de concreto, gaviones, geotextiles, geomallas o suelos, son las labores intensivas encargadas de estabilizar el área a tratar; la vegetación cumple varias funciones: protege el suelo, regula las aguas, mejora el paisaje, además de permitir la racionalización de los costos de la solución.

La bioingeniería presenta un método sencillo, efectivo, ecológico, paisajista y relativamente económico para la estabilización de taludes, sin embargo no siempre es aplicable y sus resultados pueden no ser siempre los deseados, debido a la variabilidad e incertidumbre entorno al comportamiento de las especies elegidas para la estabilización del talud. Luego, en los casos donde por diversos motivos no pueda ser aplicadas técnicas de bioingeniería, se recomienda el uso de la biotécnica.

El uso de especies vegetales en la estabilización de taludes y control de la erosión es muy antigua, pero se fue perdiendo por la aparición de otros elementos constructivos tales como el concreto y el acero; pero a finales del siglo XX, la preocupación por la ecología y el impacto de las obras en el medio ambiente hizo que se reconsiderara e impulsara el uso de especies vegetales para fines de estabilización.

La vegetación presenta mas ventajas que desventajas y su uso se ha ido extendiendo poco a poco, sobre todo en países europeos y asiáticos, donde se ha tenido excelentes resultados. En el Perú esta técnica se ha ido imponiendo

lentamente, aún cuando actualmente su uso no está normado y aún el uso de diversas especies nativas no ha sido considerada totalmente por la falta de los estudios respectivos.

## 2.1 Funciones de la Vegetación en la Estabilidad de Taludes

Según la publicación realizada por Carmen Mataix González (3) establece que la vegetación puede jugar un papel importante en el control de procesos y como elemento de protección y conservación del suelo, por la influencia que ejerce sobre él, tanto en superficie, protegiendo y sujetando el suelo, como en profundidad, al incrementar la resistencia y la cohesión de los terrenos. Además tiene una influencia significativa en el nivel de humedad y en su capacidad de retención del agua.

La existencia de una cubierta vegetal incrementa la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo y su tasa de infiltración. Lo que produce una reducción del volumen de escorrentía generado y de su velocidad, con el consiguiente efecto sobre la intensidad y extensión de los procesos erosivos.

Como efectos mecánicos, la existencia de una cubierta vegetal aumenta la resistencia y la estabilidad del suelo en el que se desarrolla, al tiempo que protege la superficie de los terrenos ante la acción de agentes externos, como pueden ser el viento o el pisoteo de personas y animales.

La quema de la vegetación aumenta la inestabilidad de los taludes, especialmente por la eliminación del refuerzo de las raíces y por la exposición a la erosión acelerada. La deforestación puede afectar la estabilidad del talud en varias formas:

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

La vegetación constituye una interfase de interacción entre el suelo y la atmósfera, que se manifiesta a través de una serie de efectos hidrológicos y mecánicos, tal como se muestra en la figura siguiente:

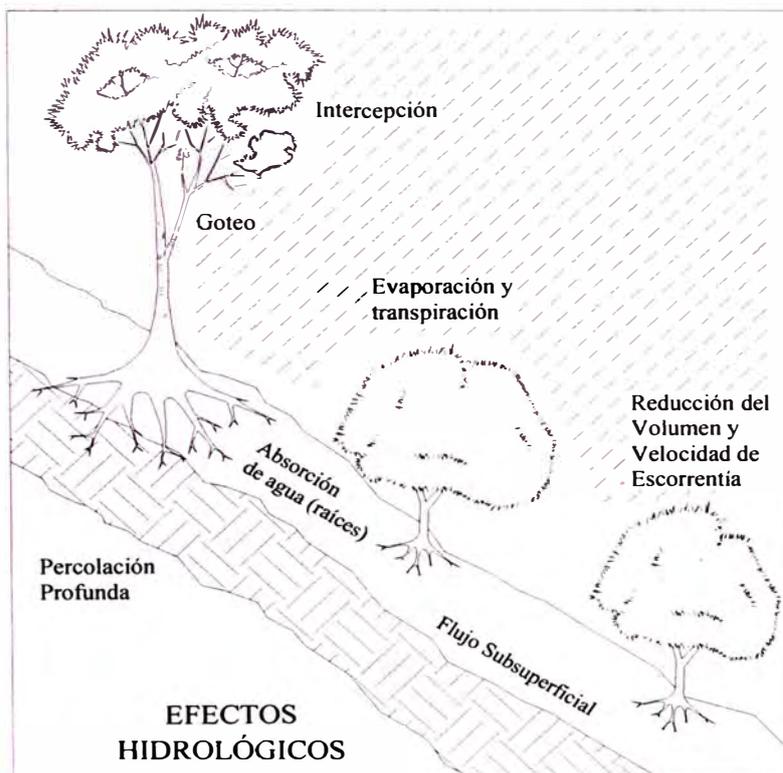


Fig. N° 2.1: Efectos Hidrológicos de las Plantas en los Taludes

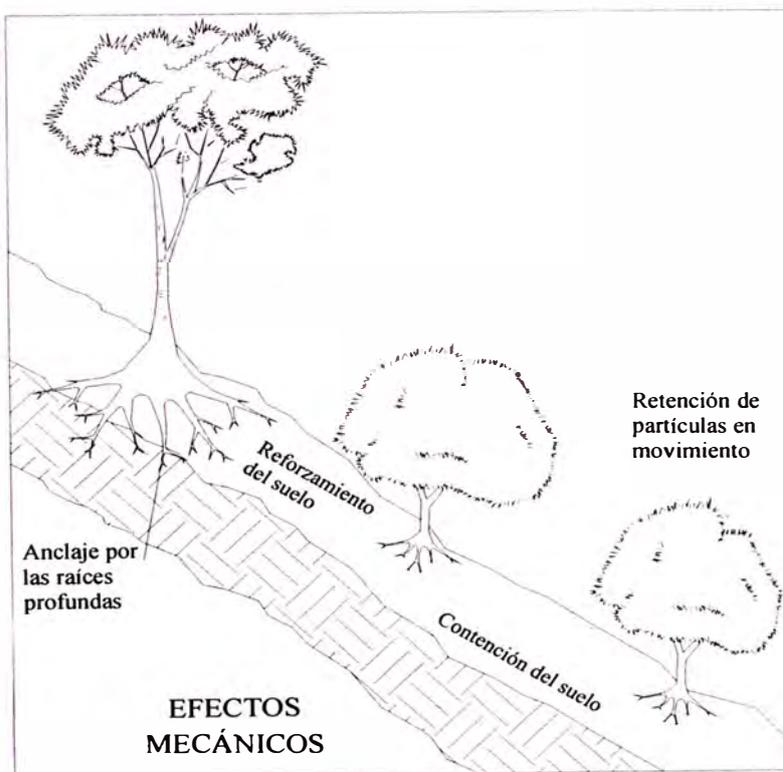
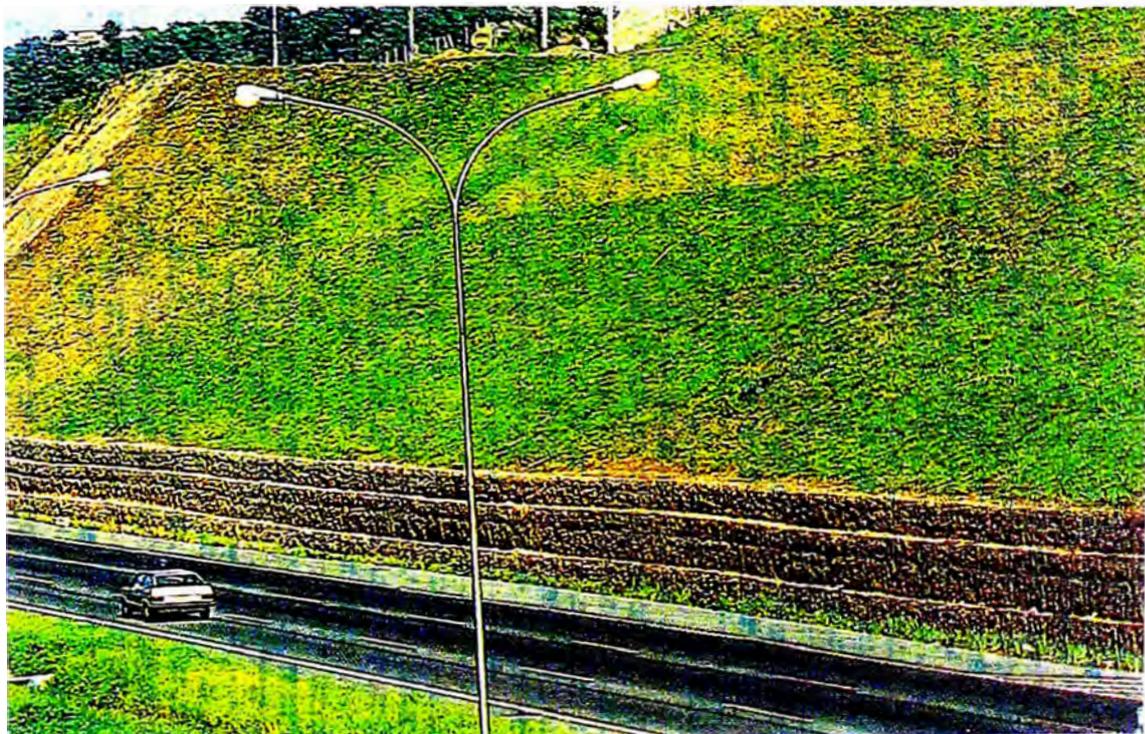


Fig. N° 2.2: Efectos Mecánicos de las Plantas en los Taludes



*Imagen N° 2.01: Taludes sin vegetación son sumamente inestables – Imagen publicada en el II Simposio Internacional de Geotecnia y Medio Ambiente (2).*



*Imagen N° 2.02: Taludes con vegetación son mucho más estables y estéticamente mucho más agradables – Imagen publicada en el II Simposio Internacional de Geotecnia y Medio Ambiente (2).*

## 2.1.1 Efectos Hidrológicos de la Vegetación

### Interceptación

La cubierta vegetal intercepta y retiene una proporción variable del volumen de agua de precipitación recibida. Parte de la precipitación interceptada se almacena en las hojas y tallos, desde donde regresa a la atmósfera por evaporación. El resto de la interceptación, denominada precipitación temporalmente interceptada (PTI), pasa al suelo escurriendo a lo largo de tallos, ramas y troncos, o goteando desde la superficie de las hojas.

Las consecuencias para la conservación y protección del suelo son:

- ✓ Se reduce el volumen de precipitación que alcanza la superficie del terreno y, por tanto, la cantidad de agua capaz de producir remoción y movilización del suelo.
- ✓ Se retrasa la llegada de la lluvia al suelo, disminuyendo así la intensidad de la precipitación.
- ✓ Se evita el impacto directo de las gotas de lluvia sobre el suelo y se disipa la energía erosiva al frenar su caída.

La cantidad de agua interceptada varía según la densidad de la cubierta vegetal y la importancia de las precipitaciones, en cuanto a cantidad intensidad y duración.

Si se supone que la lluvia cae verticalmente, el volumen de precipitación interceptada  $P_i$ , puede estimarse utilizando la siguiente ecuación:

$$P_i = P_T \cdot C$$

donde:

PI : Volumen de precipitación interceptada por la vegetación (mm)

PT: Volumen total de precipitación (mm).

C : Grado de cubierta vegetal (% de suelo cubierto).

La intensidad de la lluvia es otro factor que influye directamente sobre la interceptación. Con lluvias de intensidad moderada el volumen de agua interceptada puede alcanzar el 100% de la precipitación recibida, mientras que con aguaceros de gran intensidad no suele superarse el 25% de la precipitación recibida.

El volumen de agua de interceptación que queda almacenada en las estructuras vegetales, oscila dentro de un amplio intervalo de valores,

tanto entre unos tipos de vegetación y otros, como para la misma durante el desarrollo del aguacero. El valor máximo de almacenamiento es difícil de determinar. Según experiencias realizadas, en las masas arbóreas oscila entre 0.18 y 7.75 mm.

La capacidad de almacenamiento de las plantas se repone cuando deja de llover, por lo que el total anual de agua de intercepción en volumen acumulado puede suponerse un porcentaje muy apreciable de la precipitación total recibida.

La parte de la precipitación interceptada y almacenada que no se evapora, PTI, alcanza el suelo bajo la cubierta vegetal por dos caminos principales:

- Por escurrimiento a lo largo de tallos, ramas, y troncos.
- Por goteo, desde las hojas y otras estructuras vegetales.

La cantidad de agua que llega a escurrir depende del ángulo que forman los tallos, ramas y troncos con la superficie del suelo. En las plantas cuyos tallos tienen un diámetro medio inferior al diámetro medio de las gotas de lluvia, como sucede en muchas plantas herbáceas, el volumen de agua de escurrimiento alcanza su valor máximo con ángulos de entre 50° y 60°. Esta dependencia está menos clara en plantas con tallos de diámetro mayor, aunque parece que los valores máximos de escurrimiento se alcanzan en ellas con ángulos inferiores a 60°.

El escurrimiento del agua a lo largo de tallos y tronco reduce la energía cinética del agua de lluvia y con ello su capacidad erosiva. Aunque en las cubiertas arbóreas o arbustivas puede producirse una concentración acusada de los escurrimientos, creándose líneas de flujo preferente. En estos casos la intensidad efectiva de la lluvia en los puntos de llegada al suelo puede alcanzar valores de hasta 150 – 200 % de la precipitación recibida, ocasionando la disgregación y arrastre de las partículas del suelo y la generación de escorrentía.

En las superficies cubiertas de herbáceas, por el contrario, el agua que llega al suelo tiene una distribución más regular y no se produce este fenómeno.

El volumen de agua que alcanza el suelo al gotear desde las hojas es igual al volumen de agua temporalmente interceptada menos el volumen de agua de escurrimiento. Tiene una distribución de tamaños de gota

diferente al de la lluvia original. La proporción de gotas de pequeño (<1mm) y gran tamaño (>5mm) es mayor, y la proporción de gotas de tamaño medio es menor que en la lluvia original.

Las gotas de pequeño tamaño se forman al fragmentarse las gotas de lluvia tras el impacto con la vegetación, y las de gran tamaño por coalescencia en la superficie de las hojas durante el periodo de almacenamiento temporal.

A pesar del gran tamaño que pueden alcanzar las gotas de agua que drenan desde las hojas, su capacidad erosiva por salpicadura es notablemente inferior a la de la lluvia directa, dentro de un orden de altura de las plantas, ya que al ser frenada su caída por la vegetación, la velocidad con la que las gotas de agua alcanzan el suelo es muy inferior a su velocidad inicial de caída, de forma que su energía cinética disminuye y con ello su potencial erosivo.

Al igual que cuando se produce una concentración excesiva de agua de escurrimiento, la concentración de agua de goteo también puede conducir a que se generen altas intensidades de precipitación en puntos localizados, intensidades que pueden suponer hasta un 1000% de la precipitación recibida. Aunque esto sólo sucede en situaciones de calma, ya que con fuertes vientos el movimiento de las hojas y tallos ayudan a diseminar las gotas en un área grande de terreno, y por tanto, se evita la concentración del goteo en superficies de terreno relativamente pequeñas.

### **Evapotranspiración**

El término de evapotranspiración (ETP) se utiliza para describir el conjunto de pérdidas de agua en forma de vapor debidas a la evaporación de la lluvia interceptada por la vegetación y a la transpiración de las plantas. La vaporización tiene lugar en un espacio tridimensional que se extiende desde las capas superficiales del suelo, hasta la altura extrema alcanzada por la vegetación, denominada superficie evaporante.

Ambos procesos, evaporación y transpiración, se influyen mutuamente y están íntimamente relacionados, por lo que, cuando se quiere medir la pérdida de agua en una superficie vegetada, es necesario

recurrir a este concepto. Suele expresarse en  $m^3/ha$ , mm de altura de agua o  $lts/m^2$ .

La ETP depende básicamente de los mismos factores que la evaporación:

- Energía disponible para la vaporización del agua: la energía utilizada en la ETP tiene como fuente principal la radiación solar.
- Déficit de saturación de la atmósfera o déficit higrométrico: La intensidad de la evaporación es directamente proporcional al déficit higrométrico.
- Temperatura del aire.
- Velocidad y turbulencia del viento: El viento asegura la renovación del aire saturado en contacto con la superficie de evapotranspiración por aire más seco.
- Naturaleza y estado de la superficie evaporante: Estos factores hacen referencia a la vegetación, al suelo y al contenido en humedad de éste. En cuanto a la vegetación son fundamentales su capacidad para reflejar la radiación solar incidente, el grado de cubierta y la extensión del sistema radicular. Del suelo intervienen la capacidad de retención de agua y la accesibilidad de ésta a las capas superficiales. Ambas características están determinadas por la porosidad, la granulometría y la naturaleza del suelo.

Además de estos factores, influyen otros relacionados con la movilización del agua por la vegetación, como:

- La radiación solar, que provoca un aumento de la transpiración estática.
- La existencia de periodos críticos, durante los cuales las plantas son exigentes en agua, o por el contrario son poco sensibles a la cantidad disponible de agua por hallarse en un reposo vegetativo relativo.

Algunas consideraciones acerca de la evaporación y transpiración, contrastadas en experiencias de campo y laboratorio son:

- La evaporación es diferente según la composición de la cubierta. Al aumentar la edad y disminuir la espesura de la masa forestal, la evaporación tiende a aumentar.

- En suelos cubiertos de déficit higrométricos elevados es más intensa, y por el contrario, con déficit bajos la transpiración es menor.
- Las especies arbóreas tienen una transpiración inferior a la de los herbáceos.

Tipo de Vegetación	Transpiración (mm)
Alfalfa	3.4
Avena	3.9
Trigo	2.7
Trébol	2.2
Centeno	2.3
Viñedo	1.0
Píceas	0.8
Roble	0.65

Tabla N°2.1: Tasa de Transpiración obtenidas en 24 horas

- La edad de las masas forestales influye en la tasa de transpiración. Esta se ve incrementando progresivamente hasta que la masa alcanza la madurez y posteriormente decrece.

Uno de los principales efectos que tiene la evapotranspiración de las plantas sobre el suelo es que disminuye su contenido de humedad respecto al de su máximo potencial. Las plantas succionan el agua edáfica a través de las raíces y la devuelven a la atmósfera en forma de vapor, de forma que, en condiciones similares, los suelos vegetados suelen tener un contenido inferior de agua que los suelos desnudos.

Esta disminución del contenido de humedad del suelo debido a la evapotranspiración tiene consecuencias negativas y positivas, como:

- El incremento de la resistencia al corte, este efecto se debe a que la depresión del contenido de humedad del suelo reduce la presión de poros del agua e incrementa la succión del suelo.
- La disminución del contenido de humedad, implica un menor peso del talud. Esto supone una reducción en la componente tangencial de las fuerzas de corte (reduce la inestabilidad).
- La disminución de humedad, incrementa la conductividad hidráulica del suelo y disminuye la presión de poros del agua, es

decir, aumenta la capacidad de almacenamiento del suelo. Por tanto, la cantidad de precipitación necesaria para que se produzca el encharcamiento o saturación es mayor en suelos con vegetación.

- En ciertos suelos la extracción prolongada de agua por las raíces de las plantas puede conducir a la desecación y agrietamiento del suelo, aumentando el riesgo de deslizamiento en las capas superficiales.

### **Infiltración**

La permeabilidad del suelo y su tasa de infiltración es mayor en suelos provistos de vegetación que en suelos desnudos. Las acciones de la cubierta vegetal que determinan la aparición de este efecto son las siguientes:

- La intercepción retrasa la llegada del agua al suelo y disminuye la intensidad de la precipitación, evitando que el suelo quede saturado en poco tiempo.
- La disipación de la energía cinética de las gotas de lluvia debida a la intercepción de la precipitación reduce considerablemente la disgregación por golpeteo de los agregados del suelo, con lo que la incorporación de finos que puedan obstruir poros y grietas es menor, manteniéndose inalterables las condiciones de porosidad y la tasa de infiltración del suelo.
- La transpiración de las plantas regula la dosis de humedad del suelo, manteniendo una capacidad de almacenamiento disponible, aún en épocas de gran humedad, y permite que éste recupere su capacidad de infiltración más rápidamente.
- La absorción de agua por las cubiertas húmicas y los restos vegetales (una acícula de pino puede retener una cantidad de agua equivalente a 10 veces su peso), dosifica en el tiempo la llegada del agua al suelo y retrasa el punto de encharcamiento y con ello el comienzo de la aparición de escorrentía superficial.
- El incremento de la rugosidad superficial debida a la vegetación disminuye la velocidad de la escorrentía con lo cual se incrementa

el tiempo de contacto agua-suelo y con él, el volumen de agua infiltrada.

- La penetración de las raíces en el terreno abre vías de acceso al agua hacia las capas profundas del suelo. Cuando éstas se descomponen se generan multitud de canalillos y cavidades, más o menos vacíos, o rellenos de material sumamente permeable, por donde circula el agua con relativa facilidad.
- La incorporación por la vegetación de materia orgánica al suelo mejora su estructura haciéndola más granular. Con ello, se incrementa su porosidad y se equilibra la distribución del tamaño de los poros, haciéndose su capacidad de almacenamiento y su permeabilidad mayores.

Este incremento de la infiltración y de la capacidad de almacenamiento de agua del suelo debida a la vegetación determina que, bajo las mismas condiciones edáficas, de precipitación y pendiente, los volúmenes de escorrentía generados durante un aguacero sean menores en suelos vegetados que en suelos desnudos. Al tiempo que el momento de aparición de la escorrentía se retrasa.

La consecuencia inmediata de esta circunstancia es que, cuando mayor sea la infiltración menor será el número de eventos erosivos por año, ya que se necesitan precipitaciones mayores para que se produzca un incremento significativo de la escorrentía.

El efecto que tiene la vegetación sobre la capacidad de infiltración es muy variable. Es función de las condiciones del suelo (textura, estructura, etc), la topografía del terreno y de ciertas características de la vegetación, tales como tipo morfológico, densidad de la cubierta, altura, etc.

La existencia de encostramientos superficiales es un factor determinante en la capacidad de la infiltración de un suelo. Su existencia puede reducir la infiltración del suelo en más de un 50%. Estas costras en las capas superficiales del suelo se producen debido al impacto de las gotas de lluvia, que ocasiona la dispersión de las partículas y el taponamiento de los poros del suelo. La vegetación es un agente extremadamente eficaz en la prevención de este efecto y, por tanto, en el mantenimiento de las condiciones de infiltración del suelo.

El área de influencia depende de la extensión y profundidad del sistema radicular. 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 determinado, 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.

## 2.1.2 Protección de la Superficie del Suelo

### Protección frente a la erosión por salpicadura

Tal como se establece en la publicación de Carmen Mataix González (3) el efecto debido al impacto directo de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo se denomina erosión por salpicadura. En ausencia de obstáculos las gotas de agua golpean el suelo con considerable fuerza, disgregando las partículas terrosas y proyectándolas en el aire.

El poder erosivo de la lluvia por salpicadura, en un determinado tiempo de suelo es función de:

- La intensidad de la precipitación.
- El volumen de la precipitación capaz de causar este tipo de erosión, es decir la parte de precipitación que alcanza directamente el suelo y el agua por goteo.
- La energía cinética de la lluvia, que depende de la velocidad final de caída y el tamaño de las gotas.

Las cubiertas vegetales reducen la intensidad de este efecto, ya que modifican las características de las precipitación que definen su poder erosivo por salpicadura:

- La vegetación forma una cubierta protectora que evita el impacto directo de la lluvia en el suelo.

- Disminuye localmente la intensidad de la precipitación al retrasar la llegada del agua al suelo.
- La intercepción disipa o reduce la energía cinética de la lluvia frenando su caída.
- La extensión y eficacia de la protección proporcionada por la vegetación depende de su altura, su grado de cubierta y sus características morfológicas.

### *Altura de la Vegetación*

La altura de la vegetación determina la altura de caída del agua de intercepción que es liberada desde las hojas por goteo, y por tanto su energía cinética y la fuerza del impacto contra el suelo. Cuando mayor es la altura de caída, mayor es la energía cinética del agua de goteo y mayor su potencial erosivo.

Las cubiertas herbáceas y leñosas de poca altura proporcionan generalmente velocidades de caída inferiores a las de la lluvia directa, mientras que en las de mayor altura las gotas recuperan su velocidad original antes de alcanzar el suelo, y con ello su potencial erosivo.

### *Grado de cubierta*

El grado de cubierta determina la superficie de suelo que queda protegida por la vegetación del impacto directo. La protección máxima la proporcionan cubiertas del 70% a superiores. El mantillo y los restos vegetales que se acumulan en superficie cumplen esta misma función y también ayudan a proteger el suelo del impacto de las gotas de lluvia.

### *Características Morfológicas*

Las características morfológicas de las plantas, especialmente el tipo de hoja y la estructura del ramaje, determinan la proporción de agua interceptada que alcanza el suelo por goteo, el tiempo de almacenamiento temporal del agua en las plantas y el tamaño alcanzado por las gotas de goteo.

El tamaño de hoja de las plantas que forman el dosel de vegetación influye en el papel protector de éste en dos sentidos contrarios. Como efecto positivo, las hojas de gran superficie

proporcionan un mayor tiempo de almacenamiento de la lluvia en ellas, repartiendo en un tiempo más prolongado la llegada de agua al suelo durante el aguacero, y disminuyendo con ello la intensidad y el potencial erosivo de la lluvia.

Como efecto negativo, en las hojas anchas las gotas interceptadas, originando gotas de tamaño muy superior a las que se originan en plantas de hoja pequeña (hasta 5 y 6mm de diámetro). La mayor masa de estas gotas determina que tengan una energía cinética más grande, de forma que la altura necesaria para que las gotas recuperen su energía cinética inicial de caída (antes de la intercepción) es significativamente inferior a la que necesitan las gotas de tamaño más pequeño. Si estas gotas caen desde alturas inferiores a 0.5 m no se produce un incremento significativo de su potencial erosivo. Pero, si la caída se produce desde alturas superiores, el efecto erosivo del goteo puede llegar a ser mayor que el de la misma lluvia, con lo que el efecto erosivo se intensifica.

### **Escorrentía Superficial**

La intervención de la escorrentía superficial en el proceso de la erosión hídrica se concreta en dos acciones principales: la disgregación de las partículas del suelo y su transporte. El agua de escorrentía actúa arrancando y arrastrando las partículas del suelo que ya han sido desagregados por salpicadura y provocando este mismo efecto en el resto de partículas que permanecían inalteradas. La capacidad de disgregación y transporte de la escorrentía son función de su volumen, su velocidad y su turbulencia, así como de la cantidad y naturaleza de los materiales que arrastra. La vegetación disminuye el poder erosivo de la escorrentía al modificar dos de los factores principales de los cuáles ésta es función: disminuye la cantidad de agua de escorrentía generada y reduce su velocidad.

La pérdida de suelo decrece exponencialmente al incrementarse el grado de cobertura proporcionado por la vegetación. La disminución de la cantidad de agua de escorrentía por la vegetación se da por :

- La intercepción y evaporación de parte de la precipitación recibida.

- La transpiración de las plantas bombea agua a la atmósfera y regula la dosis de humedad del suelo (incrementando con ello su capacidad de almacenamiento).
- La gran capacidad de absorción de agua de las cubiertas húmicas y los restos vegetales retrasa el punto de encharcamiento (momento de comienzo de la circulación del flujo superficial).
- La vegetación mejora la estructura del suelo (incrementando su capacidad de infiltración).
- La mayor rugosidad de las superficies vegetadas disminuye la velocidad de circulación del agua, proporcionando con ello un mayor tiempo de contacto agua-suelo y favoreciendo de esta forma la infiltración.

Sin embargo, en algunos casos la acción de la vegetación sobre la escorrentía puede cambiar de signo y ejercer un efecto negativo, al provocar un incremento local de la escorrentía y concentrar las líneas de flujo, debido al aporte de agua de escurrimiento. Este efecto es especialmente marcado en plantas en las que muchas ramas confluyen en el mismo punto del tronco principal.

Respecto al control de la velocidad del flujo de escorrentía superficial, las cubiertas vegetales actúan como un obstáculo físico que se opone al paso del agua al incrementar la rugosidad de la superficie del terreno. La reducción en la velocidad de circulación del flujo de escorrentía superficial puede llegar hasta alrededor de la cuarta parte de la velocidad en el suelo desnudo. Además se crea una micro topografía que diversifica las líneas de circulación del agua evitando su concentración en trazas definidas, cuyo potencial erosivo es mayor que el de una lámina de agua que cubra de forma homogénea el terreno. Esta disminución de la velocidad de agua superficial reduce la energía cinética de la escorrentía, reduciéndose así su capacidad erosiva.

La rugosidad superficial se suele describir mediante un coeficiente que expresa la rugosidad efectiva (rugosidad las partículas del suelo, de la micro topografía y de la rugosidad de la vegetación). Este coeficiente se denomina coeficiente de Manning y se relaciona inversamente con la velocidad y el caudal de escorrentía. Esto se establece en la Fórmula de Manning (18):

$$V = \frac{R^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n}$$

Como el nivel de rugosidad depende de la morfología de las plantas y la densidad de la cubierta vegetal, el coeficiente de Manning  $n$ , puede relacionarse con un coeficiente de retardo  $CI$ , que es función de la densidad y altura de tallos (3):

$$CI = 2.5 (h \cdot M^{1/2})^{1/3}$$

donde:

$CI$  = Índice de retardo de la vegetación definido por Temple

$h$  = Altura de la vegetación (m)

$M$  = Densidad de tallos ( $n^\circ$  de tallos/ $m^2$ )

Tipo de Vegetación	CI	Intervalo de $n$
Cubiertas herbáceas muy altas (>600mm)	10	0.06 – 0.20
Cubiertas herbáceas altas (250 – 600 mm)	7.6	0.04 – 0.15
Herbáceas de tamaño medio (150 – 250 mm)	5.6	0.03 – 0.08
Herbáceas cortas (50 – 150 mm)	4.4	0.03 – 0.06
Herbáceas muy cortas (< 50 mm)	2.9	0.02 – 0.04

Tabla N°2.2: Relación del tipo de Vegetación con el factor  $CI$  y  $n$  de Manning

Cuando la profundidad del agua es pequeña comparada con la altura de la vegetación, ésta se mantiene relativamente rígida, y proporciona un alto grado de rugosidad, con valores característicos de  $n$  entre 0,25 y 0,3. En estas situaciones la rugosidad está asociada a la distorsión interna del flujo alrededor de los tallos de plantas individuales.

Cuando la profundidad del agua se incrementa, los tallos de las plantas comienzan a oscilar por efecto de la corriente, perturbando al flujo, y así el valor de  $n$  se incrementa hasta 0,4 y la velocidad del agua disminuye.

Cuando el agua cubre o comienza a sumergir a la vegetación, las plantas flexionan a favor de la corriente, la resistencia física de los tallos al paso del agua y las interferencias creadas en el flujo por las plantas desaparecen, y la rugosidad es debida casi exclusivamente a fricción superficial. El valor de  $n$  para el suelo desnudo y para una cubierta de vegetación herbácea de poca altura es muy similar, entre 0.02 y 0.03.

También cuando la vegetación no presenta una distribución ni un grado uniforme, puede producirse un incremento localizado de la erosión.

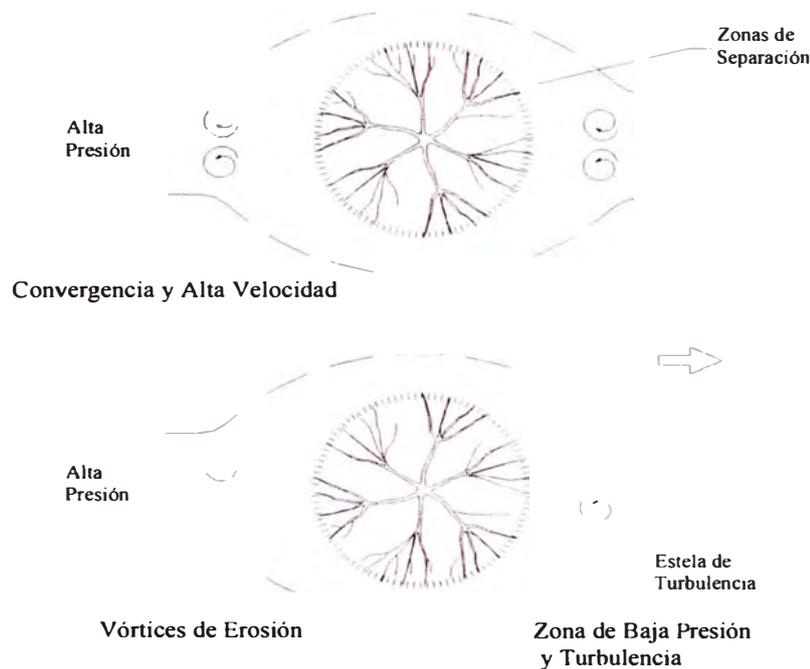


Fig. N° 2.3: Circulación de la escorrentía alrededor de elementos dispersos de vegetación.

Al dividirse el flujo de agua para sobrepasar un grupo de plantas, se produce una diferencia de presión entre la zona de aguas arriba de la vegetación (zona de alta presión de flujo), y la de aguas abajo (zona de baja presión de flujo). Esta diferencia de presión origina tensiones que pueden conducir a la formación de arremolinamientos y turbulencias en la zona de baja presión de flujo, y de vórtices de erosión tanto en la zona de alta como de baja presión de flujo.

Cuando la cubierta es densa y uniforme, la vegetación favorece el proceso de deposición de los sedimentos que arrastra el agua. En este tipo de cubiertas, la mayoría de los sedimentos quedan atrapados por la vegetación y eliminados del agua, evitándose que el efecto erosivo de la escorrentía se incremente por abrasión.

Para láminas de agua profundas y con un número de Reynolds que indique condiciones de turbulencia, la vegetación interacciona con el flujo y ofrece protección de dos formas. Por un lado, con bajas intensidades de circulación la gran resistencia que ofrece la vegetación al paso del agua hace que la velocidad de ésta sea inferior al mínimo requerido para movilizar las partículas del suelo, y por tanto, no se produce erosión. Por otro, con alta intensidad de circulación, la vegetación queda sumergida y

se inclina a favor de la corriente, formando un manto sobre el suelo, el cual, si bien ofrece poca resistencia al paso del agua, y por tanto un efecto mínimo sobre la velocidad del flujo y su energía cinética, protege mecánicamente el suelo al evitar el contacto del agua con él.

### **Protección Mecánica del Suelo Frente al Tráfico y Pisoteo**

Tal como se establece en la publicación de Carmen Mataix González (3) la vegetación ofrece al suelo una protección mecánica frente al pisoteo de personas y animales y al paso de vehículos, al amortiguar y/o absorber el impacto que éstos generan.

La deformación de la superficie del suelo por efecto del tráfico y el pisoteo es el resultado de la combinación de la presión vertical y el deslizamiento horizontal. La compresión está ocasionada por el tacón en la primera parte de cada paso del caminante. El deslizamiento horizontal se produce en la parte final del paso, y está asociado a la puntera. Este deslizamiento provoca el cercenamiento o corte del suelo, y es la acción que produce más daño. En los vehículos el efecto es similar, el neumático produce una presión vertical sobre el suelo (compresión y aplastamiento), al avanzar la rodada ocasiona el deslizamiento horizontal. Si la resistencia proporcionada por la vegetación es inferior a la fuerza ejercida en el suelo se produce deformación.

La resistencia de la vegetación a estas acciones y su efectividad en la protección del suelo depende de la resistencia a la tracción de los tallos, hojas y ramas sobre el suelo, la fuerza y cohesión del enraizamiento (masa raíces-suelo) y la velocidad de recuperación de las plantas individuales.

Son mejores las plantas con estas características:

- Tipo morfológico en roseta, postradas o reptantes, o bien, con bajo crecimiento en altura.
- Tallos y hojas flexibles.
- Meristemas de crecimiento basales, o situados por debajo de la superficie del suelo.
- Capacidad de reproducción vegetativa, además de por semillas.
- Alta tasa de crecimiento y periodo vegetativo largo.
- Resistencia al enterramiento y/o a la exposición de las raíces.



Fig. N° 2.4: Fuerzas ejercidas sobre el suelo por el paso de personas y vehículos.

### Aislamiento del Suelo

La cubierta vegetal modifica el microclima de la superficie del suelo, reduciendo las variaciones de temperatura y humedad. Esto disminuye la agresividad de los procesos de meteorización mecánica, que actúan por ruptura de los agregados del suelo y destrucción de sus estructuras. En particular, reducen los daños causados por el ciclo de congelación y deshielo del suelo.

### Sujeción del Suelo

Las raíces de las plantas que tienen entre 1 y 12 mm retienen las partículas de suelo evitando su desplazamiento frente a movimientos inducidos por la gravedad, el impacto de las gotas de lluvia, la escorrentía y/o el viento. Para esta labor son más efectivas las plantas que tienen un sistema radical somero y extendido, que aquellas de sistema radical vertical y pivotante. Los árboles, los arbustos y los matorrales de tamaño grande son útiles para sujetar superficies inestables en las que se producen desprendimientos de material rocoso, ya que evitan que ruede ladera abajo.

Las plantas más eficaces para esta función son las que reúnen las siguientes cualidades:

- Resistencia, entendida como capacidad para soportar el impacto de caída de los materiales sin daño, y flexibilidad, para que sus ramas y troncos se doblen sin romperse.
- Ramificación desarrollada desde la base, para ofrecer más superficie normal a la trayectoria de caída de los materiales y así maximizar el efecto de retención.

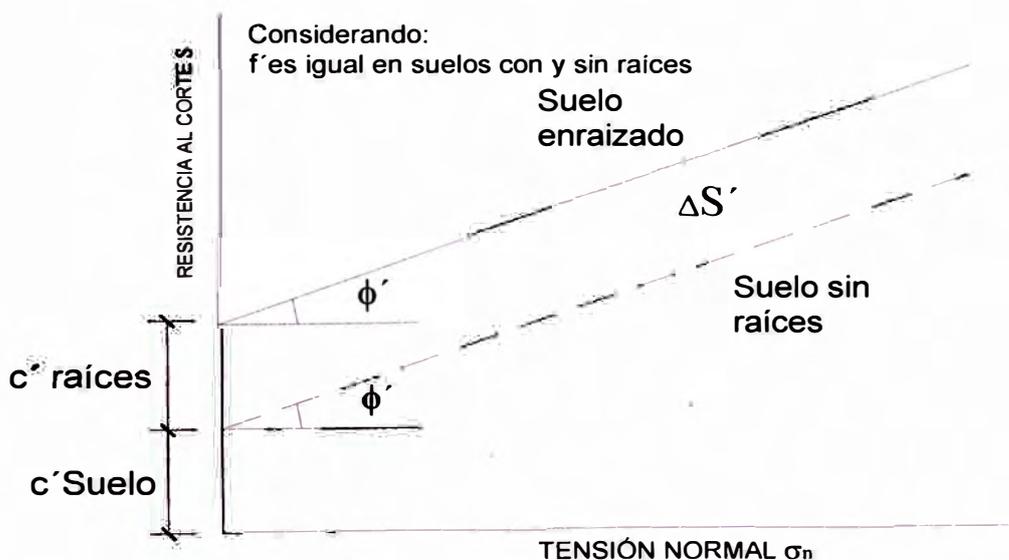
- o Tolerancia al enterramiento, es decir, que sean capaces de producir nuevas raíces desde los tallos enterrados, y así desarrollar un nuevo sistema radical sobre la nueva superficie de suelo creada.

### 2.1.3 Modificación de la Propiedades Mecánicas

Tal como se establece en la publicación de Carmen Mataix González (3) los sistemas radicales de las plantas y árboles desarrollan bulbos donde interactúan el suelo y las raíces, lográndose el reforzamiento mecánico del suelo. El reforzamiento depende de la densidad de las raíces, su resistencia a la tracción, la resistencia por fricción entre la raíz y el suelo, el índice de alineamiento de las raíces (rectitud – angulosidad) y la orientación respecto a la dirección del esfuerzo principal. El sistema radical incrementa el parámetro de cohesión del suelo.

#### Reforzamiento del Suelo por las Raíces

Las raíces de las plantas forman un armazón de fibras íntimamente entrelazadas, ligadas a la matriz de suelo, que refuerza su estructura e incrementa su resistencia al deslizamiento. Su acción es similar a la de los sistemas artificiales de reforzamiento y sostenimiento (donde se mejora la resistencia y la estabilidad del suelo mediante la inclusión en él de mallas tridimensionales).



$\Delta S'$  = Incremento de la resistencia efectiva al corte debido a reforzamiento radicular.

Fig. N° 2.5: Efecto del reforzamiento radicular en la resistencia al corte del suelo

El conjunto raíces/suelo constituye una estructura mixta formada por una trama semicontinua de fibras (raíces) que tiene una resistencia a la tracción y una adhesividad relativamente altas, incluida y ligada a una matriz (suelo) que ofrece una resistencia a la tracción un poco inferior.

En esta estructura mixta, las raíces actúan como un elemento equilibrador de fuerzas, transfiriendo una parte de la carga, desde las zonas sometidas a mayores esfuerzos, hacia otras en las que existen menores tensiones, de forma que, el esfuerzo cortante al que está sometido el suelo queda repartido, y con ello, se incrementa el nivel máximo de tensión admisible en condiciones similares de pendiente.

Por otro lado, las raíces proporcionan al suelo una mayor resistencia al corte por el mayor grado de cohesión interna que tiene la estructura compuesta por raíces/suelo y la adhesión de las partículas de suelo a las raíces.

En las gramíneas, las leguminosas herbáceas y los arbustos de pequeño tamaño la acción reforzada que se extiende en el perfil del suelo es palpable hasta profundidades de entre 0.75 y 1.5m. Los árboles proporcionan este efecto a mayor profundidad, hasta 3m o más, dependiendo de la morfología de su sistema radical.

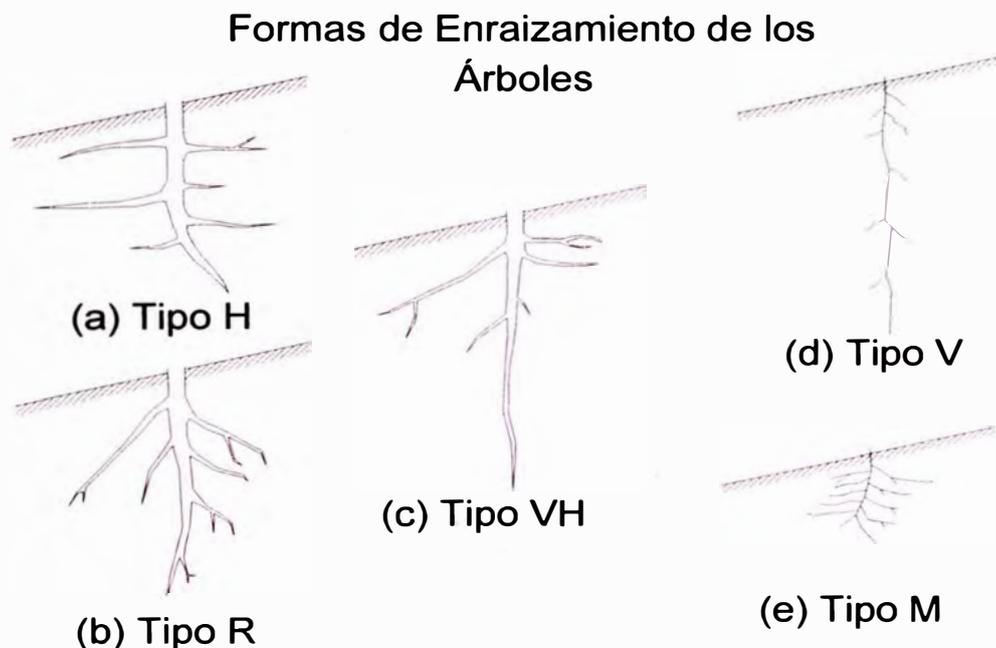


Fig. N° 2.6: Formas de Enraizamiento de los Árboles

Este efecto de reforzamiento mecánico de las raíces se extiende, en el caso de los árboles, además de en profundidad alrededor de la planta. Su magnitud es función de las siguientes propiedades:

- Densidad del enraizamiento y rugosidad superficial.
- Resistencia y módulo de tracción.
- Relación longitud/diámetro.
- Índice de alineamiento de las raíces recititud/angulosidad.
- Orientación respecto a la dirección del esfuerzo principal.

En la siguiente tabla se dan valores típicos del incremento en la cohesión del suelo debido a las raíces,  $c_R$  y su resistencia a la tracción para diversas especies vegetales:

AUTOR	SUELO / VEGETACIÓN	$C_R$ (KN/m <sup>2</sup> )
Swanston (1970)	Coníferas de la montaña / morrenas	3.4 – 4.4
O’Loughlin (1974)	Coníferas de la montaña / morrenas	1.0 – 3.0
Endo y Tsuruta(1969)	Alisos / aluvión	2.0 – 12
Wu (1970)	Coníferas de la montaña /morrenas	5.9
Waldron (1981)	Pinos / suelo arcilloso	5.0
Ziemer (1982)	Bosque Perennifolio mixto / morrenas	3.3
Megaham (1981)	Coníferas / suelos arenosos	10.3
Riestenber (1983)	Arces / Coluvión arcillosos	5.7
Borroughs (1977)	Coníferas / suelos de montaña	3 – 17.5

*Tabla N°2.3: Valores Típicos del incremento en la cohesión del Suelo debida a la acción de las raíces (3)*

Respecto a la resistencia a la tracción de las raíces, es necesario señalar las siguientes consideraciones:

- Los árboles y arbustos pueden tener en raíces individuales resistencias muy altas, incluso superiores a 74 MN/m<sup>2</sup>, como sucede en el aliso (*Alnus glutinosa*).
- Dentro de una misma especie, puede producirse un rango de variación muy amplio respecto a sus resistencias, dependiendo de diversas circunstancias vitales, como tamaño, edad, estado de las raíces, estación del año, etc.
- El grosor de las raíces de los árboles responden a cargas asimétricas como las que se experimentan en los taludes.

El incremento en la cohesión del suelo  $c_R$ , es proporcional a la densidad o concentración de raíces, medida como masa de raíces por unidad de volumen. Generalmente sólo se consideran las raíces de menos de 15 – 20 mm de diámetro, ya que las de diámetros superiores no contribuyen significativamente a incrementar la resistencia al corte del suelo, aunque si actúan anclando los horizontes superficiales del suelo a las zonas profundas mucho más consistentes. Para estudiar este efecto las raíces deben ser consideradas como elementos individuales de anclaje. La relación entre el incremento de la cohesión del suelo debido a las raíces y la densidad del enraizamiento no es constante para todas las especies, ni se produce de la misma manera en los distintos tipos de suelos. En algunos casos, la cohesión del suelo se incrementa de forma exponencial al aumentar la densidad de las raíces, en otros casos esta relación es lineal.

<b>Especie</b>	<b>Resistencia a la Tracción (MN/m<sup>2</sup>)</b>
<b>Árboles y Arbustos</b>	
<i>Alnus Incana</i>	32,0
<i>Betula Pendula</i>	37,0
<i>Cytisus Scoparius</i>	32,0
<i>Picea Sitchensis</i>	23,0
<i>Pinus Radiata</i>	18,0
<i>Populus Nigra</i>	5,0 – 12,0
<i>Populus Euramericana</i>	32,0 – 46,0
<i>Pseudotsuga Menziensis</i>	19,0 – 61,0
<i>Quercus Robur</i>	32,0
<i>Robina Pseudoacacia</i>	68,0
<i>Salix Purpurea</i>	36,0
<i>Salix Cinerea</i>	11,0

Tabla N°2.4: Resistencia a la tracción de las raíces de distintas especies (3)

Se tiene que el reforzamiento del suelo debido a la acción de las raíces es significativo si la densidad de enraizamiento es alta, y que la cohesión del suelo se incrementa rápidamente con el aumento de la densidad del enraizamiento hasta un valor determinado, por encima del cual se obtiene un efecto adicional muy pequeño. Este valor de densidad límite varía de unas especies a otras y depende de la textura del suelo.

### **Modelo Simplificado de Raíces Perpendiculares**

Tal como se establece en la publicación de Carmen Mataix González (3) este es un modelo matemático para cuantificar el efecto global del refuerzo del suelo proporcionado por las raíces. Considera las raíces como elementos que cortan perpendicularmente el plano de deslizamiento o rotura, y utiliza el análisis de equilibrio límite. Este análisis determina que el suelo es estable mientras que la resistencia final de los materiales a ser movilizados a lo largo del plano de rotura inducido en el suelo esté en equilibrio con las fuerzas que tienden a producir el movimiento. La premisa básica de este modelo de raíces perpendiculares, de que las raíces cruzan el plano de rotura en ángulo recto, no siempre es cierto (raíces herbáceas forman ángulos mayores a 90° y raíces de los árboles forman ángulos cercanos a 90° porque tienden a crecer pendiente arriba). En este modelo, la fuerza desarrollada sobre las raíces cuando el suelo se desplaza se resuelve con una componente tangencial al corte y una componente normal que incrementa el esfuerzo máximo admisible, y por tanto la resistencia a la tracción a lo largo del plano de deslizamiento.

El efecto de la resistencia a la tracción de las raíces en suelos vegetados puede ser modelado como un incremento de la resistencia al corte del suelo,  $\Delta S$ , mediante la ecuación:

$$\Delta S = t_R \cdot (\cos\theta \cdot \tan\phi + \text{sen}\theta)$$

$\Delta S$  = Incremento en la resistencia del suelo (KN/m<sup>2</sup>)

$\theta$  = Ángulo de rotación en el corte.

$\phi$  = Ángulo de fricción.

$t_R$  = Valor medio de la resistencia a la tracción de las raíces, por unidad de superficie de suelo (KN/m<sup>2</sup>)

El valor medio de la resistencia a la tracción se obtiene mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$t_R = T_R \cdot (A_R / A)$$

$T_R$  = Resistencia media a la tracción de las raíces o fibras (KN/m<sup>2</sup>).

$A_R / A$  = Relación raíces / superficie de suelo o fracción de superficie de una sección tipo de suelo que está atravesado por raíces.

$A_R$  se determina contando el número de raíces de las distintas clases de tamaño,  $n_i$ , que hay en una sección de suelo dada,  $A$ , y calculando la media de superficie,  $a_i$ , para cada clase de tamaño. Como en sistemas naturales de enraizamiento la resistencia a la tracción tiende a variar en función del diámetro o el tamaño de la raíz, esta última ecuación puede escribirse incluyendo un factor que indique el tamaño:

$$t_R = \sum T_i \cdot n_i \cdot a_i / A$$

Donde:

$T_i$  = Resistencia a la tracción de las raíces incluidas en la clase de tamaño  $i$ .

Considerando que el ángulo de rotación  $\theta$  varía entre  $45^\circ$  y  $70^\circ$  y que el ángulo de fricción  $\phi$  varía entre  $25^\circ$  y  $40^\circ$ , podríamos tomar valores medios, luego, tendríamos que el incremento de la resistencia al corte, se puede expresar así:

$$\Delta S = 1.15 \cdot t_R$$

Este modelo supone que el desplazamiento o la rotura del suelo se produce por exceso de tensión en las raíces, aunque el efecto de reforzamiento también puede perderse antes de que se haya alcanzado el límite de resistencia a tracción de las raíces por falta de adherencia o de cohesión en el sustrato, que induzcan o faciliten el movimiento de la masa de suelo. También en situaciones en las que el suelo en lugar de tensión soporta compresión, el efecto de reforzamiento por las raíces puede perderse o quedar minimizado, y la ruptura del terreno producirse por pandeo.

### **Anclaje, Contención y Arqueamiento**

Las raíces pivotantes y las raíces secundarias profundas de mayor tamaño de los árboles mejoran la estabilidad de las laderas al sujetar de forma mecánica la masa superficial de suelo, evitando su desplazamiento ladera abajo.

Este tipo de raíces penetran en profundidad y se insertan en las grietas y aberturas del macizo rocoso subyacente, haciendo una especie de cosido entre las capas superficiales, poco consistentes, y las capas profundas, mucho más firmes. A este efecto se le denomina *anclaje*.

El volumen de suelo que queda englobado entre las raíces y firmemente sujeto a las capas subyacentes puede asimilarse al de un

cilindro de diámetro y altura dependiente de la morfología y desarrollo del sistema radical.

La eficacia con la que la vegetación arbórea puede contribuir a estabilizar taludes a través de este efecto de anclaje depende de la profundidad relativa del perfil edáfico respecto a la capa rocosa (estrato estable), la profundidad de enraizamiento, la penetrabilidad de la roca por las raíces y la profundidad del nivel freático.

Por otro lado, los troncos de los árboles y sus raíces principales, junto con la masa de suelo que éstas engloban y que están sujetas por el efecto de anclaje, actúan como puntales o pilotes de contención, que sujetan la masa de suelo situada por encima de cada árbol individual en el talud, frenando su desplazamiento ladera abajo.

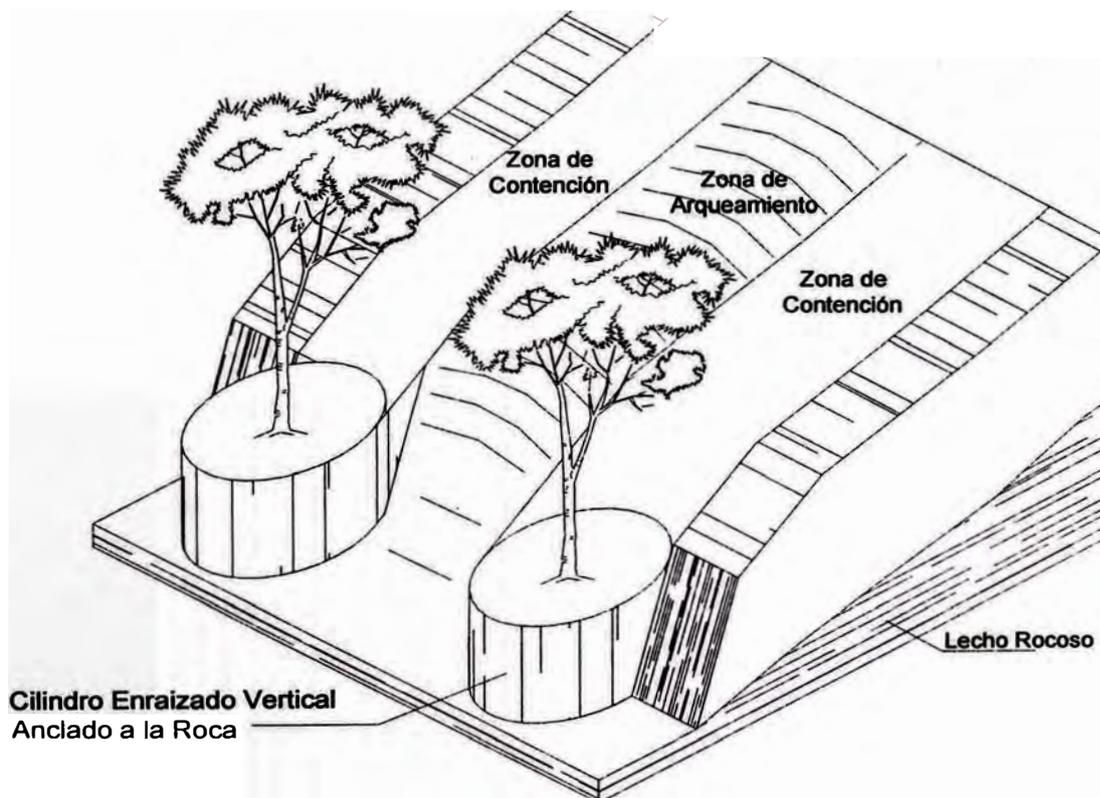


Fig. N° 2.7: Anclaje, contención y arqueamiento en una pendiente

Cuando la cubierta arbórea no es suficientemente densa, las franjas de suelo situadas entre ejemplares, y que, por tanto, no están sometidas a este efecto de contención, pueden llegar a ceder y comenzar a moverse ladera abajo, sufriendo una deformación denominada arqueamiento. Cuando la parte de suelo que ha cedido comienza a desplazarse, en la zona de contacto entre la masa que se desplaza y la

masa que permanece estacionaria se genera una fuerza de resistencia al corte opuesto al movimiento. Se produce una redistribución de fuerzas que reduce la presión en las zonas donde el suelo ha cedido y las incrementa en las zonas que permanecen estables, de forma que se moviliza la resistencia pasiva en los puntos de anclaje y/o contención.

Las fuerzas laterales generadas por esta transferencia de tensión desde la masa en movimiento a la masa estacionaria son las causantes del arqueamiento del suelo. Su magnitud está determinada por:

- La distancia entre ejemplares
- El diámetro de la sección de anclaje.
- El diámetro del tronco.
- El grosor y la inclinación del estrato de suelo susceptible al movimiento.
- La resistencia al corte del suelo.

La vegetación arbórea actúa de forma positiva sobre este tipo de movimientos, evitando su aparición cuando la cubierta es densa y los ejemplares están tan juntos que la función que realizan como elementos de anclaje y contención se extiende a la totalidad de la superficie de la ladera, y también estabilizando la masa del suelo en un punto cuando el movimiento se ha producido.

La distancia mínima o espaciamiento crítico que determina que se produzca el arqueamiento será directamente ligada a la cohesividad de la cara inferior de la masa de suelo. Un incremento en la cohesión efectiva supone un incremento sustancial del espaciamiento crítico.

### **Acuñamiento**

En algunos casos, la penetración de las raíces en los sustratos rocosos subyacentes puede contribuir a incrementar el riesgo de inestabilidad de las pendientes. Las raíces se introducen en las grietas y fisuras existentes en la roca o abren otras nuevas. Al desarrollarse las plantas, las raíces crecen en longitud y grosor, y fuerzan la apertura de las grietas y fisuras en las cuales se habían introducido, incrementando poco a poco su tamaño, en una forma de actuación similar a la de las cuñas. Esta acción puede resultar un factor desencadenante directo de inestabilidades en laderas propensas a desprendimientos y

deslizamientos translacionales, en los que la superficie de rotura se produce a favor de dichas discontinuidades de la roca.

Indirectamente, la penetración de las raíces en la roca incrementa el nivel de infiltración del terreno, y abre pasos al agua hacia zonas antes inaccesibles a ella, favoreciendo así la meteorización de las rocas en profundidad. Finalmente, cuando la planta muere, las raíces pierden su papel de anclaje y contención, y como consecuencia puede producirse la caída de las rocas en las que estaba enraizada la planta.

### **Sobrecargas: Peso de la Vegetación y Empuje del Viento**

La sobrecarga en las laderas se considera las correspondientes a la vegetación, principalmente a la vegetación arbórea, ya que las cubiertas arbustivas y herbáceas no resultan significativas comparadas con el peso total de la masa de suelo.

La componente horizontal del peso añadido se suma a las fuerzas desestabilizadoras y su componente vertical incrementa la fricción entre el suelo y la superficie de deslizamiento, es decir incrementa las fuerzas resistentes. De esta manera, la sobrecarga afecta a la ladera, tanto positivamente, como negativamente, dependiendo de la componente predominante. Aunque generalmente, predomina la componente vertical.

Una cubierta vegetal formada por árboles de gran tamaño puede incrementar la fuerza normal ejercida sobre la pendiente en más de  $5\text{kN/m}^2$ , aunque no más de la mitad de esta fuerza contribuye a incrementar la resistencia al corte del terreno.

Si la vegetación se concentra en la cabecera del talud se incrementa el riesgo de inestabilidad, ya que la resistencia cohesiva del suelo disminuye. Por el contrario, si la sobrecarga se aplica en la parte baja de la ladera se incrementa la estabilidad.

Además de esta sobrecarga del terreno debida al peso de la vegetación, ésta transmite al terreno la fuerza debida al empuje del viento como un incremento de carga que puede afectar a las capas superiores del terreno.

La magnitud de la fuerza de arrastre ejercida por el viento en los árboles depende básicamente de la velocidad del viento, altura de los árboles, extensión de la cubierta y la pendiente del talud.

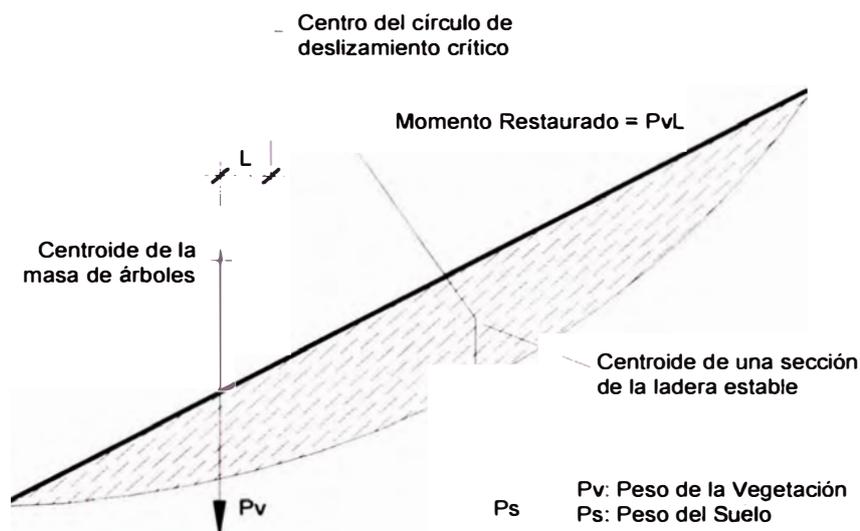


Fig. N°2.8: Efecto de la sobrecarga sobre la parte inferior de una superficie de deslizamiento.

La sobrecarga del viento sólo es significativa cuando su velocidad es superior a 11 m/s, y cuando su dirección es paralela a la línea de máxima pendiente.

El empuje del viento sobre los árboles también puede producir una desestabilización del talud y de los propios árboles. Si el viento sopla con suficiente fuerza o el árbol no está bien enraizado, puede producirse la rotación y vuelco de los árboles. Con ello además de desestabilizarse el sistema de fuerzas del talud, se incrementa el nivel de infiltración en la cicatriz producida.

## 2.2 Técnicas de Bioingeniería en el Tratamiento de Taludes

Tal como se establece en la publicación de Carmen Mataix González (3) la bioingeniería del suelo y la estabilización biotécnica son técnicas de tratamiento de taludes en las que se utiliza la vegetación como elemento principal de estabilización y control de la erosión. Antes de presentar las técnicas de bioingeniería, debemos definir:

- a) *Estabilización biotécnica*: este término hace referencia al uso combinado o integrado de elementos vegetales vivos y componentes mecánicos o estructurales inertes. los componentes inertes incluyen una variada gama de materiales: concreto, madera, piedra, geotextiles, etc.

- b) *Bioingeniería del suelo*: es un término más específico que se refiere principalmente a la utilización de plantas completas o esquejes (fragmentos de tallos, raíces o ramas con capacidad de enraizar y desarrollar una planta adulta completa). como elementos ÚNICOS en la estabilización de taludes. La acción de la vegetación puede potenciarse mediante la instalación de geotextiles o geomallas de protección superficial.
- c) *Las Construcciones Vivas* engloban las técnicas convencionales de revegetación, cuya función principal es la prevención y el control de la escorrentía superficial, junto con otras técnicas específicas de la bioingeniería del suelo, en las que se utilizan esquejes de especies leñosas para desarrollar una cubierta vegetal estable y autosuficiente que actúe como un componente estructural para el refuerzo y estabilización del talud.
- d) *Las Construcciones Mixtas*, son las que utilizan elementos vivos e inertes de forma combinada, los elementos inertes (gaviones, escolleras, revestimientos, etc) en un primer momento proporcionan al talud resistencia frente a los procesos erosivos y de inestabilidad, pero su importancia como agentes de estabilización va disminuyendo progresivamente al desarrollarse la cubierta vegetal.

### 2.2.1 Construcciones Vivas

#### a) Estaquillado

##### *Descripción*

Consiste en introducir en el suelo estaquillas de plantas leñosas, con capacidad para arraigar y desarrollar una planta adulta, de longitud y grosor suficiente para que puedan ser clavadas en el suelo como estacas. Cuando las estaquillas arraigan crean una matriz de raíces que estabilizan el suelo por refuerzo y cohesión de sus partículas y reducen el exceso de humedad. Este tipo de plantas enraizan rápidamente y comienzan a drenar el talud al poco tiempo de ser instaladas, y además son capaces de desarrollarse en sustratos carentes totalmente de suelo.

##### *Aplicaciones y Efectividad*

Esta técnica está recomendada para reparar pequeños deslizamientos y asentamientos originados por un exceso de humedad o en sitios en los

que las condiciones de inestabilidad no sean graves. También puede utilizarse para fijar a la superficie del talud, materiales de control de la erosión, como redes y mantas orgánicas, geotextiles, etc. Cuando las estaquillas han desarrollado plantas adultas, la cubierta vegetal mejora las características del suelo y crea condiciones adecuadas para que el espacio tratado pueda ser colonizado por otras especies nativas.

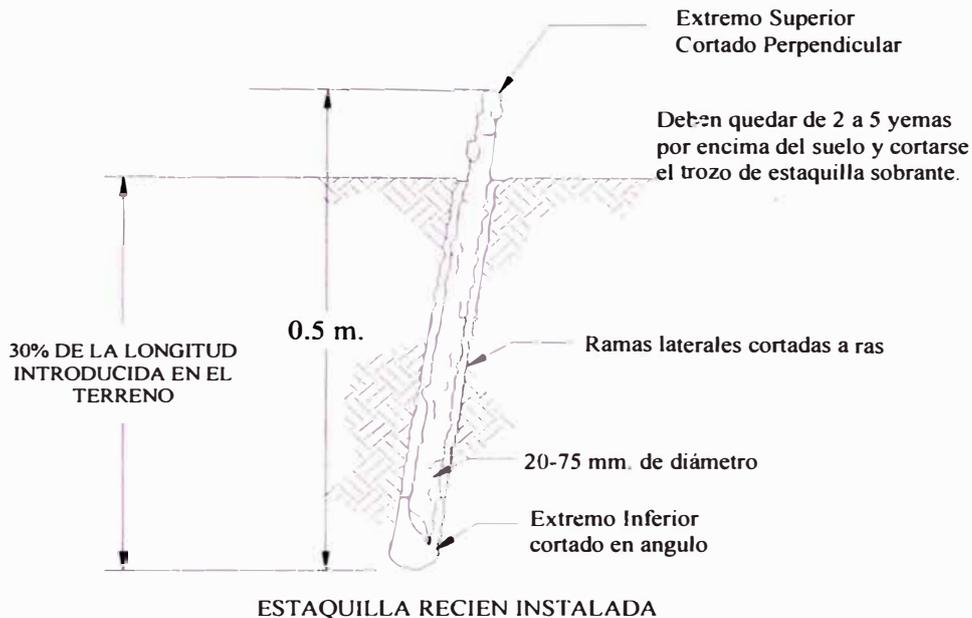


Fig. N° 2.9: Técnica de Estaquillado

### *Materiales y Preparación*

Las estaquillas se obtienen de ejemplares de más de dos años de edad, vigorosos y sin enfermedades. Los más adecuados son aquellos de entre 2 y 5 años, que tengan la corteza fina y sin muchas estrías.

Su tamaño oscila entre 20 y 75 mm de diámetro y 0.5-1 m de longitud. Si se van a insertar en gaviones o escolleras su diámetro debe ser mayor para que sean suficientemente resistentes y no se quiebren al ser introducidas. En el caso de que el talud a tratar tenga un nivel freático estable, es conveniente utilizar estaquillas con longitud suficiente para que lleguen hasta el nivel de estiaje. Al preparar las estaquillas deben eliminarse las ramas laterales y dejar la corteza intacta. El extremo inferior se corta en ángulo, para facilitar su inserción en el suelo, y el superior plano. Es conveniente sumergir en agua las estaquillas durante 24 horas antes de su instalación.

### *Instalación*

La instalación puede iniciarse en cualquier punto del talud. Las yemas de crecimiento deben quedar orientadas hacia arriba. Las estaquillas se clavan en el suelo en ángulo recto con un golpe seco de martillo o puede abrirse un hoyo con un pico. Las cuatro quintas partes de la estaquilla deben quedar enterradas y el suelo compactado alrededor. Las estaquillas se sitúan en filas con una separación de entre 0.3 y 1.0 m. La densidad recomendada es de 3 a 5 estaquillas/m<sup>2</sup>.

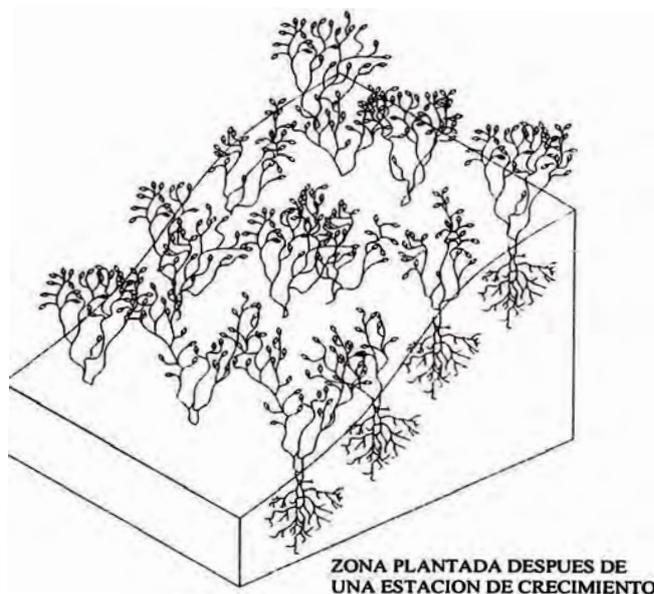


Fig. N° 2.10: Técnica de Estaquillado

### **b) Fajinas**

#### *Descripción*

Son manojos de ramas y tallos atados en forma de huso que se colocan en el fondo de zanjas poco profundas, excavadas transversalmente siguiendo el contorno del talud, y que se recubren parcialmente de tierra. Para evitar que se muevan pueden fijarse con estacas de madera o con estaquillas de la misma especie. Si el talud no presenta problemas de exceso de agua, las zanjas donde se instalan las fajinas se excavan en ángulo recto con la línea de máxima pendiente. Si hay problemas derivados de un exceso de humedad, es conveniente darles una ligera pendiente hacia los laterales del talud para evacuar el exceso de agua.

#### *Aplicaciones y efectividad*

Las fajinas constituyen una técnica de estabilización muy efectiva que protege los taludes frente a deslizamientos superficiales (0.25 – 0.75 m

de profundidad) y que permite escalonar o banquear la pendiente de los taludes cuando la excavación es difícil.

La matriz de raíces que se desarrolla a partir de las fajinas proporciona efectos de contención y retención de las capas superficiales del suelo. Evita, además, la formación de cárcavas y barrancos y protege el talud frente a la erosión superficial, ya que, con su instalación, se reduce la longitud efectiva de la pendiente al quedar ésta dividida en tramos más cortos por las sucesivas fajinas, lo que disipa la energía erosiva del agua.

Al desarrollarse las plantas, en sitios excesivamente húmedos se favorece la infiltración, al reducir la velocidad de la escorrentía, y en sitios secos se incrementa el volumen de agua disponible. En las terrazas que se forman entre filas sucesivas de fajinas quedan, además, retenidas las partículas que arrastra la escorrentía superficial, con lo que se reduce así las necesidades de conservación de cunetas.

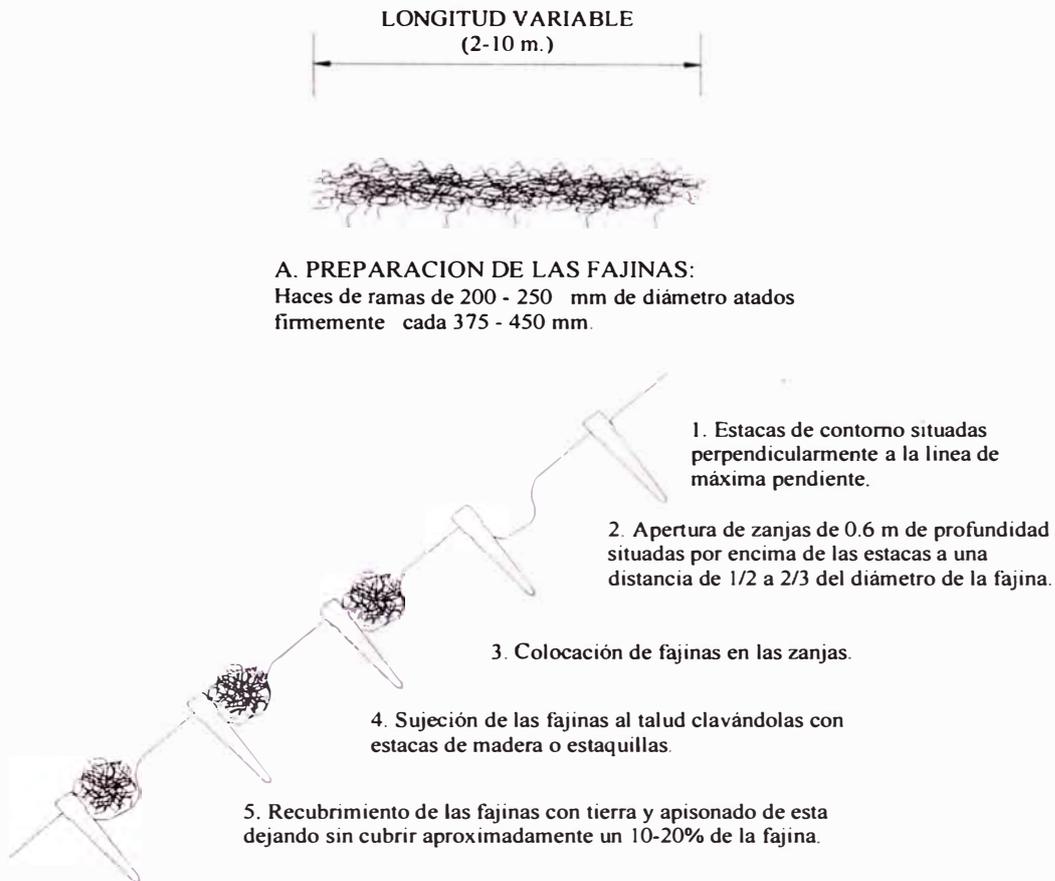
#### *Materiales y Preparación de las Fajinas*

Para construir las fajinas se utilizan ramas y tallos de plantas leñosas con alta capacidad de enraizamiento. Las ramas deben ser largas, rectas y flexibles y estar provistas de yemas de crecimiento activas. Se suelen utilizar especies tales como sauces (*Salix sp*), abedules (*Betula sp*), alisos (*Alnus sp*) y chopos (*Populus sp*).

Al elegir el material vegetal conviene tener en cuenta que las plantas jóvenes (menores de 1 año) desarrollan las yemas de crecimiento con mucha facilidad, los ejemplares adultos tienen mayores reservas vegetativas y los de mayor edad son más resistentes.

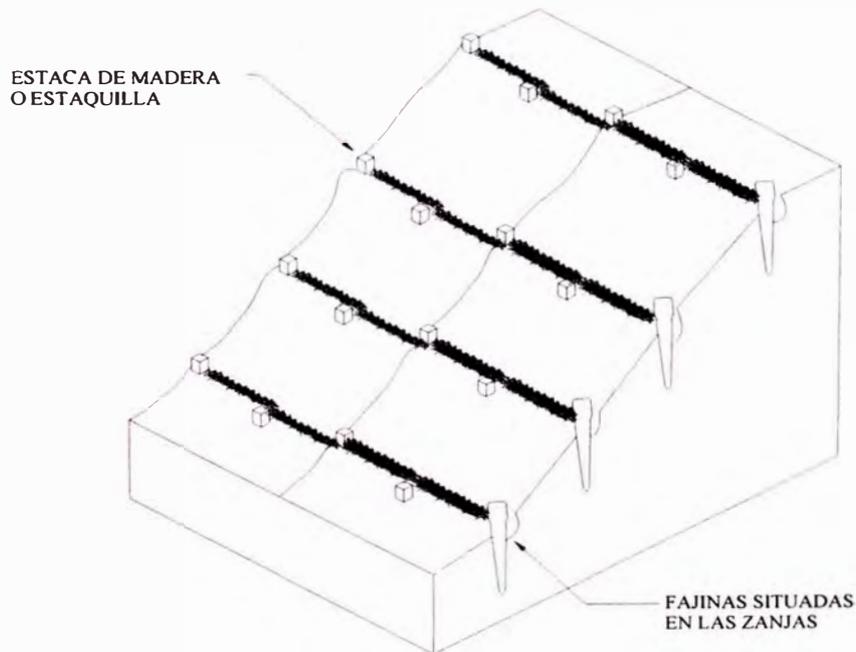
Conviene, por tanto, mezclar material de todas las edades, procurando que la mayoría corresponda a ejemplares de entre 1 y 4 años. Para construir la fajina se emplean ramas de entre 1 y 9 m de longitud y entre 15 y 30 mm de diámetro. Las ramas se agrupan para formar un haz y se atan cada 30 –50 cm con bramante o cuerda fina hecha con fibras vegetales. Las dimensiones recomendadas para la fajina completa son de 15 a 30 cm de diámetro y de 2 a 10 m de longitud, aunque estas dimensiones pueden variar dependiendo de las condiciones particulares de la zona de actuación. Las yemas apicales de

Fig. N° 2.11: Instalación de las Fajinas



B. PROCESO DE INSTALACION ( SECCION)

La instalación se inicia en el pie del talud y se continua hacia la cabecera siguiendo los pasos 1 al 5.



C. SITUACION FINAL DEL TALUD TRATADO

### c) Fajinas Como Sistemas de Drenaje

Las fajinas pueden utilizarse para recoger y evacuar la escorrentía superficial en taludes muy húmedos donde el origen de la inestabilidad está en el exceso de agua en el interior del talud.

Tenemos 2 métodos usados:

- Fajinas dispuestas en espina de pescado
- Fajinas asociadas a drenes de interceptación

#### **Fajinas Dispuestas en Espina de Pescado**

##### *Descripción y funcionamiento*

Son filas de fajinas dispuestas en el talud formando una estructura en espina de pescado, es decir, con un fila paralela a la línea de máxima pendiente hacia la que convergen en ángulo dos series de filas laterales. Los brazos laterales se construyen con fajinas simples y el cuerpo central con tres fajinas agrupadas. Las fajinas actúan como canales de drenaje recogiendo y conduciendo las aguas hacia la base del talud.

##### *Instalación*

Para su instalación primero se excava la zanja central comenzando a poca distancia de la cabecera del talud y progresando hacia su pie. Esta zanja debe tener sección trapezoidal, con una profundidad de entre 40 y 50 cm, entre 30 y 40 cm de anchura en el fondo y de 40 a 50 cm de ancho en la parte alta.

Las zanjas laterales también comienzan a excavar en la parte alta del talud, dándoles un ángulo de inclinación hacia la zanja central de 20 a 45° y con una separación entre zanjas consecutivas de entre 1 y 2.5m. Las dos primeras zanjas deben estar situadas unos metros por debajo del comienzo de la zanja central.

La longitud de las zanjas laterales debe ser tal que asegure la recolección de toda la escorrentía generada en la superficie del talud. La primera fajina del cuerpo central de la estructura se sitúa en el fondo de la zanja y se clava al terreno cada metro a lo largo de toda su longitud con estacas de madera. Esta fajina se construye con ramas capaces de enraizar, aunque no suelen lograrlo dada la profundidad de su

emplazamiento. Las otras dos fajinas del cuerpo central se sitúan por encima de ella, una a cada lado, se clavan también con estacas. Una vez instaladas las fajinas del cuerpo central se instalan las laterales en las zanjas excavadas anteriormente.

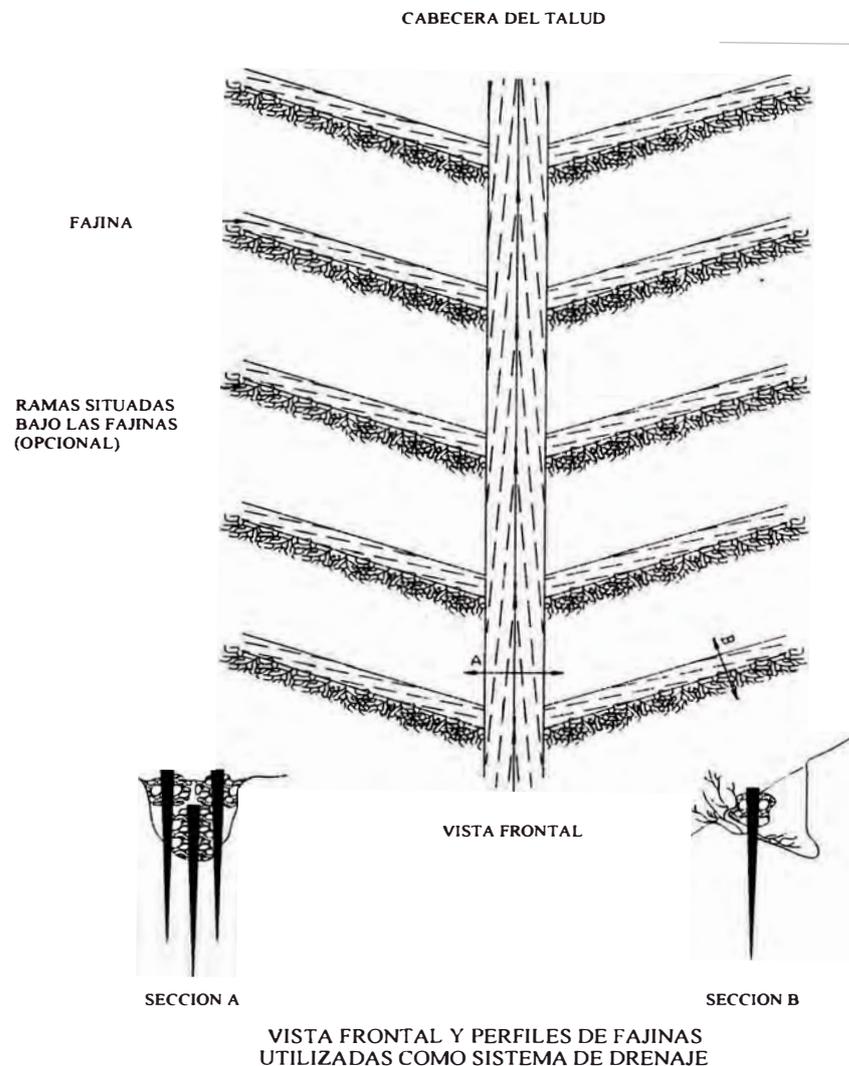


Fig. N° 2.12: Vista frontal y perfiles de fajinas utilizadas como sistema de drenaje.

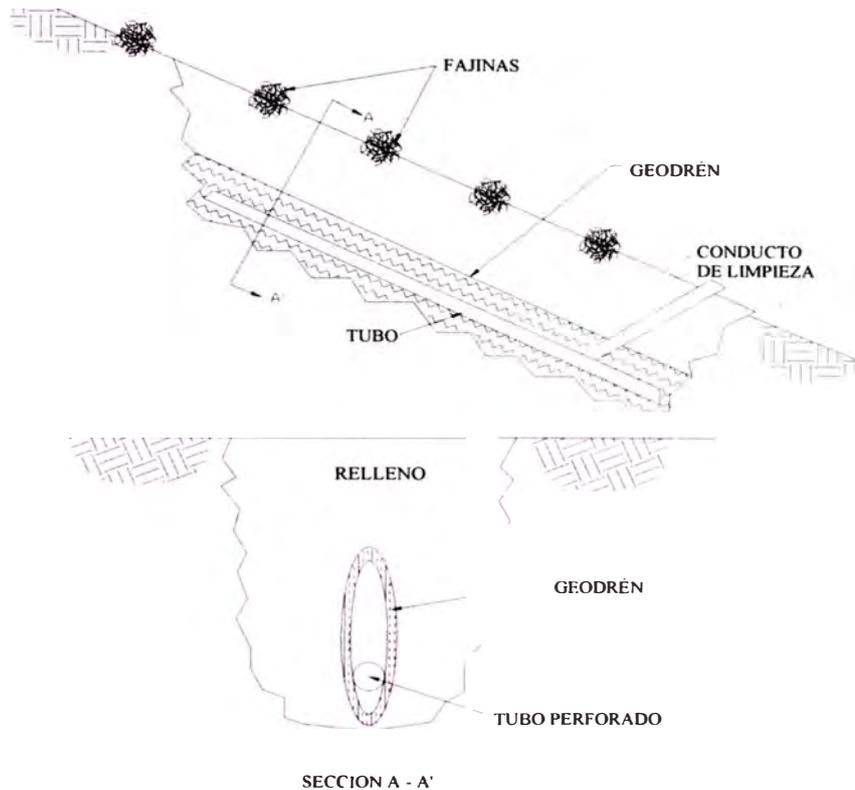
### Fajinas Asociadas a Drenes de Intercepción

#### Descripción

Las fajinas se sitúan bordeando el contorno del talud, similar a lo descrito anteriormente, pero se construye también un drenaje subsuperficial, orientado pendiente abajo y perpendicular a ellas, en una zanja axial excavada por debajo de las fajinas, para interceptar la escorrentía subsuperficial y conducirla a la base del talud.

#### Preparación e Instalación

Las fajinas se preparan y se instalan de la forma convencional, anteriormente descrita. Se excava la zanja de drenaje y se sitúa en su fondo un tubo perforado. Para evitar que éste se tapone con sedimentos se protege con un geotextil o un geodrén.



PERFIL DE UN SISTEMA DE FAJINAS CONSTRUIDO SOBRE UN DRENAJE SUBSUPERFICIAL

Figura N°2.13: Perfil de un sistema de fajinas construido sobre un drenaje subsuperficial

#### d) Escalones de Matorral

##### Descripción

Esta técnica consiste en situar ramas de especies leñosas con capacidad para enraizar en pequeñas zanjas o entre capas sucesivas de tierra a lo largo de la pendiente de los taludes, de manera que formen una especie de terraza o escalones. Esta técnica difiere de las fajinas en la orientación de las ramas y la profundidad a la que éstas se sitúa.

En los escalones de matorral las ramas se orientan más o menos perpendicularmente al perfil del talud y se introducen hasta dos metros dentro de él, mientras que las fajinas se sitúan paralelas al perfil del talud y se entierran muy someramente.

Las ramas actúan como elementos de tensión que refuerzan el talud y las porciones de las ramas que sobresalen sobre la superficie actúan frenando la escorrentía disipando su potencial erosivo.

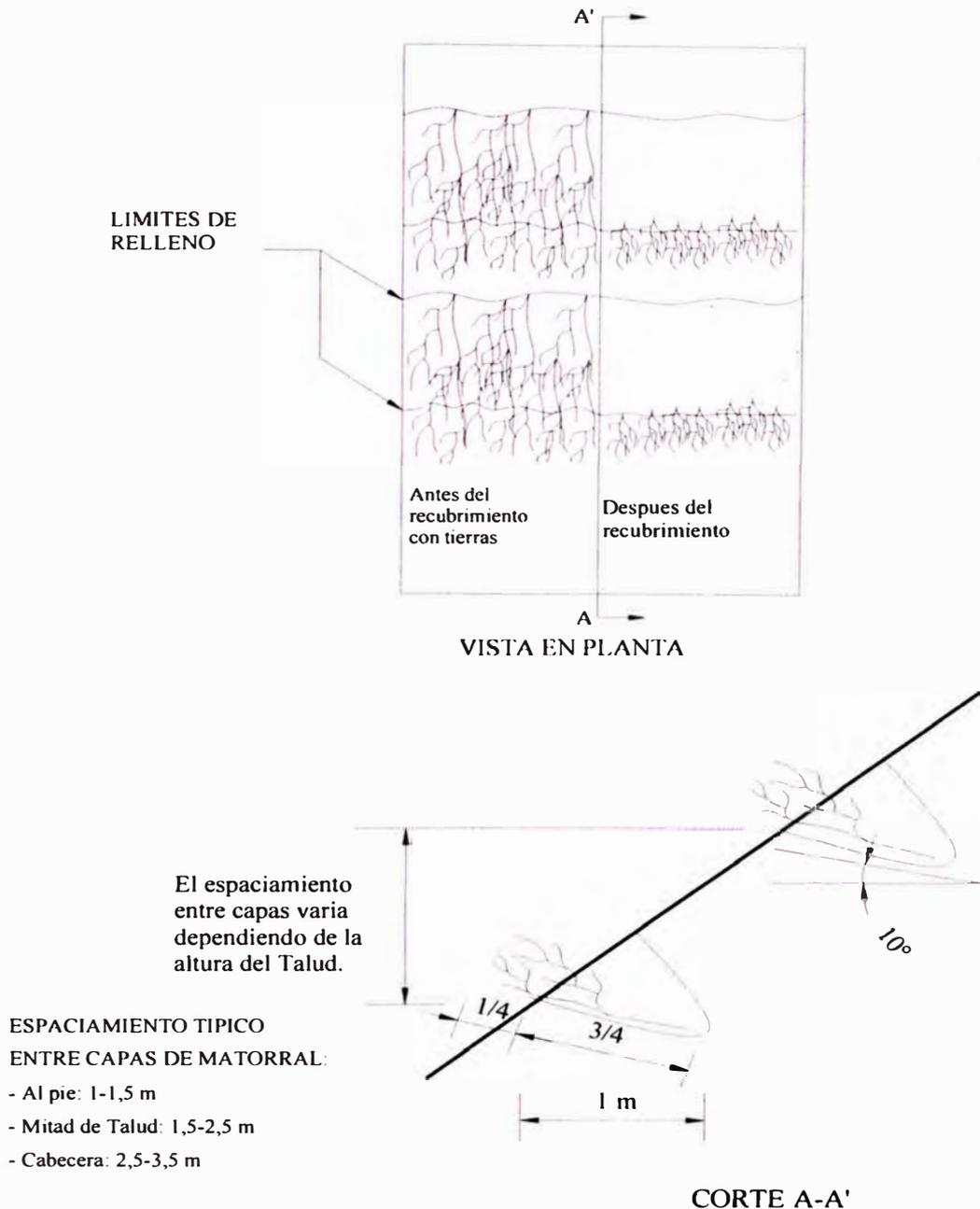


Fig. N° 2.14: Escalones de Matorral

### Aplicaciones y Efectividad

Esta técnica proporciona de forma inmediata varios efectos positivos en cuanto al control de la erosión, el refuerzo del suelo y la estabilidad de los taludes frente a movimientos en masa. La pendiente del talud queda dividida en una serie de escalones separados por las filas de matorral, lo que disminuye la longitud efectiva de la pendiente y con ello la capacidad

erosiva de la escorrentía. Las ramas introducidas en el talud refuerzan el suelo ya antes de que se desarrollen las raíces, e incrementan de forma significativa su resistencia al deslizamiento y a los movimientos rotacionales. La vegetación desarrollada a partir de las ramas retiene los sedimentos y mejoran las condiciones de infiltración en los suelos secos y drenan los suelos excesivamente húmedos.

Mejoran las condiciones microclimáticas y facilitan el desarrollo de la vegetación y la regeneración natural. Los escalones de matorral redireccionan y mitigan los efectos del drenaje interno del talud al actuar como drenes horizontales.

### *Materiales y Preparación*

Se utilizan ramas de 20 – 500 mmm de diámetro y longitud suficiente para que lleguen al final de la zanja (1 – 2.5 m). Los laterales de las ramas deben permanecer intactos. Se suelen utilizar ramas de sauce (*Salix sp*), aliso (*Alnus sp*) o chopo (*Populus sp*).

### *Instalación*

La excavación de las zanjas se inicia al pie del talud y se va avanzando hacia la cabecera, de forma que el material excavado en cada zanja superior sirva para el relleno de la siguiente inferior. Las zanjas deben tener contrapendiente de entre 10 y 20° hacia el talud. Su anchura suele ser de entre 0.5 y 1.0 m. Si existen problemas de drenaje debe dárseles una ligera pendiente hacia el borde del talud. Las ramas se introducen en la zanja perpendicularmente a la superficie del talud, con las yemas de crecimiento hacia fuera. Los extremos de las ramas en los que están situadas la yemas de crecimiento deben sobresalir al menos 15 – 30 cm fuera de la zanja (1/4 de su longitud total). Las ramas se colocan de forma entrecruzada para formar una especie de estera de entre 75 y 200 mm de espesor. Una vez que las ramas han sido colocadas en el interior de las zanjas, se cubren con tierra. Este relleno debe compactarse para eliminar las bolsas de aire. Las yemas de crecimiento deben quedar situadas ligeramente fuera del relleno.

La distancia entre zanjas sucesivas varía dependiendo de la pendiente del talud y de sus condiciones previas de estabilidad.

Pendiente (H:V)	DISTANCIA ENTRE ZANJAS (m)		Long. Máx. Pendiente (m)
	Taludes Húmedos	Taludes Secos	
2:1 a 2.5:1	1.00 – 1.25	1.50 – 1.75	4.50
2.5:1 a 3:1	1.25 – 1.50	1.75 – 2.50	4.50
3:5 a 4:1	1.50 – 1.75	2.00 – 3.00	6.00

Tabla N°2.6: Distancia recomendada entre escalones de matorral

Es conveniente tratar la superficie de talud comprendida entre zanjas adyacentes para protegerla frente a la erosión. Si el talud entre las filas de zanjas consecutivas tiene una pendiente de 3H:1V o inferior es suficiente sembrar el espacio y extender una capa de mulch o fibra larga, si la pendiente es superior, conviene usar una manta orgánica.

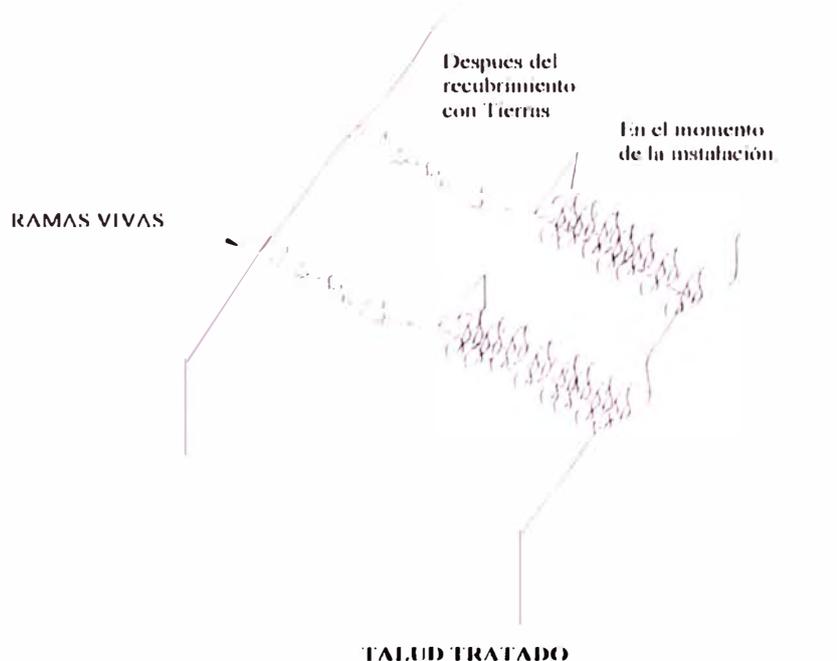


Fig. N° 2.15: Escalones de Matorral – Vista en isométrico

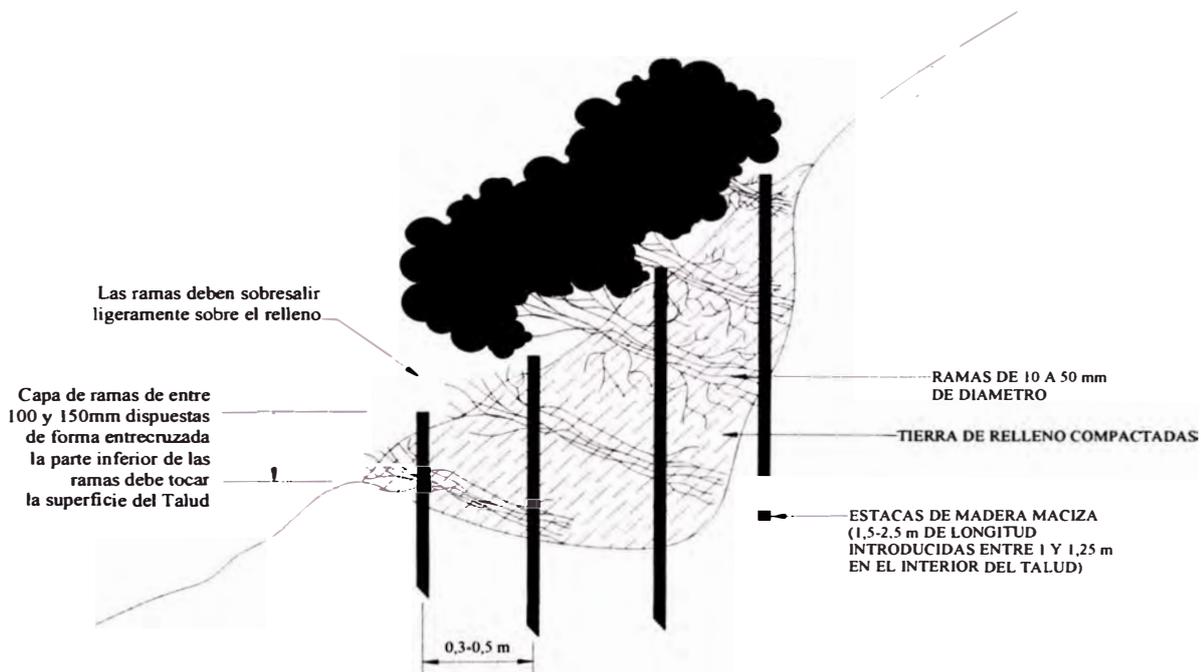
### e) Paquetes de Matorral

#### Descripción

Es una técnica que se utiliza para reparar las depresiones ocasionadas por pequeños deslizamientos. Consiste en rellenar la depresión que se quiere reparar con capas alternas de ramas de matorral y tierras de relleno compactadas. Esta técnica sólo puede utilizarse en áreas de deslizamiento menores de 1 m de profundidad y/o 2 m de anchura.

### Aplicaciones y Efectividad

Esta técnica es efectiva para el refuerzo y la estabilidad frente a movimientos en masa en taludes de pequeño tamaño. Las ramas actúan como tirantes que refuerzan el suelo una vez instaladas. Cuando comienzan a crecer y desarrollar follaje, frenan la escorrentía y disipan su energía erosiva. Las raíces enlazan el material de relleno y lo anclan al sustrato de suelo natural, formando una masa unificada. La vegetación desarrollada actúa como barrera, reduciendo la erosión y el socavamiento de los materiales.



#### PAQUETES DE MATORRAL

Fig. N° 2.16: Paquetes de matorral

### Materiales y Preparación

Los materiales que se emplean son ramas con capacidad de enraizamiento de 10 a 50 mm de diámetro y longitud suficiente para llegar a contactar con la superficie del talud en el fondo de la depresión que se está reparando y sobresalir ligeramente por la parte externa.

También se usan estacas de madera de 1.5 a 2.5 m de largo y 75 a 100 mm de diámetro. La longitud de las estacas varía dependiendo de la profundidad del deslizamiento.

### Instalación

La instalación comienza por el punto más bajo de la zona a reparar, hincando las estacas de madera verticalmente de entre 1 y 1.25m y

distanciadas entre 15 y 30 cm. Se sitúa una capa de ramas de entre 10 y 15 cm de espesor en el fondo del deslizamiento y entre las estacas verticales, perpendicularmente a la cara del talud. Las ramas deben situarse entrelazadamente con los extremos de las yemas de crecimiento orientadas hacia la superficie del talud. Algunas de ellas deben tocar la superficie del talud en el fondo del deslizamiento. Las siguientes capas de ramas se colocan con el extremo final más bajo que el extremo que tiene las yemas de crecimiento.

Cada capa de ramas se cubre con una capa de tierra compactada para asegurar un íntimo contacto con el suelo. Una vez concluida la instalación, el perfil final del relleno de ramas y tierra debe enrasar con la superficie del talud y las ramas sólo deben sobresalir ligeramente sobre la capa del relleno. La tierra de relleno debe humedecerse para evitar que las ramas se dessequen.

#### **f) Reparación de Cárcavas con Material Vivo**

##### *Descripción*

Es una técnica muy parecida a la de los paquetes de matorral, pero más adecuada para reparar depresiones ocasionadas por erosión superficial, como regueros profundos y cárcavas. Consiste en rellenar el reguero o la cárcava que se pretende reparar con capas alternas de ramas y tierras compactadas. Las ramas proporcionan un efecto inmediato de refuerzo del suelo tras su instalación, disminuyen la velocidad de circulación del agua de escorrentía y actúan como una barrera filtro para el material arrastrado.

##### *Instalación*

Se utilizan ramas de 10 – 50 mm de diámetro, lo suficientemente largas para tocar el terreno no alterado en el fondo de la cárcava y sobresalir ligeramente fuera del perfil de pendiente reconstruida.

La instalación se comienza por el punto más bajo de la zona de actuación colocando las ramas perpendicularmente a la pendiente, de manera que forme capas de 70 a 100 mm de espesor. Las ramas deben disponerse entrecruzadamente, orientando los extremos con las yemas de crecimiento hacia la cara del talud y con el extremo basal situado más

bajo que el de crecimiento. Cada conjunto de ramas se cubre con una capa de tierras de 150 a 200 mm de espesor que posteriormente se compacta.

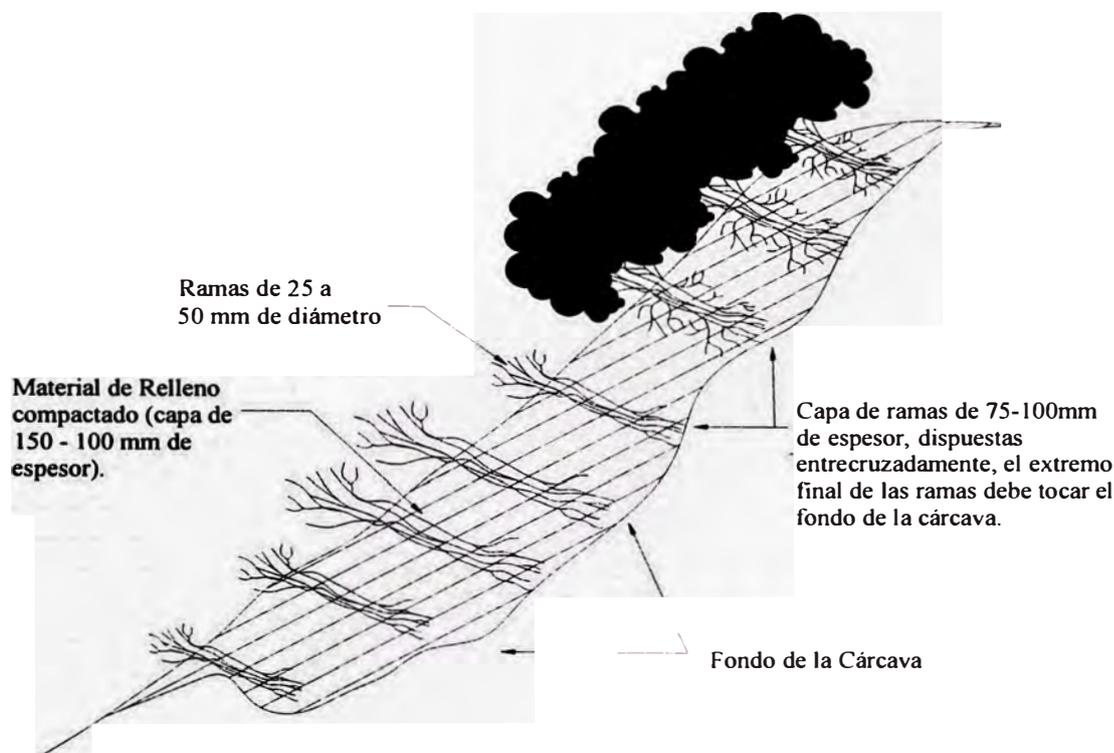


Fig. N° 2.16: Reparación de cárcavas con material vivo

### g) Esteras de Matorral

#### *Descripción*

Consiste en recubrir la superficie del talud con una capa gruesa de ramas atadas y entrelazadas de manera que formen una especie de colchón o estera, o simplemente extendidas sobre el terreno y ancladas a él por medio de estacas de madera o estaquillas y alambre.

#### *Aplicaciones y Efectividad*

Las estereras protegen el talud de forma inmediata frente a la acción de la corriente y desarrollan en una o dos estaciones una espesa franja de vegetación arbustiva. Por otro lado, crean una superficie de fricción que reduce la velocidad de la corriente en la franja de contacto con el talud y con ello su energía erosiva. Las ramas retienen los sedimentos y materiales que arrastra la corriente y crean un colchón protector que aísla la superficie de la orilla de la acción directa del agua.

### *Materiales y Preparación*

Se utilizan ramas de sauce, aliso u otras especies que enraícen con facilidad y estén adaptadas a condiciones de encharcamiento periódico. Para el anclaje de las ramas se utilizan estaquillas de la misma especie, estacas de madera o clavos metálicos y alambre galvanizado.

### *Instalación*

La zona donde se va a instalar la estera de matorral debe ser despedregada, limpiada de ramas y otros elementos y ligeramente modelada en pendiente, para lograr una superficie más o menos uniforme que permita un buen contacto entre las masas y el suelo. A continuación, se excava una zanja de 20 – 30 cm de profundidad justo por debajo del nivel mínimo estacional de la lámina de agua. Las ramas se sitúan dentro de la zanja con el extremo inferior orientado hacia la cara del talud y perpendicularmente al perfil de la orilla o borde inferior del talud.

La capa de ramas dispuesta sobre el talud deberá tener un espesor tal que cuando sea comprimida por los alambres de sujeción y anclaje su grosor sea de al menos 10 cm. El extremo inferior de las ramas se sujeta con troncos, piedra de escollera o fajinas.

Posteriormente, se clavan una serie de estaquillas o estacas de madera maciza (5 a 10 cm de diámetro) atravesando la capa de ramas, y se ata a ellas alambre galvanizado de 3 mm de grosor, de manera que se forme una red romboidal por encima de las ramas. Este alambre debe quedar bien tensado para que sujete firmemente la capa de ramas.

Las estacas o estaquillas deben ser de longitud suficiente para atravesar la capa de ramas, introducirse firmemente en el talud y sobresalir por encima de ella. Una vez instalada y sujeta, la capa de ramas se recubre parcialmente con una capa de tierra de entre 3 y 5 cm de espesor.

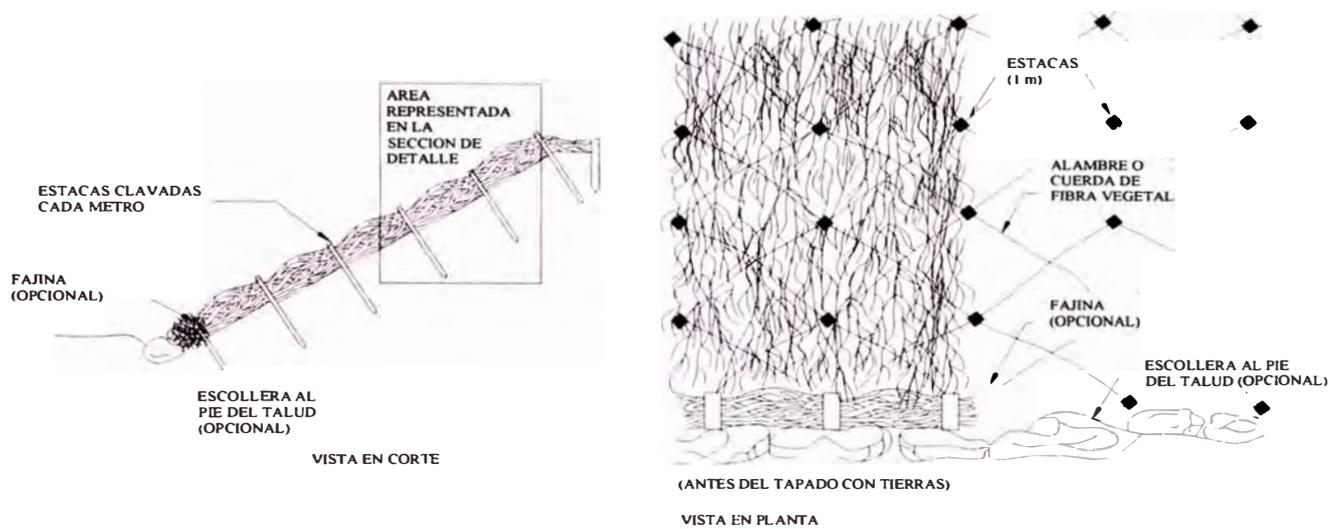


Fig. N° 2.17 (a): Esteras de Matorral – Proceso Constructivo

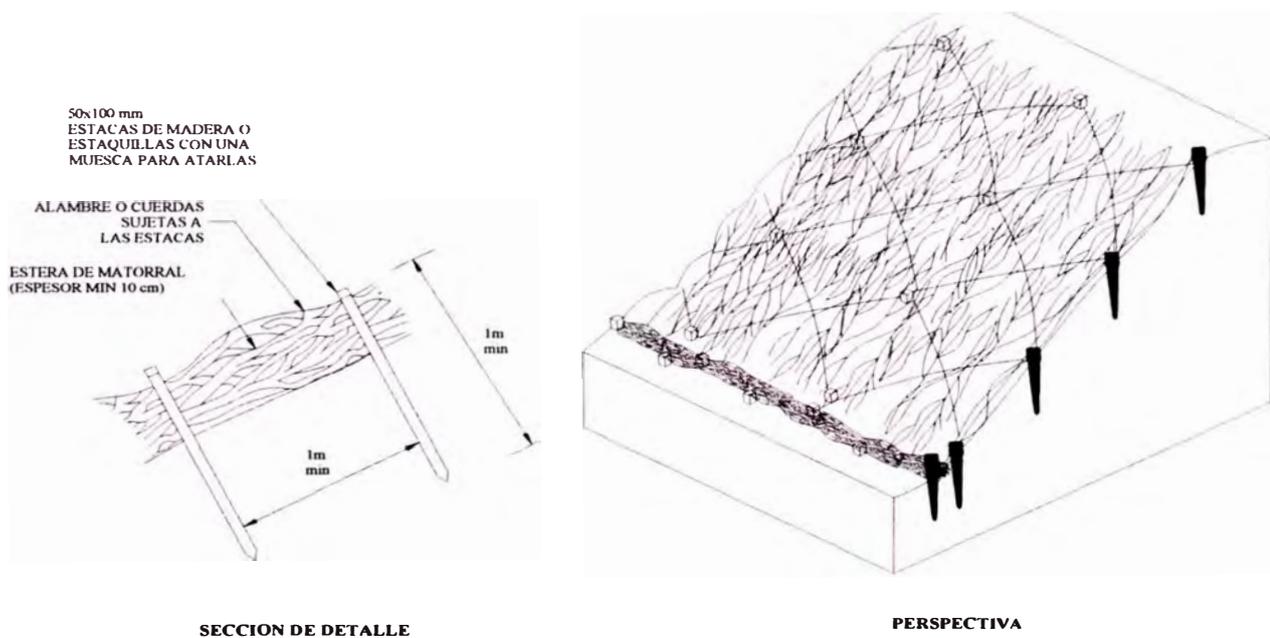


Fig. N° 2.17 (b): Esteras de matorral – Proceso Constructivo

## 2.2.2 Construcciones Mixtas

Consideramos de entre las construcciones mixtas a aquellas que tengan una mayor relación a las técnicas de bioingeniería, tales como las estructuras de tierra reforzada y muros vivientes. En estas el papel principal en la estabilización corresponde a la vegetación, y los elementos inertes cumplen únicamente una función temporal de estabilización hasta que ésta se desarrolle plenamente.

Existen construcciones mixtas, tales como el estaquillado de revestimientos de piedra o los muros de piedra y vegetación, basados en técnicas de estabilización biotécnica, donde la vegetación actúa en forma conjunta o integrada con los elementos y estructuras inertes, sin llegar a ser esencial. Por tal motivo no serán contempladas.

#### **a) Estructuras de Tierra Reforzada**

##### *Descripción*

Es una técnica muy similar a la de los escalones de matorral. La diferencia radica en que las estructuras de tierra reforzada se alternan capas de tierra y ramas de poco espesor con capas mucho más gruesas de relleno envueltas en un geotextil.

Las sucesivas capas de tierras de relleno reforzadas forman una estructura que, en un primer momento, actúa como un muro de contención, sujetando al talud. Cuando las ramas arraigan, emiten raíces, las cuales se introducen entre la cubierta de geotextil y el material de relleno, formando con ellas una masa coherente y sólida.

##### *Aplicaciones y Eficacia*

Esta técnica es una alternativa a los muros de contención convencionales que permite estabilizar taludes de gran pendiente. Las capas de matorral actúan como drenajes horizontales que evacúan el exceso de humedad de los taludes mejorando sus condiciones de estabilidad. Se puede utilizar también para proteger taludes expuestos a socavación periódica o a fuerzas de tracción, como sucede en las orillas de canales y cursos naturales de agua.

##### *Materiales y Preparación*

Las tierras de relleno se envuelven con geotextiles o geomallas sintéticas cuyas características dependen del esfuerzo cortante que tengan que resistir hasta que la vegetación se desarrolle y asuma las funciones de estabilización. Para definir el perfil de relleno en las capas sucesivas de tierras reforzada y acomodarlo al contorno natural del talud, se utilizan unas guías formadas por una serie de ángulos metálicos que sujetan tablas o listones de madera, colocados de tal manera que señalan la altura máxima y el perfil transversal de relleno para cada piso de la estructura. Es conveniente disponer de tablas de distintas longitudes y

que, en general, éstas sean cortas (0.5 – 2.5 m) para poder seguir con más exactitud el perfil del talud. Como material vegetal se utilizan ramas de sauce (*Salix sp*), Aliso (*Alnus sp*) de entre 10 y 50 mm de diámetro. La longitud de las ramas varía dependiendo de la profundidad que vaya a tener la estructura. Las ramas deben ser lo suficientemente largas para contactar con la base del talud y sobresalir sobre las capas de tierra.

### Instalación

Antes de iniciar la construcción se excava el talud para crear una cavidad en la que ira encajada la estructura de tierra reforzada. El fondo de esta excavación debe tener una contrapendiente de entre 10 y 15°. Es conveniente excavar una zanja al pie del talud y rellenarla de roca de escollera para crear una superficie firme de asiento sobre la que construir la estructura de tierra reforzada. La parte superior de este relleno debe tener una contrapendiente igual al ángulo de inclinación que se desee dar a la estructura. Sobre esta base de roca, o en el fondo de la excavación, se extiende una capa de tierra de 150 – 200 mm de espesor mínimo dentro de la que se coloca una capa de ramas de 150 mm. Las ramas deben ser lo suficientemente largas para sobresalir al menos un 20 – 25% sobre el límite de la zona excavada y contactar por el otro extremo con la cara del talud.

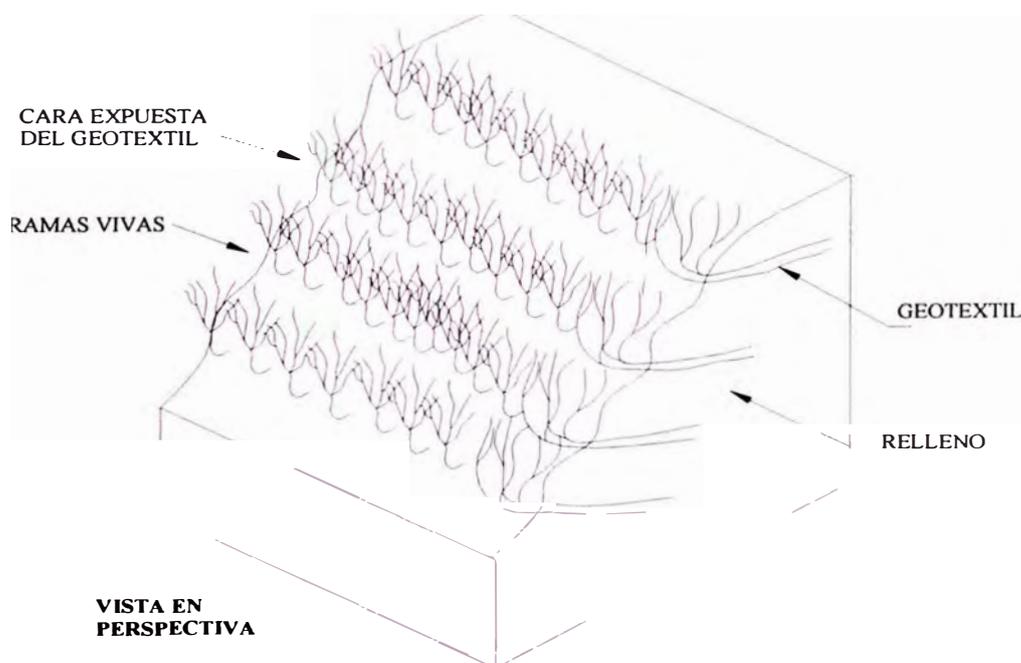


Fig. N° 2.18: Estructura de tierra reforzada – Perspectiva

El conjunto de tierras y ramas se compacta ligeramente para eliminar las bolsas de aire y lograr un contacto óptimo. Si la construcción se realiza en época de sequía, es conveniente regar cada piso de tierra y ramas al finalizar su instalación para evitar que se des sequen. Las ramas se colocan de forma entrelazada, evitando que queden paralelas unas a otras. El extremo que lleva las yemas de crecimiento se dispone hacia el exterior. Conviene mezclar ramas de diferentes grosores y procedentes de ejemplares de distintas edades. Después se colocan los ángulos y las tablas guía para marcar la línea de relleno, se extiende un geotextil sobre la capa de tierra y ramas ya instalada y se asegura éste con dos filas de estacas de madera, una clavada en la capa inferior de relleno y la otra en el talud. El geotextil debe ser lo suficientemente ancho para que envuelva la siguiente capa de relleno. Una vez asegurado el geotextil se procede a rellenar para crear el siguiente piso de la estructura, compactando ligeramente las tierras aportadas y manteniendo la contrapendiente de 10 a 15°. El geotextil sobrante se dobla sobre la capa de relleno de forma que la cubra totalmente y se fija con otras dos filas de estacas de madera. Seguidamente se retiran las guías metálicas y las tablas y se repite el proceso, hasta alcanzar la altura prevista.

## PROCESO DE CONSTRUCCION DE ESTRUCTURAS DE TIERRA REFORZADA

### 1. Excavación del Talud y preparación del primer piso de la estructura

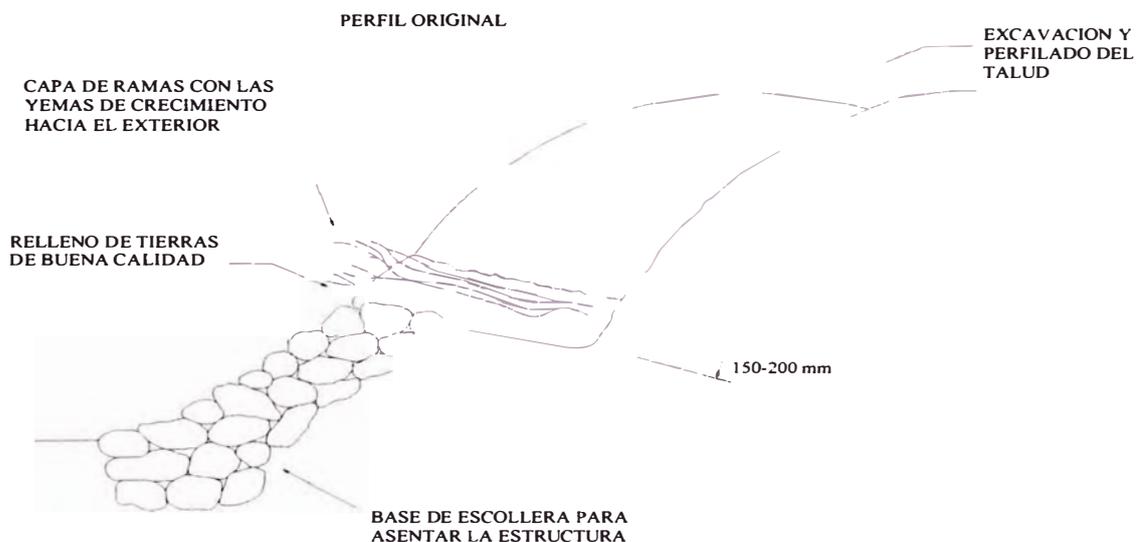


Fig. N° 2.19 (a): Estructura de tierra reforzada – Proceso Constructivo

## 2. Colocación de las guías para establecer la línea de relleno

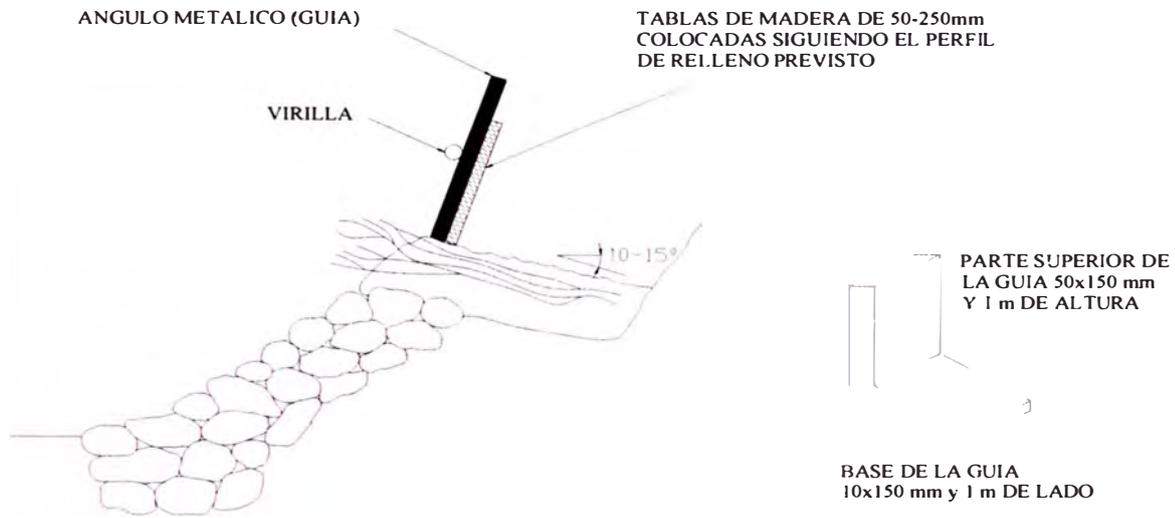


Fig. N° 2.19 (b): Estructura de tierra reforzada – Proceso Constructivo

## 3. Colocación del Geotextil

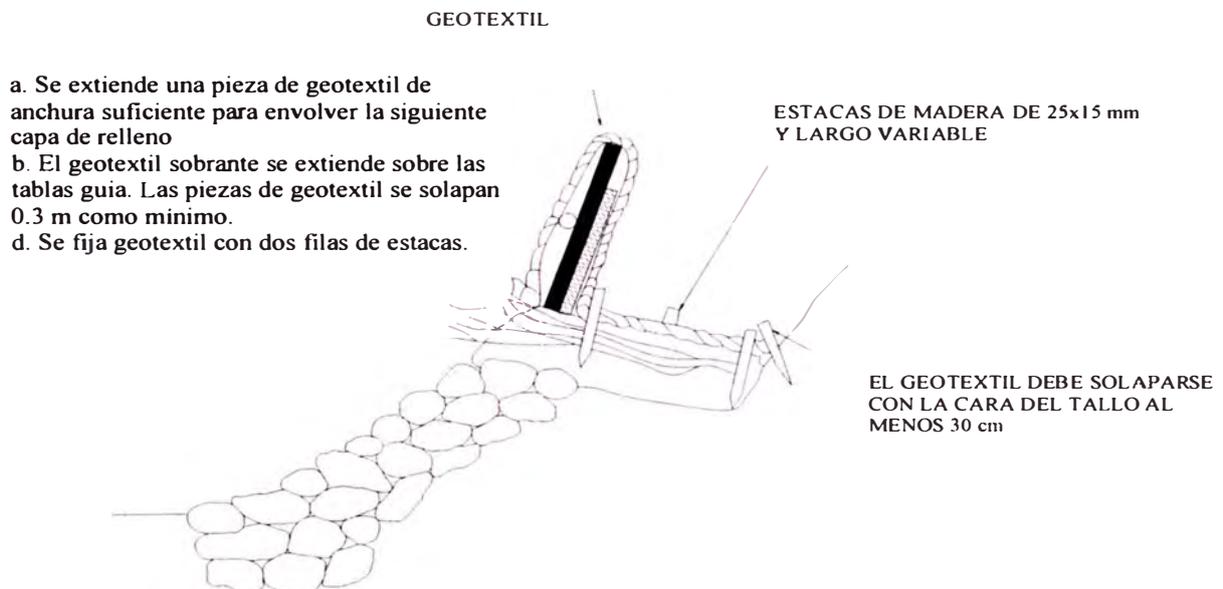


Fig. N° 2.19 (c): Estructura de tierra reforzada – Proceso Constructivo

#### 4. Recubrimiento de la capa de relleno con el geotextil

- Se relleno con tierras hasta el limite que señala las tablas guía manteniendo una contrapendiente de 10 - 15°.
- Se coloca el geotextil sobre la capa de relleno de forma que quede totalmente envuelta.
- Se fija el geotextil con estacas.

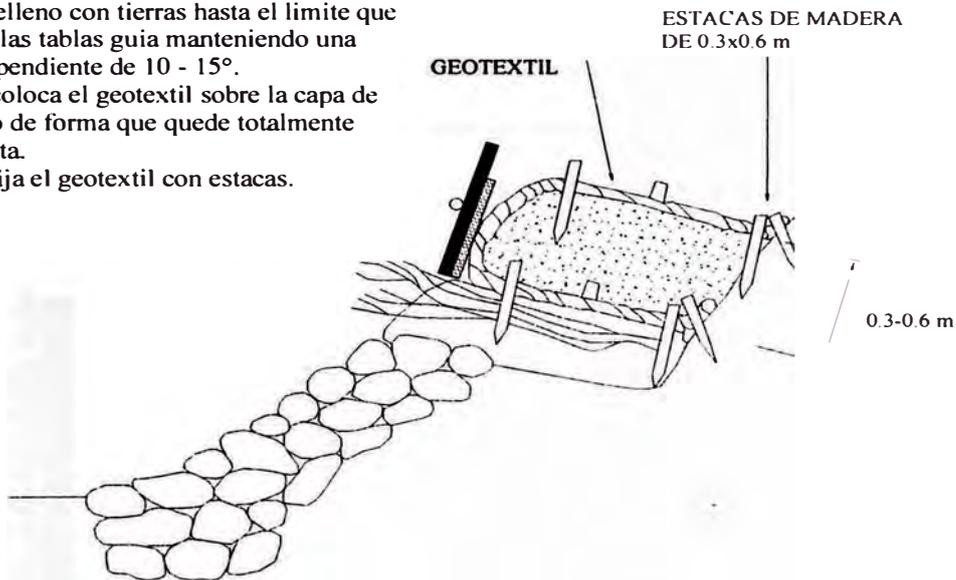


Fig. N° 2.19 (d): Estructura de tierra reforzada – Proceso Constructivo

#### 5. Entrada de los ángulos y las tablas guía

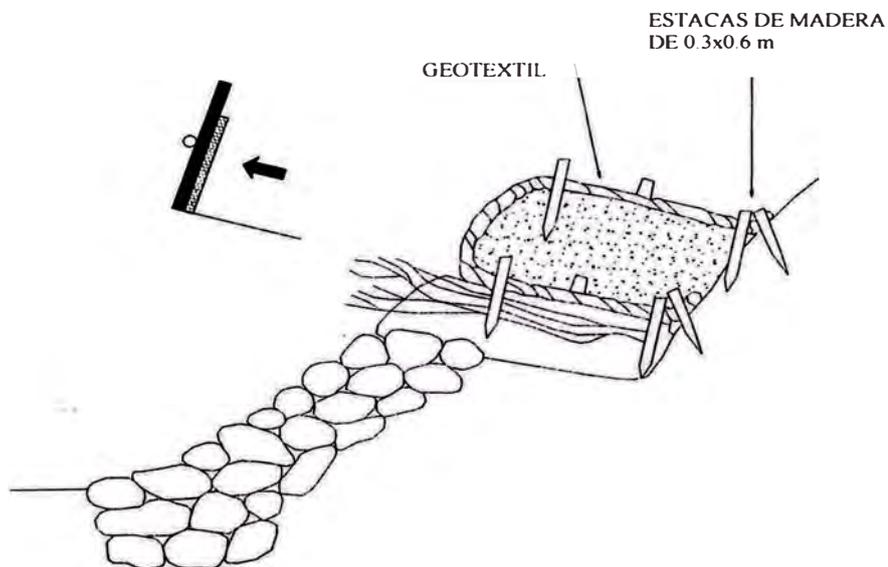


Fig. N° 2.19 (e): Estructura de tierra reforzada – Proceso Constructivo

## 6. Instalación del siguiente piso de la estructura

- Se coloca otra capa de tierra y ramas sobre el nivel de tierras reforzadas contruidas y se continua creciendo la estructura.
- Al finalizar la construcción se siembra y/o planta la cabecera del talud.
- Se riega abundantemente toda la estructura.

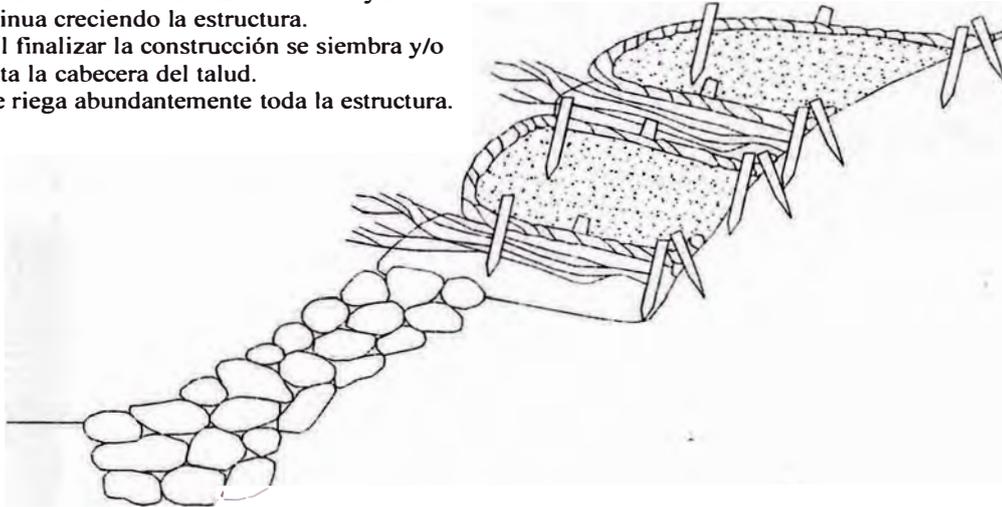


Fig. N° 2.19 (f): Estructura de tierra reforzada – Proceso Constructivo

### b) Muros Vivientes

#### *Descripción*

Son muros huecos con forma de cajón, contruidos con madera, que se rellenan con tierra y en cuya cara frontal se introducen varas y ramas de especies leñosas, las cuales enraízan dentro de la estructura .

En un primer momento, la estructura de madera rellena de tierras sujeta el talud, actuando como un muro de contención. Pero una vez que se ha producido el enraizamiento y las plantas se han desarrollado suficientemente, la vegetación gradualmente va tomando posesión de las funciones estructurales que realizaban hasta ese momento los elementos de madera con los que está construido el muro, hasta que llegan a ser el principal elemento de estabilización.

#### *Aplicación y Eficacia*

Esta técnica es apropiada para el tratamiento de taludes para cuya estabilización es necesario construir un muro bajo de contención y en los que es importante, además, cuidar los aspectos paisajísticos y de integración visual. Proporciona inmediata protección contra la erosión y, cuando la vegetación se desarrolla se logra estabilidad a largo plazo; aunque no resiste la acción de fuerzas laterales intensas.

### *Materiales y Preparación*

La estructura se construye con troncos, rollizos o tablones de madera sin tratar de entre 100 y 250 mm de diámetro. La longitud de estos elementos varía dependiendo del tamaño que se quiera dar a la estructura. Como material vegetal se utilizan ramas o varas de especies leñosas, generalmente sauces, de entre 10 y 50 mm de diámetro de lo suficientemente largas para alcanzar el fondo de la estructura.

### *Instalación*

La instalación se comienza por el punto más bajo del talud. Para que la estructura quede bien asegurada es conveniente sanear previamente el talud, excavando su superficie hasta sobrepasar el plano de deslizamiento y retirar todo el material suelto. Opcionalmente puede recubrirse el fondo de la excavación con una capa de piedra de escollera para mejorar sus cualidades de asiento. Se recubre o no, el fondo de la excavación donde se apoyará la estructura debe tener una contrapendiente de entre 10 y 15°.

Se colocan los primeros largueros en el fondo de la excavación, paralelos a la superficie del talud y separados entre sí de 1 a 2 m aproximadamente. Sobre ellos y en ángulo recto (perpendicularmente a la pendiente) se colocan los travesaños de forma que sus extremos sobresalgan entre 75 y 150 mm en los puntos de apoyo. La separación entre travesaños es de 1.00 m aproximadamente.

Cada piso de la estructura se construye de la misma forma, clavando cada larguero y travesaño al que esta situado por debajo. Según va concluyéndose la construcción de cada piso se procede a su relleno con tierras, cuidando de dejar una contrapendiente de 10 a 15°, y se coloca sobre la capa superior del relleno una capa de ramas. Los dos o tres primeros pisos de la estructura pueden rellenarse con grava o escollera para mejorar sus condiciones de drenaje. Las ramas deben situarse perpendicularmente a la cara del talud y con las yemas de crecimiento sobresaliendo unos 250 mm de la cara frontal de la estructura. Las ramas se cubren con tierra ligeramente compactada para asegurar un buen contacto.

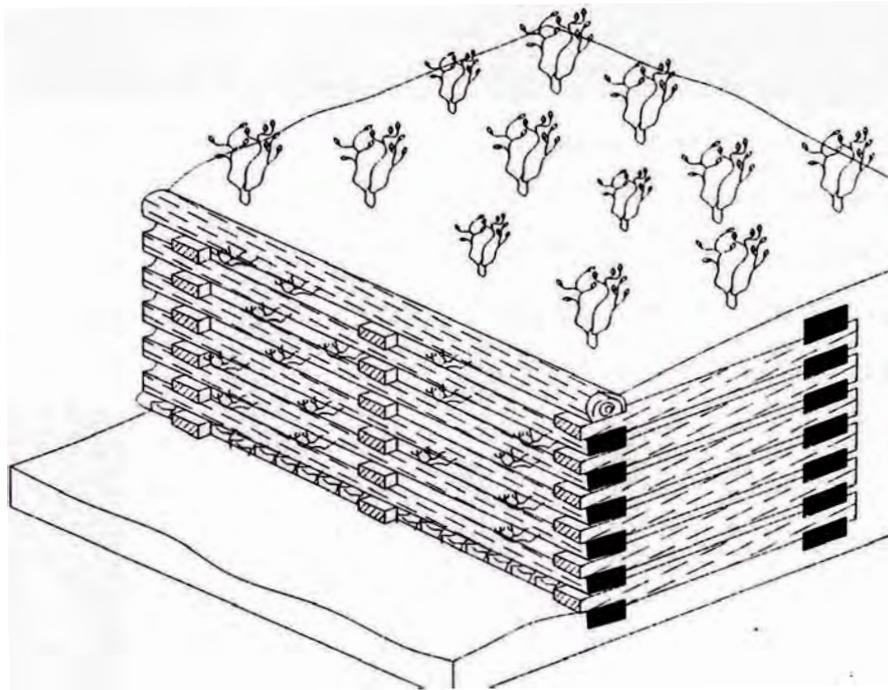
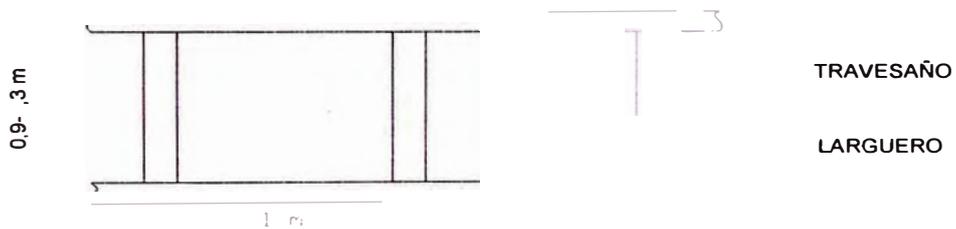
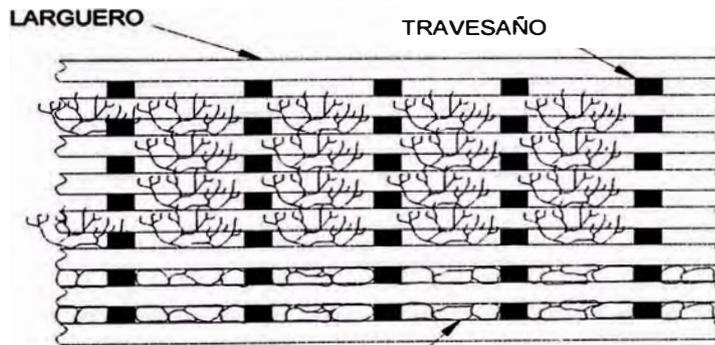


Fig. N° 2.20 (a) : Muro Viviente – Perspectiva



VISTA EN PLANTA  
 (NO SE MUESTRA EL MATERIAL DE RELLENO)



RELLENO DE ROCA  
 VISTA FRONTAL

Fig. N° 2.20 (b) : Muro Viviente – Detalles Constructivos

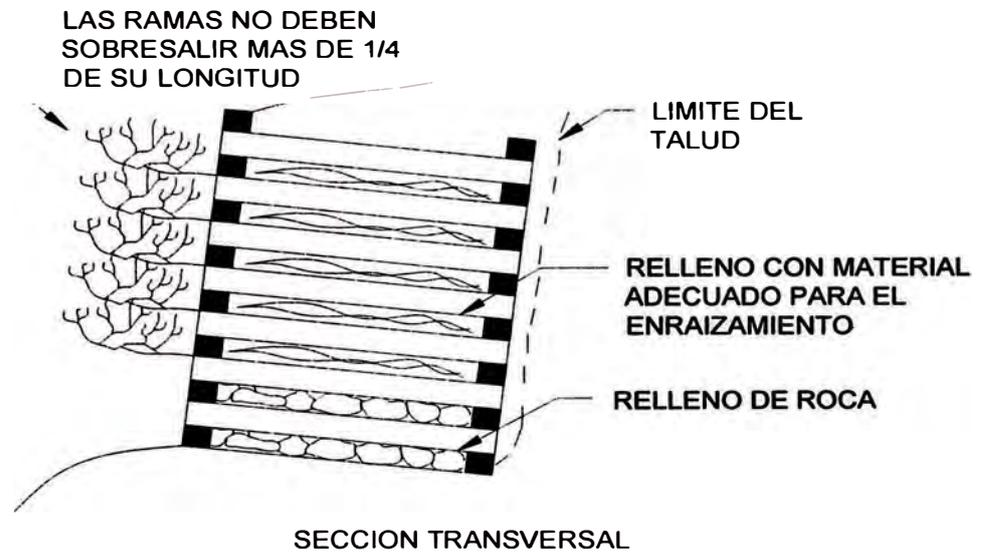


Fig. N° 2.20 (c) : Muro Viviente – Detalles Constructivos

# CAPÍTULO III

## REFORESTACION EN TALUDES

Las especies vegetales a usar obedecen a la función a la que estarán destinadas, ya sea control de la erosión o estabilización de taludes. Así la vegetación que absorbe grandes cantidades de agua funciona mejor para el control de la erosión en suelos arcillosos, en zonas húmedas para asegurar un mayor secado y capacidad de absorción en el momento de la lluvia. Las especies que absorben menos agua son ideales para suelos arenosos, debido a que no es conveniente que se produzca demasiada sequedad, lo cual aumenta la susceptibilidad a la erosión de los suelos granulares.

Generalmente se suelen utilizar especies arbóreas y arbustivas para la estabilización de taludes y especies herbáceas para el control de la erosión. Sin embargo una combinación adecuada de especies arbóreas, arbustivas y herbáceas es más efectiva y conveniente para estabilizar taludes, ya que se logra proteger del efecto erosivo de la lluvia, viento y escorrentía; también da una mayor estabilidad al talud incrementando la infiltración regulando la humedad del suelo y reforzando la fijación al suelo con las raíces.

Por tanto, es importante una adecuada selección de especies para lograr el efecto requerido, pero también es necesario asegurar las condiciones adecuadas para que las especies sembradas o implantadas puedan establecerse.

### 3.1 Criterios de Selección de Especies Vegetales

Tal como lo establece Carmen Mataix González (3) los principales criterios a ser considerados en la selección de especie son:

#### **a) Criterios Biotécnicos: Funciones y propiedades como elementos de estabilización**

La función que la plantas deben cumplir como elemento estructural de estabilización o protección condiciona el tipo de vegetación a ser utilizada.

Para controlar la erosión superficial, la función es del recubrimiento y protección y las plantas requeridas deben tener raíces fibrosas, superficiales y muy extendidas, capaces de crear una cubierta densa y continua.

Para la estabilización de taludes, la función es de reforzamiento y anclaje, para ello se necesitan plantas con un sistema radicular fuerte y profundo que

se desarrolle rápidamente y que además tenga tallos resistentes y una alta relación entre la biomasa del sistema radical y la biomasa de la parte aérea.

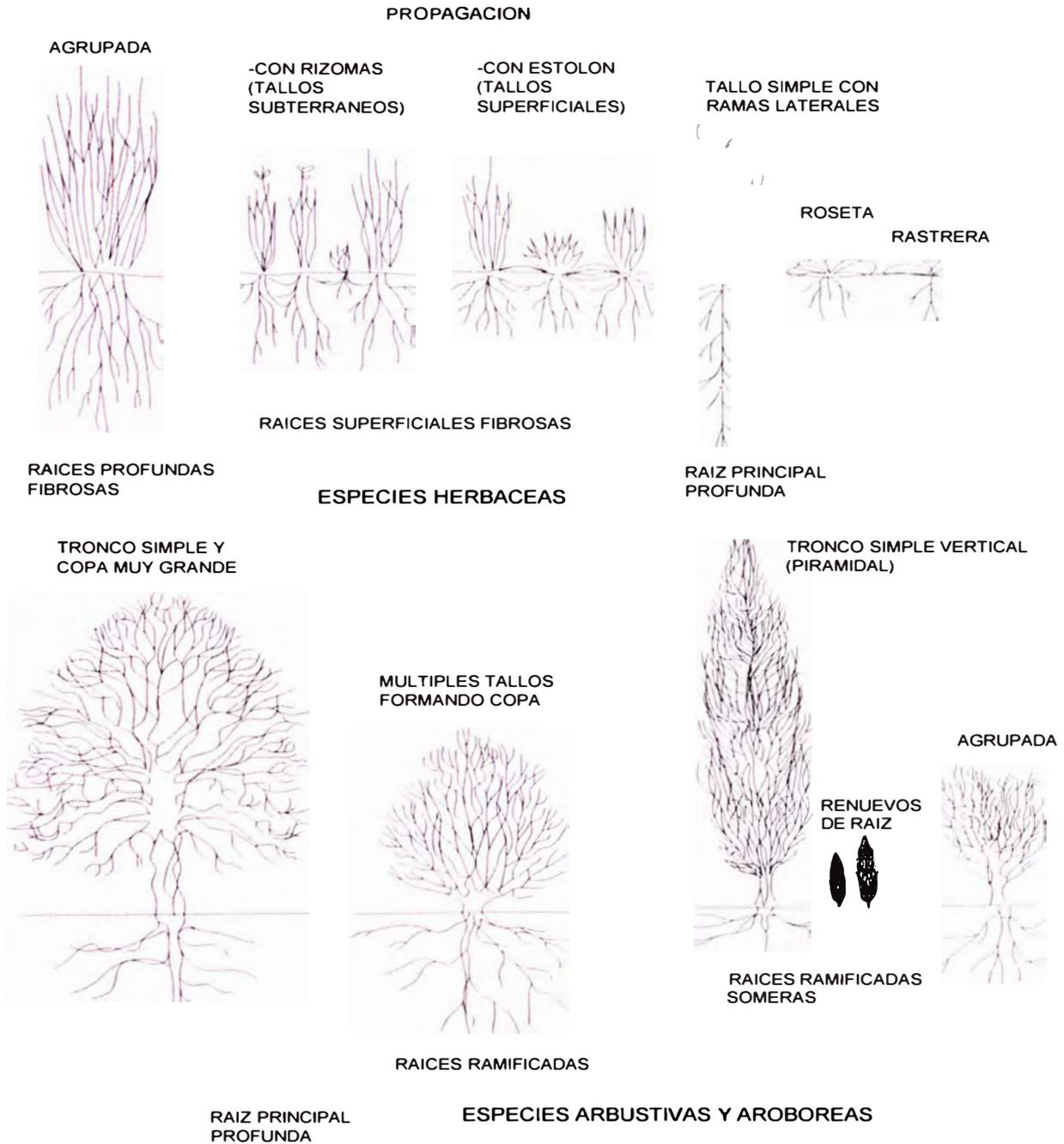


Fig. N° 3.1: Formas de Crecimiento de las Plantas

FUNCIÓN	CARACTERÍSTICAS DESEABLES
Contención y Captura	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ramificación desde la base.</li> <li>- Tallos fuertes y flexibles.</li> <li>- Rápido crecimiento de la parte aérea.</li> <li>- Capacidad de rebrote.</li> <li>- Propagación rápida por esquejes y brotes de raíz.</li> </ul>
Revestimiento y Cubierta	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Superficie de crecimiento extensiva y densa.</li> <li>- Sistema radicular extendido, fibroso y superficial.</li> </ul>
Refuerzo y Soporte	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Raíces Profundas, fuertes y extendidas.</li> <li>- Rápido crecimiento del sistema radical.</li> <li>- Alta relación entre la biomasa de la raíz y la de la parte aérea.</li> <li>- Alta tasa de transpiración a través de las hojas.</li> </ul>

Tabla N° 3.1: Función de la Vegetación

#### b) **Criterios Ambientales: Condiciones de la zona de actuación**

Las especies elegidas deben estar adaptadas y ser capaces de prosperar bajo las condiciones ambientales existentes en la zona de actuación.

Los principales factores ambientales que deben ser considerados para determinar cuáles son las especies más adecuadas son:

- o *Bioclima*: es la combinación de factores climáticos que determinan el crecimiento de la vegetación y la supervivencia de las distintas especies que forman una comunidad determinada. Este factor no puede ser modificado y la única posibilidad de éxito está en adecuarse a él mediante la elección de una combinación de especies perfectamente adaptadas a las condiciones de la zona de actuación.
- o *Características del Sustrato*: El suelo es un sistema biofísico que actúa de forma compleja con y sobre la vegetación. Es la fuente y despensa de elementos nutritivos y agua para las plantas, y en él está contenido el oxígeno necesario para la respiración de las raíces. Las características del sustrato pueden ser modificadas mediante la utilización de técnicas específicas de tratamiento y preparación del suelo y adecuarlas a las

necesidades de la vegetación. Los principales factores edáficos que marcan la influencia del suelo en la vegetación son:

- Textura y densidad, que determinan básicamente las posibilidades y el tipo de enraizamiento y la capacidad de almacenamiento e intercambio de agua. Texturas extremas, como pueden ser muy arcillosos o muy arenosos, requieren la utilización de plantas con sistemas radicales y fisiologías adaptadas específicamente a esas condiciones.
- Fertilidad, en cuando a presencia y disponibilidad de macronutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) y micronutrientes (calcio, magnesio, sodio, etc). En el caso de suelos muy pobres, es conveniente incluir dentro de la selección de especies plantas leguminosas ya que fijan su propio nitrógeno, con lo que, además de ser capaces de sobrevivir y prosperar en estas condiciones adversas, su actividad mejora las características del suelo.
- Reacción del Suelo o pH, ya que condiciones extremas de este parámetro resultan tóxicas para la mayoría de las plantas y determina el grado de asimilabilidad de determinados nutrientes.

### c) **Consideraciones Fitosociológicas**

La vegetación es un sistema dinámico, en el que se establece una compleja red de interacciones entre las distintas especies e individuos y su entorno ambiental, ya que está sujeto a continuos procesos de cambio y evolución.

La evolución de la composición específica y de la estructura de la vegetación implantada no siempre puede ser predicha a largo plazo, aunque sí pueden aproximarse mediante el estudio de los procesos naturales de sucesión vegetal y decidir que especies se van a utilizar, en que proporción y especificar una gestión de espacio tratado que asegure la permanencia de las plantas sobre las que recaen las principales funciones de estabilización del talud.

El término de *sucesión vegetal* se refiere a las secuencias naturales en las que una serie de comunidades vegetales se van sustituyendo unas a otras a lo largo del tiempo, hasta llegar finalmente a una comunidad estable o clímax.

Las plantas pioneras son las primeras en establecerse y forman una comunidad herbácea dominada generalmente por gramíneas de carácter ruderal. Este tipo de especie crece rápidamente y tienen una alta tasa de reproducción, aunque sólo son competitivas en condiciones ambientales muy desfavorables. Una vez las condiciones de la zona de implantación mejoran, y son ellas precisamente las que propician este cambio, son sustituidas por especies de crecimiento más lento, pero mayor longevidad, pertenecientes a etapas superiores de la escala de sucesión vegetal, cuya estrategia de crecimiento les permite competir con ventaja cuando no existen condiciones de estrés ambiental.

La mayoría de las especies vegetales utilizadas en bioingeniería son plantas pioneras o pertenecientes a las primeras etapas de la sucesión vegetal, ya que generalmente las condiciones ambientales de las zonas de actuación no son adecuadas para el desarrollo de especies pertenecientes a etapas superiores, mucho más exigentes.

Para asegurar que las funciones y objetivos de estabilización y protección asignados a la vegetación van a seguir cubiertas a largo plazo, es convenientes utilizar una mezcla de plantas que incluya especies pioneras, capaces de establecerse rápidamente, para crear a corto plazo una cubierta protectora frente a la erosión, junto con otras de crecimiento más lento, capaces de permanecer una vez que las pioneras han desaparecido.

Con árboles y arbustos, la utilización de una alta proporción de especies pioneras o de crecimiento rápido asegura la creación a corto plazo de una cubierta leñosa densa, pero implica mayores necesidades de mantenimiento, ya que es necesario controlar el crecimiento de estas especies pioneras para permitir y favorecer el desarrollo de las especies competidoras.

El papel que juega una determinada especie en el proceso de sucesión depende en gran medida de su estrategia de establecimiento y desarrollo.

Pueden distinguirse tres tipos de plantas en función de sus estrategias básicas de respuestas y adaptación a intensidades variables de estrés ambiental (disponibilidad de luz, de nutrientes, de agua, etc) y grado de

perturbación debida a agentes externos (actividad humana, herbívoros, agentes patógenos, erosión, fuego, etc):

- *Plantas competidoras*, que explotan condiciones de bajo estrés ambiental y bajo nivel de perturbación pero donde muchas especies están compitiendo por los recursos disponibles.
- *Plantas tolerantes al estrés ambiental*, que explotan condiciones de alto estrés, pero bajo nivel de perturbación.
- *Plantas ruderales*, que toleran un alto grado de perturbación, pero no condiciones de estrés ambiental.

Por tanto, se tiene que no existe un tipo de estrategia que aúne resistencia al estrés y a la perturbación, que son los dos condicionantes que se repiten con mayor frecuencia en el tratamiento de taludes. Para asegurar el éxito de la revegetación es necesario eliminar mediante tratamientos adecuados o labores de mantenimiento uno de estos dos condicionantes, mejorando las características del suelo, pendiente, exposición, etc. o bien controlando los agentes que causan la perturbación.

#### **d) Consideraciones Antrópicas**

Al seleccionar la cobertura vegetal es importante considerar el uso final que tendrá el área sometida a tratamiento. Las condiciones de estabilidad que se esperan obtener con la solución determinan, en muchos casos, el uso potencial del terreno.

En zonas donde se logra alta estabilidad podrán establecerse especies aprovechables como frutales, medicinales, etc; pero si al contrario, la estabilidad conseguida por el tratamiento es baja, la zona debe reforestarse con especies que no estimulen la presencia de personas en el área.

Del mismo modo, uno de los principales agentes de daño en áreas con tratamiento de coberturas vegetales es la presencia de ganados (equinos, vacunos, caprinos, otros). Con el fin de evitar la presencia de estos animales en la zona, debe considerarse como criterio de selección de la cobertura, la palatinidad de las especies a los ganados, de esta forma se evita que el área sea atractiva para el pastoreo. Si las especies más apropiadas para el establecimiento son forrajeras, se debe cercar el área para evitar el daño por animales.

## 3.2 Especies Vegetales Usadas

Las especies vegetales que presentamos, son aquellas que se adaptan a las funciones de control de la erosión superficial y estabilización de taludes; y que son de uso cotidiano en el Perú.

La información sobre las características de cada especie fueron proporcionadas por el Ingeniero Forestal José Luis Medina Alvarado.

### 3.2.1 Especies Herbáceas

Las especies herbáceas se usan principalmente para el control de la erosión hídrica y protección al tránsito humano y animal:

#### a) **VETIVERIA ZIZANOIDE (Vetiver)**

El vetiver es una gramínea perenne que crece verticalmente (en su mayoría) hasta una altura de 2 m, con un sistema radical fuerte alcanzando profundidades de hasta 5 metros. Naturalmente es una hidrófita, pero crece muy bien bajo condiciones xerófitas. Es recomendado para lugares tropicales o sub tropicales.

Se establece desde el nivel del mar hasta más de 2000 m.s.n.m. Está limitada por las temperaturas bajas en altitudes más altas y con nubosidad. El vetiver es una planta que requiere pleno sol para desarrollarse bien, se puede establecer y crecer adecuadamente en condiciones extremas con un máximo de 40% de sombra.

Tiene un largo periodo de vida, conociéndose que puede alcanzar hasta los 60 años (experiencia africana). Por tanto tiene una característica de ser perenne.

Los usos que se le dan al vetiver son muy diversos, tales como aceites aromáticos (perfumes), usos medicinales, material para artesanías, fibra para papel, en conservación del suelo y agua, y en nuestro caso principalmente como estabilizador de la tierra y taludes.

#### **Características Climáticas:**

Tiene una sobrevivencia de -15° a más de 44° C, pero cuando el suelo se congela, muere. No crece cuando la temperatura del suelo está abajo de 12° a 15° C. Para crecimiento rápido, se requiere temperaturas altas (mayor a 25 °C).

Aguanta las sequías extremas, pero normalmente requiere una época de lluvias que dure por lo menos de 3 meses. La condición idónea es cuando las lluvias vienen regularmente durante el año. Resiste condiciones áridas (300 mm), pero superiores a 700 mm es preferible.

**Características Edáficas:**

El vetiver prefiere los suelos margos arenosos profundos. Sin embargo, crece bien en un rango amplio de suelos. Puede crecer en pedregales, suelos ácidos (pH = 3) o alcalinos (pH = 11), aguanta niveles tóxicos de metales como aluminio, manganeso (550 ppm) y condiciones sódicas y salinas. Aguanta inundaciones por largos periodos, de 3 meses o más después de que está bien establecido. También crece bien en suelos pocos profundos.

**Sistema Radical:**

El sistema masivo de raíces generalmente crece verticalmente y no compite con los cultivos adyacentes. En condiciones buenas, el sistema radical puede crecer hasta una profundidad de 5 m, y bajo la superficie del suelo se forma una barrera. El vetiver ofrece entre 6 a 19 k Pa de resistencia por Kg. de raíz por m<sup>3</sup> de suelo comparado con promedios de 3.2 a 3.7 k Pa de otras raíces de árboles.

**Propagación:**

Por división de raíces. Si hay mucho material vegetativo disponible en barreras ya existentes, esas barreras pueden dividirse. Cuando el material es escaso, entonces se requieren viveros para multiplicarlo. Dependiendo de las lluvias y tipos de suelos, un tallo puede producir de 25 - 50 tallos nuevos en 6 meses.

Existen dos tipos de vetiver. El proveniente del norte de la India, florece y produce semilla fértil. El proveniente del sur no produce semilla viable. El tipo usado es del sur, con esto se evita que pueda convertirse en una planta invasora y dañar la flora local.

En lugares de siembra que no son estables (taludes de caminos, cárcavas donde agua corre con velocidades altas) es mejor criar vetiver en contenedores como bolsas plásticas (de 4 pulgadas de tamaño). La ventaja de éste es el crecimiento 'instantáneo' de la planta en vez de tener un período de establecimiento de 30 a 90 días como con plantas sembradas con raíz desnuda.

### La Siembra:

La siembra de barreras debe ser durante el inicio de la estación lluviosa cuando el suelo está bien húmedo y se espera tener un mínimo de 30 a 45 días más de lluvias. Dos a tres tallos deben de estar sembrados y separados a cada 10 - 15 cm. La distancia entre barreras debe ser de 5 - 6 m a 40 m dependiendo de la pendiente (5% a más de 60%). Debe seleccionarse y sembrarse solo los tallos de buena calidad, y deben sembrarse no más de 3 días después de la excavación del vivero (es mejor sembrarlos el mismo día). Los tallos no deben secarse y necesitan protección del sol. De 2000 - 3000 tallos se requieren para establecer 100 metros de barrera. Bajo condiciones muy secas (menos de 700 mm lluvia), es mejor sembrar los tallos y en el fondo de un surco, o mejor, un surco de forma 'V' , que sea superficial y ancho.



Imagen N° 3.01: Planta de Vetiver

#### b) **BRACHIARIA DECUMBENS STAPF (Braquiaria)**

La braquiaria es una gramínea que crece verticalmente hasta una altura entre 0.60 y 1.0 m; tiene una forma de crecimiento del tipo estolonífero y un ciclo vegetativo perenne. Se adapta sin problemas hasta los 2000 m.s.n.m. No tiene resistencia a la sombra, por lo que necesita de mucha luz para desarrollarse.

### **Características Climáticas**

La braquiaria pertenece a climas subtropicales, requiriendo una precipitación mayor a 800 mm anuales. Tiene una tolerancia muy baja a las heladas y al encharcamiento, sin embargo tiene una tolerancia media a las sequías y una tolerancia alta a las quemas.

### **Características Edáficas**

La braquiaria no resiste suelos ácidos, pero no requiere una alta fertilidad del suelo para instalarse y en cuanto al espesor requerido, sólo necesita de 2 cm para asentarse. Se adapta en suelos franco arenosos.

### **La siembra**

La braquiaria se siembra en época lluviosa y se requiere una fertilización fosfatada para mejores resultados. Antes del sembrío es necesario preparar el terreno arando, desterronando y nivelando. Tiene un periodo de formación de 90 a 120 días, luego de los cuales ya se habrá asentado perfectamente. La siembra se puede realizar por puntos, en línea, al voleo, aéreo y por huecos.



*Imagen N° 3.02: Plantas de Braquiaria*

### **c) MELINIS MINUTIFLORA (Gordura)**

La gramínea Gordura es una especie perenne de porte desparramado, que forma grandes macollas, con tallos pubescentes, algunas veces de hasta 180 cm de altura. Las hojas son rojizas, pegajosas, y de fuerte olor. Varía mucho en cuanto a vigor, exuberancia, pubescencia y porte.

Se establece bien hasta una altura de 2000 m.s.n.m.; a mayores alturas su crecimiento es lento o muy difícil de establecer. Esta gramínea se utiliza para el pastoreo y se emplea también para conservación del suelo en laderas escarpadas con suelos pobres

#### **Características Climáticas**

Crece en zonas de una precipitación anual entre 800-1800 mm, en lugares bien drenados protegidos del sobrepastoreo. Es muy resistente a la sequía, pero tiene una resistencia muy baja a la quema o al encharcamiento.

#### **Características Edáficas**

La Gordura se establece fácilmente y no requiere de capas muy profundas de suelo fértil, pudiendo establecerse en suelos pobres. Se le considera una planta invasora por su alta capacidad de asentamiento.

#### **La siembra**

La braquiaria se siembra en época lluviosa y tiene un periodo de formación de 90 a 120 días, luego de los cuales ya se habrá asentado perfectamente. La siembra se puede realizar por puntos, en línea, al voleo, aéreo y por huecos.



Imagen Nº 3.03: Planta de Gordura

#### **d) PENNISETUM CLANDESTINUM (Kikuyo)**

A esta gramínea se le conoce como Kikuyo, grama gruesa o pasto africano y es una especie tropical originaria de África. Posee un crecimiento muy agresivo que le permite dominar las demás especies que se siembren con

ella. Tiene una alta tolerancia al tránsito intenso, a altas temperaturas, a plagas y enfermedades. Durante el invierno o con las primeras heladas toma un color amarillo y queda en estado de latencia hasta la primavera, donde recupera el color verde. Crece hasta los 2000 m.s.n.m.

#### **Características Climáticas**

El Kikuyo es una gramínea tropical, por tal motivo requiere abundante luz y una precipitación anual de 800 – 1800 mm. No resiste lugares sombríos, por lo que es necesario mucha luz para su desarrollo.

#### **Características Edáficas**

El Kikuyo prospera en todo tipo de terreno, pero se desarrolla mejor en suelos sueltos con buen drenaje, es por eso que se adapta muy bien a suelos arenosos.

#### **La siembra**

Puede sembrarse puede realizarse en puntos, por voleo, etc. Se reproduce vegetativamente por medio de estolones y rizomas.



*Imagen N° 3.04: Planta de Kikuyo*

#### **e) *HYPOLTHENIO RUFA. NESS STAPF (Jaragua)***

Pertenece a la familia Gramínea, Sub-familia Panicatae y tribu Andropogonae. Su origen no se conoce con exactitud, según información de algunos autores es nativa de Goiás, en la Altiplanicie central del Brasil,

donde se le conoce desde hace mucho tiempo, pero lo más probable es que sea originaria del África Tropical. Es conocido por diferentes nombres comunes en Brasil por Capím yaraguá, Capím provisorio o Capím vermelho, en Colombia, Puntero, en Centro América, Jaragua.

Es un pasto erecto, perenne y rústico de desarrollo rápido. Forma macollas altas, cuando se dejan crecer libremente con la floración alcanza hasta cerca de los tres metros. No produce rizomas ni estolones, cepas vigorosas y tupidas, encontrándose entre 30 y 40 tallos cilíndricos, erguidos y fuertes por macolla, éstos se lignifican al alcanzar la madurez y se transforman en tallos duros; con hojas largas y delgadas, algo ásperas en los bordes y miden de 2 a 8 mm de ancho, aunque algunas veces alcanzan a más de un centímetro. La inflorescencia es una panícula grande formada por ramas compuestas y numerosas, que llevan racimos cortos de 2 – 3 cm de color marrón rojizo subtendidos por brácteas inconspicuas, espiguillas con vellos de un tinte dorado lo mismo que los pedicelos, la lemma de la espiguilla sésil con una arista marrón-rojiza bigeniculada y larga. Su ciclo de vida comienza con el inicio de las lluvias, crece violentamente hasta mediados de septiembre a partir de esta fecha comienza el crecimiento de los largos tallos florales, muy leñosos, los que producen abundantes semillas. Requiere abundante luz para su desarrollo.

#### **Características Climáticas**

Esta gramínea es propia de la zona tropical o cálida que se puede también establecer en zonas montañosas con alturas de 1000 m.s.n.m. Es bastante resistente a la sequía, una vez establecido no se pierde con la sequía y quema. Requiere una precipitación mayor a 800 mm.

#### **Características Edáficas**

Es poco exigente en lo que se refiere a la textura y fertilidad de los suelos, siendo susceptible a aquellos donde el agua permanece estancada por largo tiempo. Prefiere suelos pesados y los de textura mediana (franco-arenosos), se adapta muy bien a los suelos lateoníticos, arcillosos o franco-arenosos.

#### **La Siembra**

Las semillas del Jaragua son muy pequeñas y livianas, se caracterizan por tener un largo filamento o arista que dificulta el empleo de sembradoras

mecánicas, ya que se apelmazan fácilmente de las tolvas y obstruyen los conductos de salida. Por esto, corrientemente se siembra al voleo, cuidando que las semillas queden distribuidas por todo el terreno, de la manera más uniforme posible. La cantidad de semilla para sembrar una hectárea es de 20 a 25 kg, esta cantidad por hectárea depende de la germinación de la semilla, si se hace con una semilla limpia y con germinación de 110% puede usarse de 2 a 4 kilogramos por hectárea. Se recomienda mezclar con 8 kilos de cáscara de arroz, aserrín o 5 de arenas para poder distribuirla en una hectárea.



Imagen N° 3.05: Planta de Jaragua

**f) *PANICUM MAXIMUM* (Guinea)**

Es nativa de África tropical y subtropical. Es una gramínea perenne, hojosa, con raíces profundas, éstas se ensanchan en la corona de la planta formando un corto rizoma. Las hojas son largas y anchas y muy bien distribuidas en los tallos. La altura de la planta depende de la variedad, puede ir desde los 0.80 m hasta los 2.0 metros.

### **Características Climáticas**

El pasto guinea prospera en climas tropicales y subtropicales. Se cultiva desde el nivel del mar hasta los 1200 m.s.n.m. Es susceptible a las heladas y su producción puede reducirse a temperatura fría. Esta gramínea es tolerante a la sombra pudiendo convivir bajo la sombra de árboles de leguminosas. Requiere una precipitación mayor a 700 mm.

### **Características Edáficas**

El pasto guinea crece en diversos tipos de suelos, aunque es más exigente en suelos fértiles que otros pastos. Soporta largos períodos de sequía, pero sólo muestra sus mejores condiciones en un ambiente húmedo, prospera muy bien en suelo recién deforestado. Su mayor productividad es en suelos franco-arcillosos

### **La Siembra**

Se acostumbra efectuar la siembra regando la semilla al voleo sobre el terreno. Una adecuada preparación del terreno para la siembra permite establecer más rápido el pastizal. La cantidad de semilla comúnmente usada es de 20 a 25 kg/ha, dependiendo de la germinación de la semilla.



*Imagen N° 3.06: Plantas de Guinea*

#### **g) DIGITARIA DECUMBENS (Pangola)**

Es originaria del transvaal, África del Sur, de donde fue llevada en 1935 a los Estados Unidos y sembrada por primera vez en la Estación Experimental Agrícola de Gainesville, Florida. A esta gramínea se le dio el nombre de Pangola por el río de África del Sur de donde se obtuvo el material de siembra llevado a los Estados Unidos. Sin embargo, después

de haberse popularizado esta denominación se aclaró que el nombre del río era Pongola.

Es una gramínea estolonífera, perenne y vigorosa que crece cubriendo densamente el suelo. Las hojas son lineales y estrechas de 7 a 9 mm de ancho y lisas en ambas caras. La ligula es membranosa, cerca de 3 mm de largo. La vaina de la hoja es ovalada y ligeramente pubescente, particularmente cuando es joven. Las flores no producen semilla viable. La inflorescencia, dispuesta en forma de dedos de una mano, está situada al extremo de un largo pedúnculo. Las espiguillas son glabras (sin pelos) o ligeramente sedosas. Tiene una resistencia alta a la perturbación.

### **Características Climáticas**

La Pangola es propia de climas tropicales cálidos; pero se adapta bien a zonas sub-tropicales o tropical en condiciones moderadas de lluvia (mayores a 800 mm). Se cultiva desde el nivel del mar hasta los 2000 ms.n.m., pero a partir de los 1200 m.s.n.m. la producción disminuye al aumentar la altura. Resiste bastante bien las sequías de corta duración, una vez que está completamente establecida en el terreno. Es susceptible a las heladas y crece muy lentamente en condiciones frías. Responde bastante bien en suelos fértiles.

### **Características Edáficas**

La pangola crece bien en una variedad de suelos, desde los arenosos hasta los arcillosos y suelos pesados. Alcanza mejor desarrollo en los suelos franco-arenosos y franco-arcillosos y sobre todo bien drenados, pues el pasto no tolera excesos de humedad.

### **La Siembra**

Para el establecimiento de la pangola se utiliza semilla vegetativa (tallos, cepas pero preferiblemente por estolones), ya que no produce semilla sexual viable. La cantidad de estolones requerida para sembrar una hectárea depende del método que se utilice. Si la siembra se realiza al voleo, se recomienda de 1.500 a 2.000 Kg./ha, mientras que, en la siembra por surcos, la cantidad a emplear varía entre 1.000 a 1.200 Kg./hectárea.



Imagen N° 3.07: Sembríos de Pangola

#### **h) *LOLIUM PERENNE* (Raigrass Perenne)**

Es la especie más difundida en el mundo. Se le conoce también como Ray grass perenne, Ray-grass inglés, Raygrass inglés, Vallico, Ballico, etc. No es una especie invasora.

Se establece desde el nivel del mar hasta los 2200 a 3000 m.s.n.m. adaptándose muy bien a los climas fríos. Es resistente al pisoteo y tiene una rápida recuperación, no es resistente a la sequía, por lo que requiere de constante riego.

##### **Características Climáticas**

Se adapta a temperaturas entre los 10 °C a 20°C y no es resistente a la sombra, por lo que requiere de constante luz solar. Requiere una precipitación anual 1500 a 4000 mm.

##### **Características Edáficas**

Se establece bien en suelos húmedos y fértiles, pero soporta también terrenos pesados (tiene cierta resistencia a la salinidad). Es altamente exigente en agua y nitrógeno.

##### **La Siembra**

Su reproducción es en base a semillas y se caracteriza por su fácil germinación, necesita de 5 a 7 días para que brote la hierba. Perdura tres o cuatro años a pesar de requerir frecuentes siegas que debilitan las

plantas, por lo que es aconsejable su mezcla con otras especies perennes de germinación y desarrollo más lento.

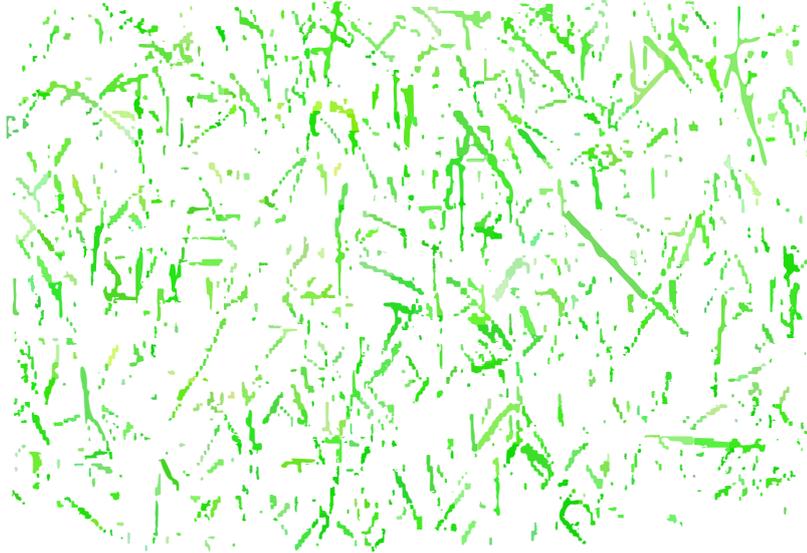


Imagen N° 3.08: Planta de Raygrass Perenne

**i) PENNISETEUM PURPURERUM (Elefante)**

Es un gramínea invasora, que tiene como principales características su resistencia al pisoteo, sin embargo no es resistente a quemas y tampoco es resistente a las sequías. Se establece en ambientes tropicales, desde los 300 hasta los 2300 m.s.n.m.

Suele crecer hasta 3.5 m de alto, 0.75 m de ancho y tiene un espesor promedio de 2 cm. Se suele utilizar como protección a la erosión y también como planta forrajera.

**Características Climáticas**

Se adapta a temperaturas entre los 18°C a 27°C y no es resistente a la sombra, por lo que requiere de constante luz solar. Requiere una precipitación anual de 1000 a 3000 mm.

**Características Edáficas**

Se establece en terrenos neutros franco arenosos, requiere mucha irrigación, ventilación y luz solar.

**La Siembra**

La gramínea Elefante se reproduce por estolones y se puede sembrar utilizando diferentes técnicas tales como el voleo o por tepes.



Imagen N° 3.09: Plantas de *Pennisetum Purpureum*

**j) FESTUCA ARUNDINACEA (Festuca)**

Esta gramínea no es una invasora y se establece en ambientes sub tropicales desde el nivel del mar hasta los 2200 m.s.n.m. y tiene como principales características que no es resistente a quemas, no tiene resistencia al pisoteo y tampoco es resistente a las sequías.

La Festuca tiene matas densas y rizonas cortos, sus cañas son delgadas y largas llegando a medir hasta 1.5 m de alto y sus raíces son muy densas llegando a alcanzar hasta 1.80 m de profundidad.

**Características Climáticas**

La Festuca se establece en sub climas tropicales con temperaturas que van desde los 15°C hasta los 20°C, requiriendo una precipitación entre 900 a 1700 mm/año.

**Características Edáficas**

Se establece bien en terrenos neutros húmedos a bien drenados. Es resistente a terrenos salinos y se adapta a zonas áridas.

**La Siembra**

Se reproduce mediante semillas y se puede emplear diversos métodos, tales como voleo, siembra en surcos, etc.



Imagen N° 3.10: Planta de Festuca Arundinacea

**k) DESMODIUM SPP (Pega Pega)**

Esta gramínea perenne es considerada una invasora y se establece en climas tropicales y sub tropicales desde el nivel del mar hasta los 3000 m.s.n.m. Tiene como principales características que no es resistente al pisoteo, no es resistente a las quemas, sin embargo es resistente a las sequías.

Se describe como una hierba robusta trepadora, ligeramente leñosa. Posee estolones de hasta 6 m de longitud, que continúan emitiendo tallos aéreos. Posee un sistema radical profundo.

**Características Climáticas**

Se establece en climas tropicales y sub tropicales con temperaturas de 18°C a 30°C, requiriendo precipitaciones entre 1000 a 2000 mm/año.

**Características Edáficas**

Se establece en terrenos franco arenosos muy bien drenados.

**La Siembra**

Se reproduce por cepas (rastrero).

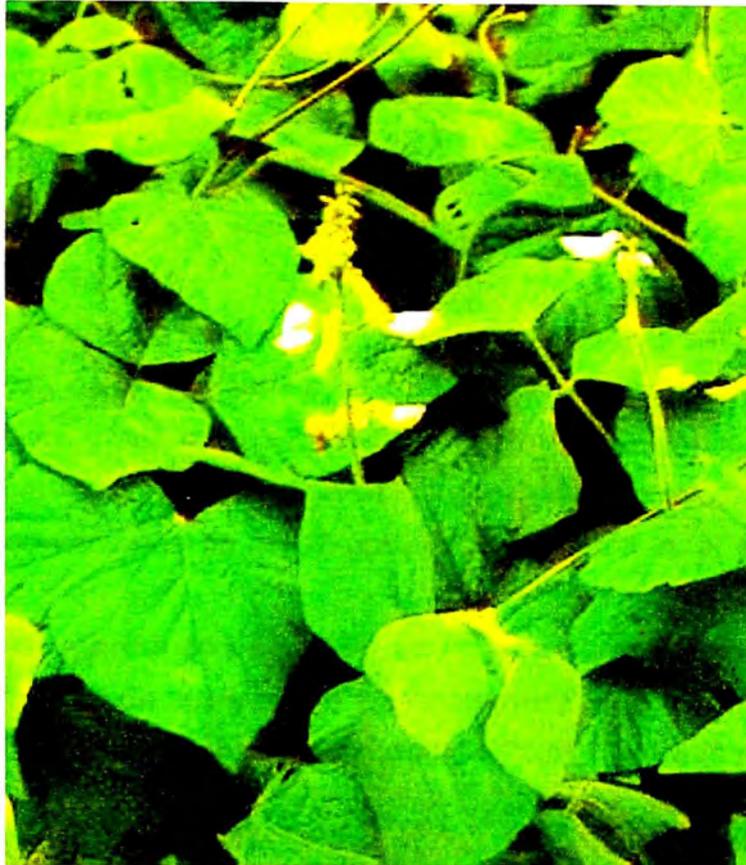


Imagen N° 3.11: Plantas de *Pueraria Phaseoloides*

#### **I) *CYMBOPOGUM CITRATUS* (Limonaria)**

Se le conoce también como Yerba Luisa. Esta gramínea no es considerada una invasora y se establece en climas sub tropicales desde los 300 hasta los 2000 m.s.n.m. Tiene como principales características que es resistente al pisoteo y es resistente a las sequías, sin embargo no es resistente a las quemas.

No existen cultivos comerciales de Yerba Luisa en el Perú, sin embargo, se puede producir en toda la selva, como en Uchiza, Aguaytía, Puerto Bermúdez, San Francisco, entre otros.

El principal productor de Limonaria es la India, seguido de Guatemala. Otros países productores son China, Sri Lanka, Brasil, Argentina, Haití, Indonesia y Tailandia.

La Limonaria es una gramínea que alcanza hasta 2 m de altura. La planta crece en macollos compactos, formados por muchos tallos cortos que salen de rizomas pequeños. Las hojas tienen entre 30 y 100 cm de largo y 1 a 1.5 cm de ancho, con bordes duros y el nervio central fuerte. La

parte utilizables por la industria está constituida por las hojas y los tallos tiernos.

#### **Características Climáticas**

Se establece en climas sub tropicales con temperaturas de 18°C a 25°C, requiriendo precipitaciones entre 1000 a 3000 mm/año.

#### **Características Edáficas**

Crece adecuadamente en una gama de suelos, pero, su mayor productividad se da en los suelos fértiles de textura media a ligera (franco a franco arenoso) y con buena capacidad retentiva de agua. En los suelos arenosos se tiene mayor producción de follaje pero menor aceite esencial. No tolera las condiciones de mal drenaje. El pH puede estar entre 5 y 7.5.

#### **La Siembra**

La Limonaria se reproduce por estolones. La siembra se puede efectuar al inicio de la estación de lluvias, con distanciamientos de 60 a 120 cm entre filas y 45 a 90 cm entre plantas, densidad de 20,000 plantas por hectárea.



Imagen Nº 3.12: Sembríos de *Cymbopogum Citratus*

#### **m) CENTROSEMA PLUMIERI (Centro)**

Esta leguminosa es originaria de América del Sur y es considerada una invasora y se establece en climas tropicales y sub tropicales desde el nivel del mar hasta los 1600 m.s.n.m. Tiene como principales características que es resistente al pisoteo y es resistente a las sequías, sin embargo no es resistente a las quemas. Es una plantas rastrera,

persistente, con una tendencia muy marcada a trepar. Forma una excelente cobertura de los cuatro a los seis meses después de la siembra.

#### **Características Climáticas**

Se establece en climas sub tropicales con temperaturas de 25 °C a 30°C, requiriendo precipitaciones entre 600 a 1000 mm/año. Requiere de mucha luz para su desarrollo.

#### **Características Edáficas**

Se establece en terrenos franco arenosos de fertilidad media a alta. Si el suelo es pobre, conviene aplicar fertilizantes ( $P_2O_5$  y  $K_2O$ ) según un análisis previo. Se establecen bien en suelos con un pH entre 4.2 a 7.5.

#### **La Siembra**

Esta se hace comúnmente con semilla sexual, de cinco a seis Kg./ha en surcos distanciados de 0.50 a 1.00metro. Cuando se establece en asociación y al mismo tiempo que las gramíneas, se pueden sembrar en surcos alternos o al voleo.



*Imagen Nº 3.13: Planta de Centrosema Plumieri*

#### **n) PUERARIA PHASEOLOIDES (Kudzu Tropical)**

Esta gramínea es considerada una invasora y se establece en climas tropicales desde el nivel del mar hasta los 2000 m.s.n.m.

El Kudzu Tropical no es resistente al pisoteo, no es resistente a las sequías y tampoco es resistente a las quemas. Tolera suelos de laderas encharcados.

#### **Características Climáticas**

Se establece en climas tropicales con temperaturas de 22 °C a 30°C, requiriendo precipitaciones entre 1000 a 2000 mm/año.

### Características Edáficas

Se establece en terrenos franco arenosos húmedos a bien drenados. Se adapta muy bien a suelos ácidos y carentes de fósforo.

### La Siembra

Se reproduce por cepas (rastrero) y por siembra.



Imagen N° 3.14: Sembríos de *Pueraria Phaseoloides*

#### o) **STENOTAPHRUM SECUNDATUM (San Agustín)**

Esta gramínea es considerada una invasora y se establece en climas tropicales desde 300 hasta los 2000 m.s.n.m.

El San Agustín no es resistente al pisoteo y tampoco es resistente a las quemas, pero es resistente a las sequías. A diferencia de otras gramíneas es tolerante a la sombra.

### Características Climáticas

Se establece en climas sub tropicales con temperaturas de 18°C a 25°C, requiriendo precipitaciones entre 1000 a 2000 mm/año.

### Características Edáficas

Se establece en terrenos franco arenosos húmedos a bien drenados. Se adapta muy bien a suelos neutros y alcalinos.

### La Siembra

Se reproduce por cepas (rastrero). Sus características de crecimiento son: es una gramínea perenne con estolones achatados y crecimiento cespitoso.



Imagen Nº 3.15: Planta de *Stenotaphrum Secundatum*

#### **p) STIPA ICHU (Ichu)**

Es una de las especies más difundidas en ciertos ecosistemas de Puna. Por sus características morfológicas, el ichu es un pasto apropiado que brinda excelente protección contra la erosión en zonas de puna. También se utiliza para la construcción de techos, artesanías y como alimento forrajero.

#### **Descripción**

Especie perenne, cespitosa, amacollada. Cañas de 25-90 cm de altura, erguidas, glabras o ligeramente escabrosas. Resiste muy bien la sequía y el daño provocado por el paso de las personas.

#### **Hábitat**

Se desarrolla principalmente en la parte alto andina formando grandes pajonales o comunidades. Crece bien en zonas secas al borde de campos cultivados y caminos.

## Distribución

Perú, Bolivia y norte argentino, entre los 3600 - 4200m.



Imagen N° 3.16: Planta de Ichu

### 3.2.2 Especies de Árboles y Arbustos

Estas especies se usan principalmente como sistemas de sujeción y refuerzo del terreno, aunque también participan activamente en la protección del talud contra la erosión pero en menor proporción que las especies herbáceas. En la presente tesis nos enfocamos en especies recomendadas en la zona andina:

#### a) **AGAVE AMERICANA (Maguey)**

La *Agave Americana* pertenece a la familia botánica Amaryllidaceae y se utiliza para la estabilización de suelos, por la forma de sus raíces; también se le da otros usos tales como la fabricación de textiles, extracción de insumos para bebidas alcohólicas y para la fabricación de escaleras.

### **Descripción:**

Las hojas crecen desde el suelo, grandes, lanceoladas y carnosas de color blanco-azulado o blanco-grisáceo, saliendo todas desde el centro donde permanecen *enrolladas* a un tallo central donde se van formando hasta su separación, con espinas en su borde de casi 2 cm muy agudas y finas. Todas las hojas terminan en el ápice en una aguja fina de unos 5 cm de longitud y de hasta 1 cm de ancho en su parte menos extrema.

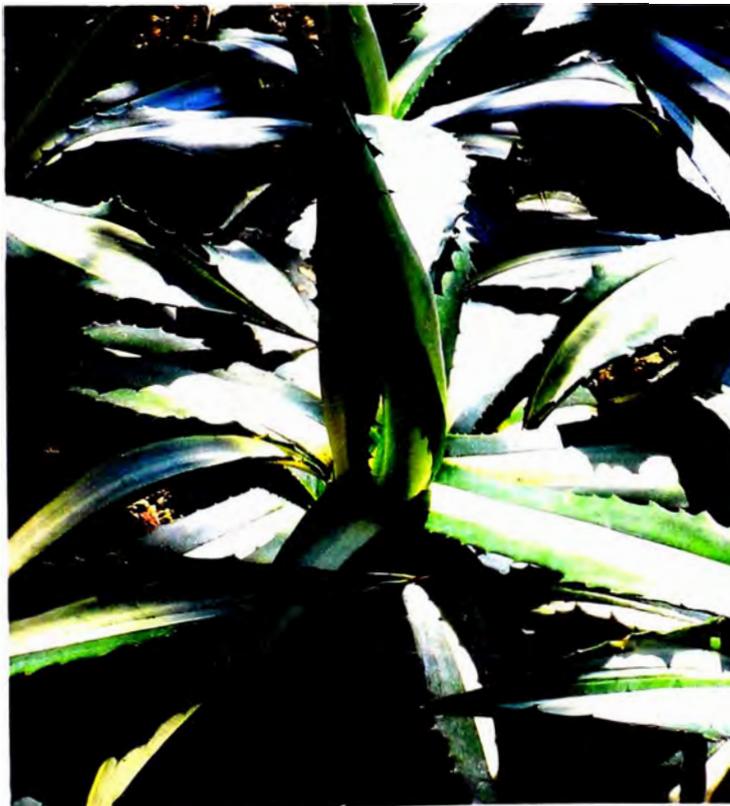
Florece una sola vez en su vida y muere tras esta floración, un fenómeno conocido como monocarpismo.

### **Rangos Climáticos:**

La Agave Americana tiene una resistencia media a las heladas, desarrollándose en un rango altitudinal que va desde el nivel del mar hasta los 3500 m.s.n.m. y con un rango de temperatura media entre los 8° C a los 23° C.

### **Rangos Edáficos:**

La Agave Americana se desarrolla en suelos alcalinos, requiriendo una profundidad escasa de suelo. Tiene una tolerancia alta a la pedregosidad y tiene un requerimiento medio – bajo de agua.



*Imagen N° 3.17: Agave Americana*

### **b) ALNUS JOURULLENSIS (Aliso)**

Es un árbol que pertenece a la familia *Betulaceas* (Aliso, aliso del cerro, aliso blanco). Los árboles jóvenes tienen una corteza lisa y gris clara, mientras que en adultos tienen una corteza rugosa y gris oscura. Forman bosques montanos puros a una altura de 1700 m de altura, y por arriba de los 3000 m Crece en las riberas de los ríos, arroyos y acequias. Forma comunidades con *Prunas serotina* “Guinda”, *Gnaphalium Polum* “Árnica” y *Baccharis Latifolia* “Chilca”.

#### **Descripción:**

Es un árbol de 8 a 12 metros de alto, planta monoica. Hojas simples alternas, pecíolo 1 – 3.4 cm. De largo, limbo elíptico – lanceolado 8 – 10 x 3.5 – 4.5 cm margen aserrado ápice acuminado. Inflorescencia, masculina en aumento colgante, de color amarillo; femenina en espiga estrobiliforme erguida de color verde. Flores unisexuales; masculinas con una bráctea y 8 estambres; femenina con una bráctea y un pistilo con 2 estigmas, ovario bicarpelar, en la base bilocular y en cada lóbulo un óvulo (anátropo) en la parte superior el ovario se observa unilocular. Fruto aquenio alado.

#### **Rangos Climáticos:**

El *Alnus Jourullensis* tiene una resistencia media a las heladas, desarrollándose en un rango altitudinal que va desde los 1200 a 3800 m.s.n.m. y con un rango de temperatura media entre los 7° C a los 20° C.

#### **Rangos Edáficos**

El *Alnus Jourullensis* se desarrolla en distintos tipos de suelos, requiriendo una profundidad media a alta de suelo fértil. Tiene una tolerancia media a alta a la pedregosidad y tiene un requerimiento medio – alto de agua



Imagen N° 3.18: *Alnus Jourullensis*

### c) **BACCHARIS LATIFOLIA (Chilca)**

La *Baccharis Latifolia* pertenece a la familia botánica de las compositae y es también conocida como Algodoncillo, Ciro y Sanalotodo. Es un arbusto que alcanza una altura entre 1.5 a 3 m, posee hojas simples alternas lanceoladas de 20 cm. Aserradas trinervías glabras, verde claras. Base decurrente al pecíolo; pecíolos decurrentes a los surcos de las ramitas.

La *Baccharis Latifolia* abunda en lugares de suelos húmedos conformando manchones en pastizales abiertos y en focos de erosión (en micrositios favorables). Gran aptitud para colonizar pastizales de Kikuyo y suelos compactados por el pastoreo en laderas. En bosques es desplazada por el sombreado de otros elementos leñosos que sobrepasan su altura promedio.

La Chilca es excelente para recuperación de suelos desnudos, control de taludes y surcos. Recuperación de suelos compactados por el sobrepastoreo. Protección de rondas hídricas. En otros usos se utiliza en la medicina popular como analgésico, tónico amargo antidiabético y eupéptico, también es utilizada en las enfermedades hepáticas.

**Descripción:**

La Chilca es una melífera, se propaga por semilla. Se recoge cuando el vilano está bien desarrollado y los frutos se desprenden fáciles de los capítulos. Tratamiento pregerminativo por inmersión de 48 horas. Siembra en almácigo al voleo cubierta con fina capa de paja húmeda. El género *Baccharis* es exclusivamente americano, y consta de unas 400 especies.

**Rangos Climáticos:**

La *Baccharis Latifolia* tiene una resistencia media a las heladas, desarrollándose en un rango altitudinal que va desde los 1600 a 3800 m.s.n.m. y con un rango de temperatura media entre los 7° C a los 19° C.

**Rangos Edáficos**

La *Baccharis Latifolia* se desarrolla en distintos tipos de suelos, requiriendo una profundidad escasa de suelo fértil. Tiene una tolerancia alta a la pedregosidad y tiene un requerimiento medio – bajo de agua.



Imagen Nº 3.19: *Baccharis Latifolia*

#### d) **BUDDLEJA CORIACEA (C'olle)**

Pertenece a la familia de las buddlejaceae y se le conoce como "c'olle", "kolle", "qolly", "culli", "quishuar", "kiswar", "puna quisvar", "tanascullo". El género *Buddleia*, está representado en el Perú con 21 especies de árboles y arbustos identificados. Desde el punto de vista forestal hay dos grupos de especies importantes: el grupo del c'olle que incluye básicamente *Buddleia coriacea*, de gran importancia en la puna y el grupo de quishuar que comprende principalmente *Buddleia incana* y *Buddleia longifolia* de porte arbóreo.

La *Buddleia coriacea* (c'olle negro), puede crecer como arbusto de dos metros de altura hasta ser un árbol de 12 m. de copa amplia y globosa con muchas ramificaciones casi desde el suelo, y fuste tortuoso.

#### **Descripción:**

Las hojas del género son simples, opuestas, sésiles o pecioladas. Su forma y color varían según la especie, así como su tamaño y bordes que pueden ser lisos o dentados. Así *Buddleia incana* tiene hojas grandes cremoso y con pelos muy finos, mientras *Buddleia coriacea* tiene hojas pequeñas, menos de 5 cm, haz de color verde oscuro brillante.

Las flores de *Buddleia* son hermafroditas (completas) actinomorfas y generalmente agrupadas en racimos cimosos. Los frutos pueden ser cápsula, drupa o baya según la especie.

El género tiene en el Perú una amplia distribución: desde los contrafuertes del Pacífico hasta la Ceja de Selva (1500 msnm), y desde Piura hasta Puno. Sus especies se adaptan a diferentes medios, tanto en suelos (profundos, superficiales, pH) como a clima (secos, sub-húmedos y muy húmedos). En el Perú se han identificado 21 especies que crecen entre los 2500 y 3800 msnm, siendo los más importantes *Buddleia Incana*, *Buddleia Coriácea* y *Buddleia Longifolia*. Según la zona de vida la *Buddleia* crece en asociación con muchas especies nativas, como el aliso (*Alnus jorullensis*), la cantuta (*Cantua buxifolia*), el mutuy (*Cassia* spp), q'eñua (*Polypelis* spp.), etc. Es bastante resistente al frío y a períodos de sequía más o menos prolongados.

La *Buddleia coriacea* al ser plantado con un espaciamiento reducido en linderos o en bordes de terrazas, tiene gran importancia como cortinas rompevientos, productor de varas y mejorador del suelo.

### Rangos Climáticos:

La *Buddleia coriacea* tiene una resistencia alta a las heladas y se desarrolla a una altitud variable entre 3400 m.s.n.m. hasta los 4500 m.s.n.m. con una temperatura media entre 6°C y 10°C.

### Rangos Edáficos:

La *Buddleia coriacea* se desarrolla en suelos alcalinos; requiere una profundidad media terreno tolerancia media a la pedregosidad y tiene un requerimiento medio – bajo de agua.



Imagen N° 3.20: *Buddleia coriacea* (UNCP)

### e) *CANTUA BUXIFOLIA* (*Cantuta*)

La *Cantua Buxifolia* pertenece a la familia botánica *polemoniaceae* es originaria de los andes peruanos, su flor es el símbolo nacional del Perú y fue el emblema floral de los incas. Esta especie crece entre 1.5 a 2 m de altura con el tallo principal recto y con las ramas arqueadas. La *Cantua Buxifolia* se reproduce por semillas en veranos, aunque también por esquejes, pero con mayor dificultad.

### Rangos Climáticos:

La *Cantua Buxifolia* tiene una resistencia media a las heladas y se desarrolla a una altitud variable entre 1500 m.s.n.m. hasta los 3100 m.s.n.m. con una temperatura media entre 7°C y 20°C. Requiere sitios

frescos y ventilados, al sol o entre sol y sombra. Se riega moderadamente de marzo a septiembre, requiere abonos moderados pero frecuentes. Conviene podar las ramas más largas después de la floración.

**Rangos Edáficos:**

La *Cantua Buxifolia* se desarrolla en suelos alcalinos; requiere una profundidad media a alta de terreno fértil, tiene una tolerancia media – alta a la pedregosidad y tiene un requerimiento medio – alto de agua.



Imagen Nº 3.21: *Cantua Buxifolia*

**f) CASSIA HOOKERIANA (Mutuy)**

La *Cassia Hookeriana* pertenece a la familia botánica *Caesalpinaceae*. Es un arbusto perenne que crece a una altura promedio de 3 m. Entre las Formas de utilización tenemos consumo humano (las flores y vainas tiernas se consumen en guisos), uso industrial (la madera, combustible, las raíces tallos y hojas se usan como tintes, las ramas largas en canastas), uso medicinal (la planta entera y en especial las hojas se utilizan como medicina, contra la fiebre, tifo, disenterías y fiebres gástricas), usos constructivos (protección del suelo y cercos vivos).

El género *Cassia* es importante como cobertura protectora de suelos, así como por la abundante materia que aporta a los mismos. Es apropiado para formar cercos vivos y especie de terrazas naturales en chacras en laderas con el objeto de ayudar a controlar la erosión y mejorar el suelo. Puede ser un género interesante a considerar en trabajos de restauración de cuencas hidrográficas.

Por la abundante producción de follaje y la capacidad de crecer en suelos pobres, se recomiendan estas especies para plantación de suelos degradados, para dar cobertura de protección a terrenos sin vegetación y erosionados.

**Descripción botánica:**

El género *Cassia* es la leguminosa con el mayor número de especies (sobre 60) en el Perú y la que ocupa el área más vasta. Es un arbusto erguido que mide de 50 cm hasta 3,5 m de altura, con fuste cilíndrico, casi siempre torcido y ramificación alterna desde la base. Las hojas son compuestas de 8 a 10 folíolos paripinnados; en algunas especies, con glándulas en el raquis. Las flores son completas, de color amarillo, dispuestas en racimos axilares; alargados o corimbiformes. Los frutos son vainas de cubierta lisa o con pilosidad, las vainas miden de 7 a 10 cm de largo y 1 cm de ancho, con ligeras contracciones entre semilla y semilla.

**Rangos Climáticos:**

La *Cassia Hookeriana* tiene una resistencia media a las heladas y se establece a una altitud entre los 2600 m.s.n.m. y los 3200 m.s.n.m. con una temperatura media entre 10°C y 14°C.

**Rangos Edáficos:**

La *Cassia Hookeriana* se establece en suelos alcalinos, requiriendo una profundidad media – escasa de terreno fértil, posee una tolerancia media – alta a la pedregosidad y con un requerimiento medio – alto de agua.

**g) CASSIA TORMENTOSA (Mutuy)**

Para el caso de *Cassia tomentosa* es aparentemente nativa de la cordillera de los Andes y las cordilleras de América Central y México. Crece en bosque húmedo Montano, es decir entre los 2300 a los 4000 m.s.n.m.

Se caracteriza por ser un arbusto erguido que mide de 50 cm hasta 3,5 m de altura. Son exigentes en luz, y no soporta las heladas cuando son pequeñas, se adapta a muchas clases de suelos, se le encuentra principalmente en las quebradas húmedas.

**Rangos Climáticos:**

La *Cassia Tormentosa* tiene una resistencia alta a las heladas y se establece a una altitud entre los 2300 m.s.n.m. y los 4000 m.s.n.m. con una temperatura media entre 06°C y 16°C .

**Rangos Edáficos:**

La *Cassia Tormentosa* se establece en suelos alcalinos, requiriendo una profundidad media – escasa de terreno fértil, posee una tolerancia media – alta a la pedregosidad y con un requerimiento medio – alto de agua. Al parecer el pH preferido es neutro, con ligera variación hacia ácido o alcalino.



Imagen N° 3.22: *Cassia Hookeriana* (UNCP)

## h) **CASUARINA CUNNINGHAMIANA (Casuarina)**

La *Casuarina Cunninghamiana* pertenece a la familia botánica de las *Casuarinaceae* y es originaria de Australia; son árboles de hasta 30 m, siempre verdes, copa piramidal y aspecto de conífera. Tienen un tronco muy recto y grueso del que salen las ramas principales, corteza rugosa y de color grisáceo. Las pequeñas ramas que nacen de las principales son muy parecidas a hojas aciculares de los pinos, son muy delgadas, verdes y articuladas. Las hojas están reducidas a pequeñas escamas que forman verticilos en torno a las articulaciones.

### **Rangos Climáticos:**

La *Casuarina Cunninghamiana* tiene una resistencia muy baja a las heladas y se establece a una altitud entre el nivel del mar y los 2200 m.s.n.m. con una temperatura media entre 17°C y 23°C .

### **Rangos Edáficos:**

La *Casuarina Cunninghamiana* se establece en distintos tipos de suelos, requiriendo una profundidad media – alta de terreno fértil, posee una tolerancia baja a la pedregosidad y con un requerimiento bajo de agua.



Imagen N° 3.23: *Casuarina Cunninghamiana*

**i) COLLETIA SPINOSSISIMA (Roque, Quina del campo)**

La *Colletia Spinossisima* pertenece a la familia botánica de Rhamnaceae y alcanza una altura de 2 metros. Este arbusto es usado por sus frutos y por el aporte que tienen sus raíces para la estabilización de suelos.

**Rangos Climáticos:**

La *Colletia Spinossisima* tiene una resistencia alta a las heladas y se establece a una altitud entre los 2500 m.s.n.m. y los 4000 m.s.n.m. con una temperatura media entre 06°C y 15°C .

**Rangos Edáficos:**

La *Colletia Spinossisima* se establece en suelos ácidos, requiriendo una profundidad media – escasa de terreno fértil, posee una tolerancia media – alta a la pedregosidad y con un requerimiento bajo de agua.



Imagen N° 3.24: Colletia Spinossisima

**j) ERYTHRINA EDULLIS (Pashullo, Pajuro, Chachafruto)**

La *Erythrina Edullis* pertenece a la familia botánica de Papilionaceae y alcanza una altura promedio de 8 metros. En esta especie se suelen utilizar los frutos y hojas.

Esta especie forestal se utiliza como un fertilizante natural del suelo (especie nitrificante).

**Rangos Climáticos:**

La *Erythrina Edullis* tiene una resistencia baja a las heladas y se establece a una altitud entre los 1300 m.s.n.m. y los 3400 m.s.n.m. con

una temperatura media entre 09°C y 20°C .

**Rangos Edáficos:**

La *Erythrina Edullis* se establece en suelos alcalinos, requiriendo una profundidad media de terreno fértil, posee una tolerancia media – baja a la pedregosidad y con un requerimiento medio – bajo de agua.

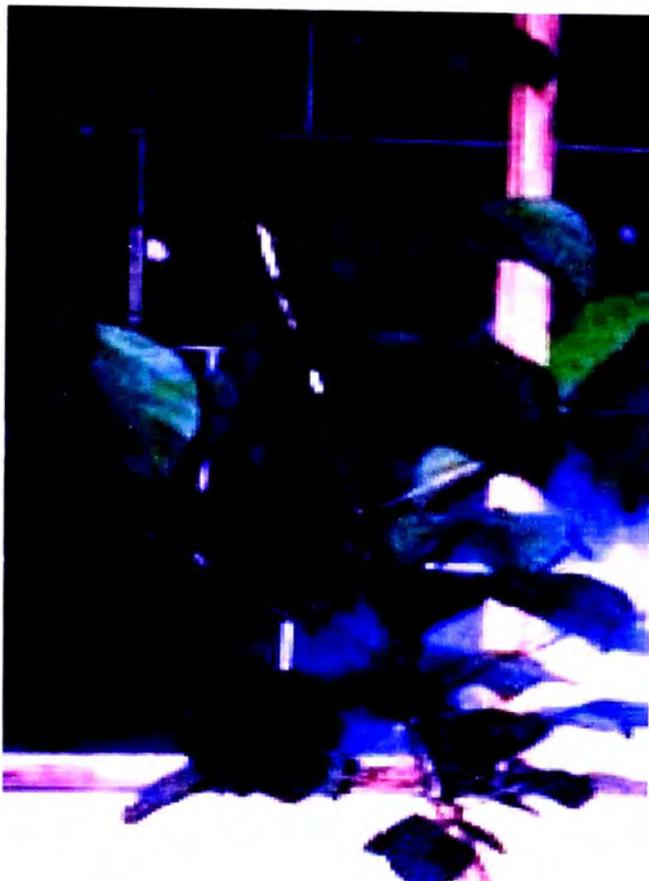


Imagen N° 3.25: *Erythrina Edullis*

**k) EUCALYPTUS GLOBULUS (Eucalipto)**

El *Eucalyptus Globulus* es originario de Australia y fue implantado en otras zonas por el uso de la madera como vigas en túneles mineros. El papel en la estabilización de suelos, surge a partir de la profundidad a la que llegan sus raíces y el alto requerimiento de agua que exige la planta; con esto se logra incrementar el efecto arco y reforzar el talud al incrementar los esfuerzos resistentes y disminuir la humedad del suelo.

**Descripción:**

Árbol siempre verde que puede alcanzar hasta 60 m de altura, con la corteza blanquecina que se desprende en tiras en los ejemplares adultos. Copa piramidal, alta. Tallos jóvenes tetragonos, blanquecino-pubescentes.

Hojas juveniles opuestas, sésiles, de base cordada, de color gris-azulado, de 8-15 cm de longitud y 4-8 cm de anchura. Las adultas alternas, pecioladas, con la base cuneada, linear-lanceoladas, de 15-25 cm de longitud, con el ápice acuminado.

La textura es algo coriácea y son de color verde oscuro, con la nerviación marcada. Flores axilares, solitarias o en grupos de 2-3, de hasta 3 cm de diámetro, con numerosos estambres de color blanco. Florece en Septiembre-Octubre. Fruto en cápsula campaniforme de color glauco y cubierta de un polvo blanquecino, de 1.4-2.4 cm de diámetro.

#### **Rangos Climáticos:**

Es algo sensible a las sequías prolongadas. Prefiere suelos ligeramente ácidos y frescos. No resiste el frío intenso. Árbol maderero y medicinal. Sus hojas contienen aceites que destilados se destinan a las industrias químico-farmacéuticas y de confitería. En medicina popular se utilizan las hojas en infusiones y vapores.

#### **Rangos Edáficos:**

El *Eucalyptus Globulus* se establece en suelos vairados, requiriendo una profundidad alta de terreno fértil, posee una tolerancia media a la pedregosidad y con un requerimiento alto de agua.



Imagen N° 3.26: *Eucalyptus Globulus*

### **l) GYNOXIS OLEIFOLIA (Japur, Piquil)**

La *Gynoxis Oleifolia* pertenece a la familia botánica de *Compositae* y alcanza una altura promedio de 2 a 5 metros.

Es un árbol nativo del Perú, y se utiliza en la estabilización de suelos en zonas donde hay frío intenso y a una gran altitud. Son muy pocas las especies que se adaptan a tales condiciones.

Sus usos comerciales se dan por su madera (leña) en zonas de altura y áridas.

#### **Rangos Climáticos:**

La *Gynoxis Oleifolia* tiene una resistencia alta a las heladas y se establece a una altitud entre los 3300 m.s.n.m. y los 4500 m.s.n.m. con una temperatura media entre 06°C y 10°C. Tolera la aridez, requiriendo menos de 200 mm de precipitación anual.

#### **Rangos Edáficos:**

La *Gynoxis Oleifolia* se establece en suelos alcalinos, requiriendo una profundidad media – baja de terreno fértil, posee una tolerancia alta a la pedregosidad y con un requerimiento bajo de agua.

### **m) KAGENECKIA LANCEOLATA (Lloque)**

La *Kageneckia Lanceolata* pertenece a la familia botánica de *Rosaceae* y alcanza una altura promedio de 4 a 6 metros.

Es un árbol nativo del Perú, y se utiliza en la estabilización de suelos debido a su alta capacidad de rebrote y características de las raíces, las cuales son densas y compactas (plantas ifísticas).

Sus usos comerciales se dan por su madera (leña), su uso en medicina para combatir (de la corteza se prepara una infusión inductora de lisis febriles) y como recurso forrajero.

#### **Rangos Climáticos:**

La *Kageneckia Lanceolata* tiene una resistencia baja a las heladas y se establece a una altitud entre los 2300 m.s.n.m. y los 3600 m.s.n.m. con una temperatura media entre 08°C y 16°C. Soportan climas áridos (menores a 200 mm de precipitación anual)

#### **Rangos Edáficos:**

La *Kageneckia Lanceolata* se establece en suelos alcalinos, requiriendo una profundidad escasa de terreno fértil, posee una tolerancia

alta a la pedregosidad y con un requerimiento bajo de agua.



Imagen N° 3.27: *Kageneckia Lanceolata*

#### n) **LEUCAENA LEUCOCEPHALA (Yaravisco)**

La *Leucaena Leucocephala* pertenece a la familia botánica de *Mimosaceae*. Es un arbolito o arbusto inerme que puede alcanzar 6-8 m de altura, con las ramillas jóvenes pubescentes. Hojas bipinndas, con el pecíolo de 3,5-5 cm de largo, con una glándula en la base del par de pinnas inferiores y el raquis de 7-13 cm de longitud; pinnas de 4 a 8, cada una con 13-15 pares de foliólulos oblongo-lanceolados, asimétricos, agudos, de 11-18 x 3-4 mm.

Flores en capítulos globosos, sobre pedúnculos de 3,5-4 cm de largo. Tienen el cáliz 5-dentado y la corola con 5 pétalos libres; androceo con 10 estambres blanquecinos, exertos. Frutos solitarios o en grupos, dehiscentes, aplanados, glabros, lineares, de 11-30 cm de largo, de color

pardo. Semillas de ovadas a elíptico-oblongas, de 7-11 mm de longitud, de color marrón o negruzco, con una areola central alargada.

Se multiplica con facilidad por semillas. Planta rústica de rápido crecimiento que vegeta bien en multitud de situaciones, ideal para repoblar zonas marginales, ya que se va multiplicando ella sola con rapidez, llegando incluso a convertirse en una mala hierba.

**Rangos Climáticos:**

La *Leucaena Leucocephala* tiene una resistencia baja a las heladas y se establece a una altitud entre el nivel del mar y los 2300 m.s.n.m. con una temperatura media entre 16°C y 26°C.

**Rangos Edáficos:**

La *Leucaena Leucocephala* se establece en suelos variados, requiriendo una profundidad media – baja de terreno fértil, posee una tolerancia media a la pedregosidad y con un requerimiento medio – alto de agua.



Imagen Nº 3.28: *Leucaena Leucocephala*

### **o) LUPINUS MUTABILIS (Tarwi, chocho)**

El *Lupinus Mutabilis* pertenece a la familia botánica de *Papilionaceae* y alcanza una altura promedio de 2 a 3 metros.

#### **Descripción:**

El *Lupinus Mutabilis* es una leguminosa herbácea erecta de tallos cilíndricos, robustos, algo leñoso, generalmente de color verde oscuro, amarillento a veces variando hacia castaño. Se ramifica a partir de un eje central en forma de un candelabro. La floración y formación de frutos es a menudo dispersa en el tiempo, las flores son de color azul, pero pueden cambiar a blanco y rosado. Las vainas contienen 6-8 semillas (granos). Los granos contienen alcaloides amargos que impiden su consumo directo.

El tarwi tiene inflorescencias racemosas, de color azul, celeste, morado, blanco o rosado, con varios verticilos florales, cada uno de 5 flores, el color de las flores puede variar de azul claro a oscuro, o ser de color púrpura, blanco, amarillento o rosado. Androceo formado por 10 estambres dorsifijos y 5 basifijos, las flores en un 50 -70% no llegan a formar frutos especialmente en ramas secundarias y terciarias, debido a la abscisión floral.

El fruto es una legumbre pubescente, indehiscente en las cultivadas y con cierta dehiscencia en las semicultivadas y silvestres, de forma elíptica u oblonga, aguda en ambos extremos, con cerca de 120 vainas por planta. En las vainas se encuentran las semillas, que pueden variar en su número. Las semillas pueden ser de forma redonda u ovalada, lenticulares, de 5-15 mm de largo y 6-8 mm de ancho, de color variable, pueden ser blancas, marrones o negras y tienen un diámetro aproximadamente de 1 cm. Los colores se presentan en forma combinada, pudiendo ser marmoteado, en media luna o salpicado. El tegumento que cubre esta semilla es de consistencia dura y contienen alcaloides amargos que impiden su consumo.

Sus raíces son bastante profundas, de tipo pivotante y pueden llegar hasta 2.5 m de profundidad, las raíces secundarias ramificadas tienen nódulos simbióticos con bacterias del género *Rhizobium*.

En el estado de floración la planta se incorpora a la tierra como abono verde, con buenos resultados mejorando la cantidad de materia orgánica,

estructura y retención de humedad del suelo. Por su contenido de alcaloides se siembra a menudo como cerco vivo o para separar parcelas de diferentes cultivos, evitando el daño que pudieran causar los animales.

#### **Rangos Climáticos:**

El *Lupinus Mutabilis* tiene una resistencia alta a las heladas y se establece a una altitud entre los 2500 m.s.n.m. y los 4200 m.s.n.m. con una temperatura media entre 05°C y 15°C.

#### **Rangos Edáficos:**

El *Lupinus Mutabilis* se establece en suelos variados, requiriendo una profundidad media – baja de terreno fértil, posee una tolerancia media – alta a la pedregosidad y con un requerimiento medio – alto de agua.



Imagen N° 3.29: *Lupinus Mutabilis*

#### **p) OPUNTIA FICUS - INDICA (Tunas)**

El *Opuntia Ficus - Indica* pertenece a la familia botánica de las *Cactaceae* y alcanza una altura promedio de 1.5 metros. El género **Opuntia**, de la familia de las cactáceas, consta de más de 300 especies todas oriundas del continente americano desde el norte de Estados Unidos hasta la Patagonia, donde viven silvestres. Este extenso género abarca plantas de muy diferentes tamaños, desde la pequeña *Opuntia micordasys* var. *albispina*, llamada comúnmente "ala de ángel" por sus gloquidios de diminutas espinas blancas que le dan un aspecto afelpado.

### Descripción:

La especie tipo es la *Opuntia ficus-indica*, conocida familiarmente como "Tuna". Este es un arbusto perenne, tiene tallos suculentos y está formado por cladodios superpuestos, provistos de espinas, agrupadas en dos o solitarias. Flores amarillas, sin pecíolo. Frutos en baya, espinosos, de hasta 9 cm. comestibles. Se cultiva en zonas áridas y semiáridas, donde se encuentra asociado a matorrales xerófilos y bosques de encino y pino. De este arbusto son usados las pencas y los frutos, sin embargo también se emplea para la estabilización de suelos por la disposición que tienen sus raíces.

### Rangos Climáticos:

El *Opuntia Ficus - Indica* tiene una resistencia baja a las heladas y se establece a una altitud entre el nivel del mar y los 3000 m.s.n.m. con una temperatura media entre 11°C y 23°C.

### Rangos Edáficos:

El *Opuntia Ficus - Indica* se establece en suelos alcalinos, requiriendo una profundidad escasa de terreno fértil, posee una tolerancia alta a la pedregosidad y con un requerimiento medio – bajo de agua.



Imagen N° 3.30: *Opuntia Ficus – Indica*

#### q) **PINUS RADIATA (Pino)**

El *Pinus Radiata* pertenece a la familia botánica de *Pinaceae* y al orden de las Coniferales; es conocido como Pino Monterrey o Pino Insigne, es originario de la costa occidental de Norte América.

Su uso es principalmente con fines madereros, sin embargo por su alto requerimiento de agua es usado en la estabilización de taludes.

#### **Rangos Climáticos:**

El *Pinus Radiata* tiene una resistencia alta a las heladas y se establece a una altitud entre los 1500 m.s.n.m. y los 3500 m.s.n.m. con una temperatura media entre 05°C y 20°C. Requiere una humedad promedio del 40% y una precipitación anual media superior a 380 mm.

#### **Rangos Edáficos:**

El *Pinus Radiata* se establece en suelos variados, requiriendo una profundidad media – alta de terreno fértil, posee una tolerancia media a la pedregosidad y con un requerimiento medio – alto de agua.



Imagen N° 3.31: *Pinus Radiata* (UNCP)

**r) POLYLEPIS INCANA (Q'eñua, Queñua)**

La *Polylepis Incana* pertenece a la familia botánica de las Rosaceae y alcanza una altura promedio de 5 metros. El género *Polypelis* tiene 12 especies identificadas para el Perú y 33 en la zona andina. En la Sierra del Perú se ha trabajado más con *Polypelis incana* y *Polypelis racemosa*.

**Descripción:** Estas especies son importantes por crecer en partes altas, de clima muy frío. Son importantes en el control de la erosión, protección de cuencas hidrográficas y, como hábitat para la fauna silvestre. La madera de q'eñua es dura, pesada y de color rojizo.

**Rangos Climáticos:** La *Polylepis Incana* tiene una resistencia alta a las heladas y se establece a una altitud entre los 2800 m.s.n.m. y los 5000 m.s.n.m. con una temperatura media entre 06°C y 12°C.

**Rangos Edáficos:** La *Polylepis Incana* se establece en suelos alcalinos, requiriendo una profundidad media – baja de terreno fértil, posee una tolerancia alta a la pedregosidad y con un requerimiento medio – alto de agua.

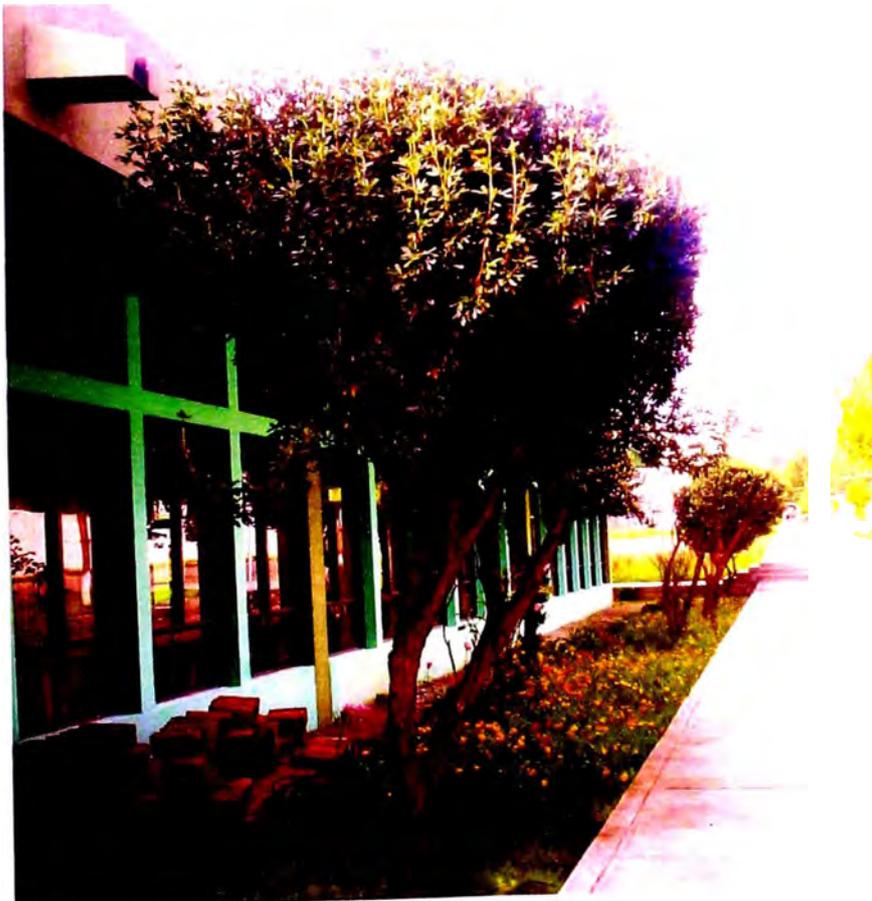


Imagen N° 3.32: *Polylepis Incana* (UNCP)

**s) SOLANUM NITIDUM (Huaychja)**

El *Solanum Nitidum* pertenece a la familia botánica de las *Solanaceae* y alcanza una altura promedio de 2 metros.

**Rangos Climáticos:**

El *Solanum Nitidum* tiene una resistencia media a las heladas y se establece a una altitud entre los 2000 m.s.n.m. y los 3800 m.s.n.m. con una temperatura media entre 07°C y 18°C.

**Rangos Edáficos:**

El *Solanum Nitidum* se establece en suelos variados, requiriendo una profundidad media – baja de terreno fértil, posee una tolerancia baja a la pedregosidad y con un requerimiento medio – alto de agua.



Imagen Nº 3.33: *Solanum Nitidum*

**t) SPARTIUM JUNCEUM (Retama)**

El *Spartium Junceum* pertenece a la familia botánica de las *Fabaceae* y alcanza una altura promedio de 3 metros. Es una planta nativa perenne del sur de Europa y pertenece a la familia de las leguminosas. Su periodo de floración se da en primavera y verano.

### **Descripción:**

Las hojas son sencillas, lanceoladas o lineares, pequeñas y escasas. Los tallos son verdes, flexibles y sin ramificar. Las flores, muy perfumadas, son de color amarillo, con estandarte erecto y circular y unas grandes alas, que pueden estar muy abiertas. El fruto es una legumbre aplanada que contiene unas 10 semillas.

Se utiliza como estabilizador de suelos, por la conformación que tienen sus raíces, mientras que sus frutos se utilizan para el tratamiento de la hidropesía, sus flores se usan comercialmente para usos en celebraciones religiosas.

### **Rangos Climáticos:**

El *Spartium Junceum* tiene una resistencia media a las heladas y se establece a una altitud entre el nivel del mar y los 3500 m.s.n.m. con una temperatura media entre 08°C y 23°C.

### **Rangos Edáficos:**

El *Spartium Junceum* se establece en suelos alcalinos, requiriendo una profundidad media de terreno fértil, posee una tolerancia baja a la pedregosidad y con un requerimiento bajo de agua.



Imagen Nº 3.34: *Spartium Junceum*

**u) TECOMA SAMBUCIFOLIA (Huaranhuay)**

El *Tecoma Sambucifolia* pertenece a la familia botánica de las *Bignonaceae* y alcanza una altura promedio de 2 a 5 metros. Es una planta nativa a América Central y América del Sur, que crece en la zona andina del Perú. Se utiliza en el control de erosión de suelos y en la medicina. Sus flores son amarillas y duran por muchos meses en el año. Se reproduce por semillas y por esquejes.

**Rangos Climáticos:**

El *Tecoma Sambucifolia* tiene una resistencia baja a las heladas y se establece a una altitud entre los 2200 m.s.n.m. y los 3400 m.s.n.m. con una temperatura media entre 09°C y 17°C.

**Rangos Edáficos:**

El *Tecoma Sambucifolia* se establece en suelos variados, requiriendo una profundidad media – baja de terreno fértil, posee una tolerancia baja a la pedregosidad y con un requerimiento medio – alto de agua.



Imagen N° 3.35: *Tecoma Sambucifolia* (UNCP)

### 3.3 Técnicas de Siembra e Implantación

Tal como establece Carmen Mataix Gonzalez (3), el establecimiento de la vegetación seleccionada en un procesos de reforestación, para la estabilización de taludes, debe seguir los siguientes pasos:

#### Preparación del Terreno

Generalmente, los taludes presentan unas características inherentes a su proceso de construcción, que son inadecuadas para el desarrollo de la vegetación, tal como la compactación o la pobreza edáfica.

También es frecuente, especialmente si se trata de taludes antiguos, la existencia de regueros y cárcavas e incluso de problemas puntuales de inestabilidad y socavamiento de la base del talud, provocados en la mayoría de los casos por un control deficiente de las escorrentías superficial y subsuperficial.

Por tanto, antes de proceder a la implantación de la vegetación es necesario realizar una serie de operaciones de preparación encaminadas a corregir estas deficiencias, para crear en la zona de actuación unas condiciones topográficas, de drenaje y de calidad del sustrato adecuadas.

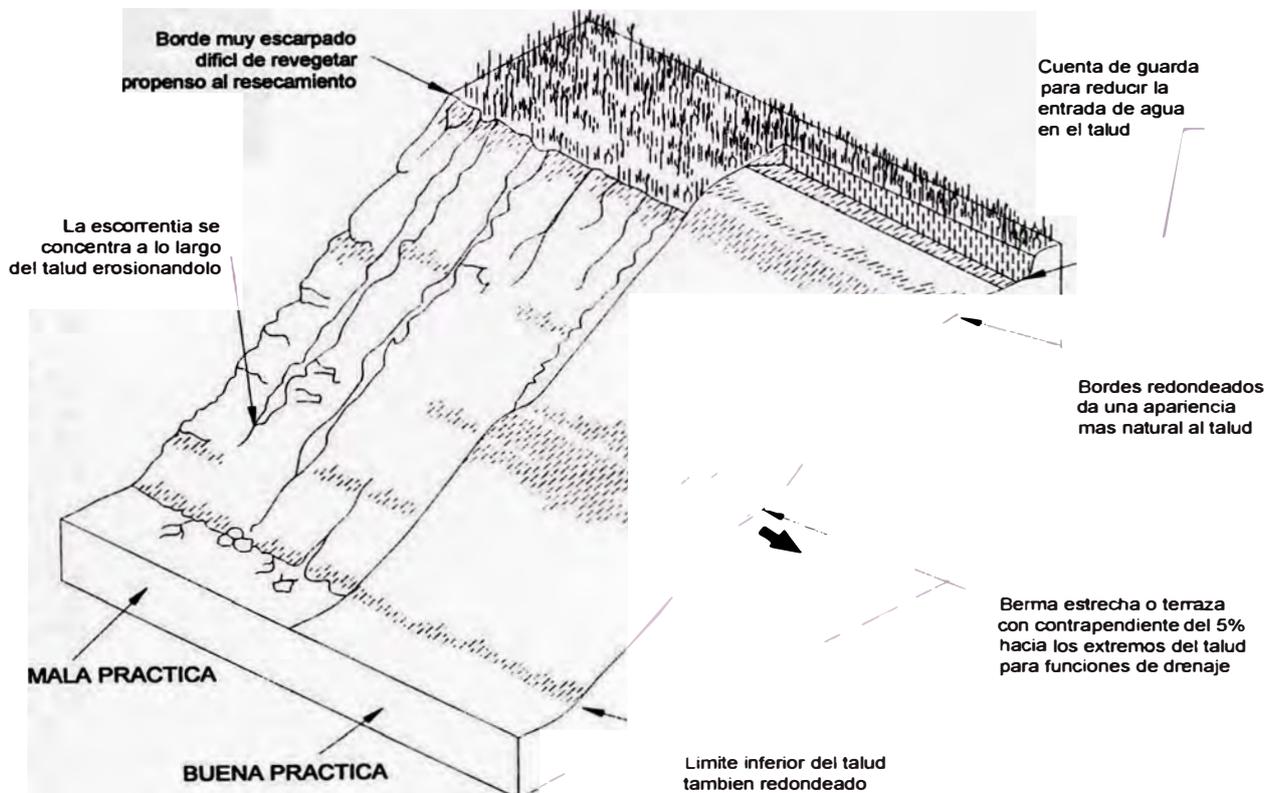


Fig. N° 3.2: Remodelado de un talud típico

Estas operaciones de preparación pueden englobarse en tres grupos básicos de medidas:

- Remodelado y control de drenaje.
- Preparación mecánica del sustrato.
- Mejoras edáficas.

Siempre que sea posible, las labores de preparación, e incluso las de revegetación deben realizarse de forma progresiva y simultánea con la construcción del talud, ya que, en la mayoría de los casos, una vez que se concluye éste, la accesibilidad al talud queda muy limitada y la pendiente impone serias restricciones al empleo de maquinaria, cuando no impide su uso.

### **Actuaciones Complementarias**

Se han desarrollado numerosas técnicas, productos y materiales que ayudan muy eficazmente a alcanzar buenos resultados en la revegetación cuando las condiciones de los taludes son desfavorables.

Los siguientes productos son utilizados para revertir situaciones desfavorables y conseguir una adecuada revegetación en el talud:

#### **a. Geosintéticos**

Los geosintéticos se utilizan generalmente para proteger la superficie del talud frente a la erosión y sujetar las capas superficiales del terreno, aunque también favorecen y aceleran los procesos de arraigo y desarrollo de la vegetación.

El efecto que proporcionan es muy similar al de la vegetación en cuando a modificación del régimen de escorrentía superficial (intercepción, infiltración, drenaje sub superficial, etc), protección frente a la erosión por golpeteo, refuerzo y sujeción mecánica de las capas superficiales del suelo, modificación de las propiedades del suelo.

Las más utilizadas para el tratamiento de taludes son:

- *Los geotextiles*, son fabricados con fibras de polietileno de alta densidad, fibra de nylon u otros materiales no fotodegradables, tejidas en una o más capas. Una vez instaladas sobre el talud se rellenan de tierra y se siembra. Las raíces de las plantas se introducen por los huecos del tejido (el volumen de huecos proporcionado es superior al 90%) entrelazándose con las fibras del geosintético, de manera que se forma una capa compacta y muy resistente que liga estrechamente el

estrato vegetal con la superficie del talud, y que proporciona una protección contra la erosión permanente y eficaz.

- *Las redes y mantas orgánicas*, están fabricadas con materiales naturales, generalmente de origen vegetal (paja, cereal, yute, fibra de coco), aunque también se utilizan materiales de desecho, como papel usado o residuos forestales. Son biodegradables, por lo que sólo deben ser usadas cuando es suficiente un control temporal de la erosión, hasta que la vegetación haya arraigado. Se instalan sobre la superficie del talud, cubriendo con ellas el suelo y las semillas. Las mantas actúan como un colchón amortiguador de la energía cinética de las gotas de lluvia, evitando la erosión por golpeteo, controlan la evaporación y evitan el desecamiento del suelo y de las semillas. En las redes, las fibras con las que están tejidas actúan como pequeños diques que evitan que las semillas y el suelo sean arrastrados. Tanto unas como otras añaden materia orgánica al suelo al descomponerse. Existen en el mercado productos modificados que llevan incorporados sustrato, con o sin semillas, productos estabilizantes o productos absorbentes.
- *Las georedes, mantas volumétricas y redes de confinamiento celular*, están especialmente indicadas para el tratamiento de taludes de gran pendiente en los que es necesario aportar suelo. Este tipo de geosintéticos una vez instalados sobre el talud, forman una serie de estructuras de contención, celdas o alveolos, que quedan rellenas con el sustrato aportado e impiden que éste se deslice pendiente abajo. Pueden ser sintéticas, fabricadas con fibras de nylon tejidas, tiras de poliéster o láminas de polietileno de alta densidad, o naturales fabricadas con fibras vegetales tejidas.

### **Instalación de Geosintéticos**

Presentamos tres casos Prácticos:

#### *Malla Orgánica Bidimensional para el control de la erosión*

1. Superficie alisada, limpia y fertilizada.
2. Geotextil desenrollado y clavado, asegurado en la cabecera y el pie del talud con una zanja cuadrada.
3. Siembra sobre el geotextil.

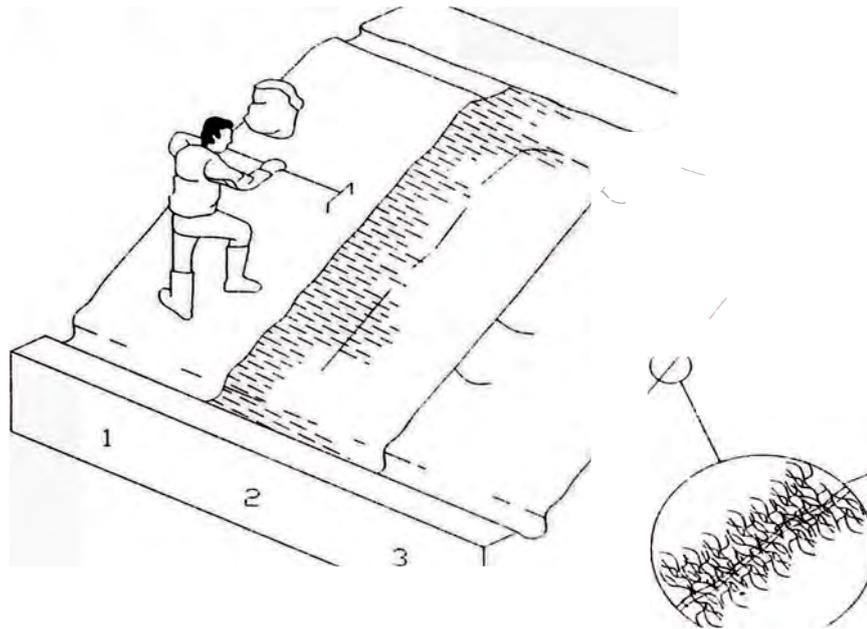


Fig. N° 3.3: Instalación de Geosintéticos: Caso 1

**Malla Sintética Tridimensional para el control de la erosión y el reforzamiento superficial**

1. Superficie alisada, limpia y fertilizada.
2. Estera desenrollada y clavada, asegurada en la cabecera y el pie con una zanja cuadrada. Solapamiento 100 mm.
3. Siembra.

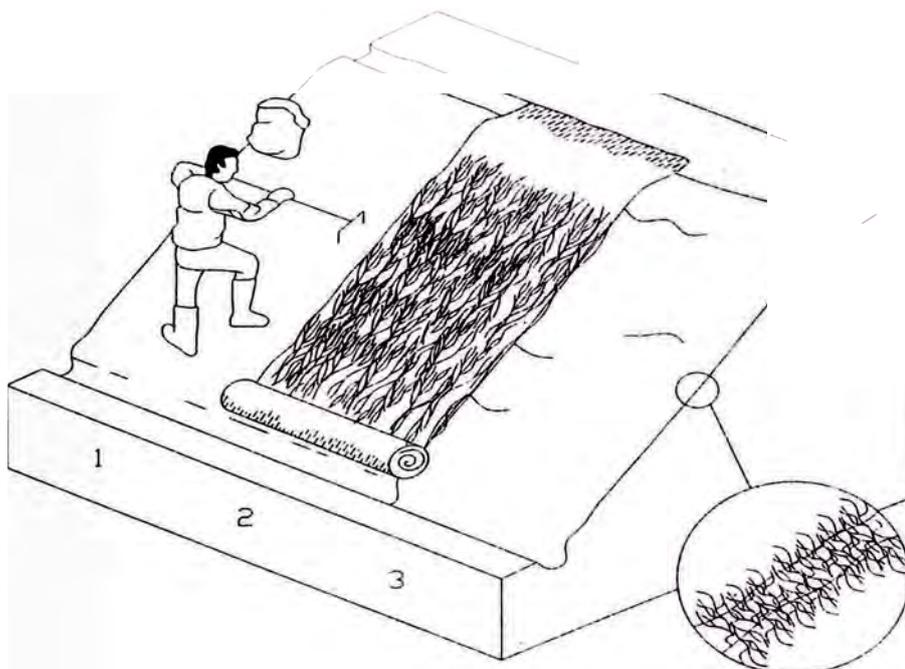


Fig. N° 3.4: Instalación de Geosintéticos: Caso 2

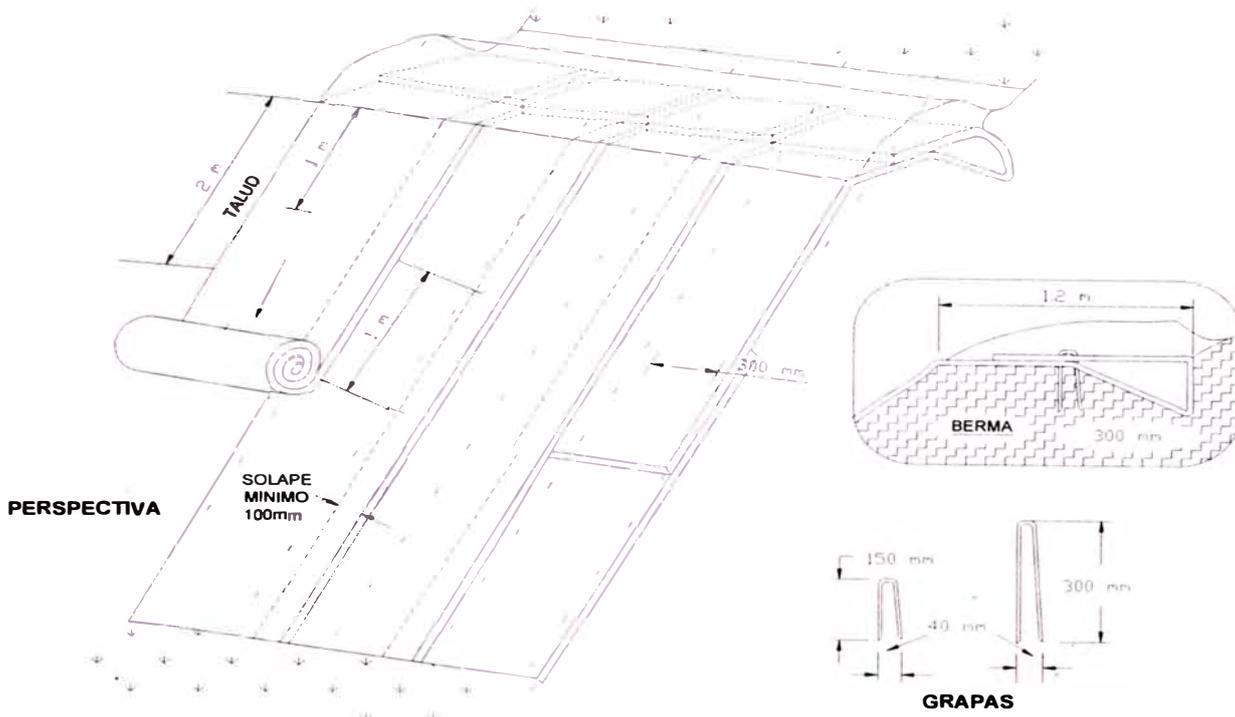


Fig. N° 3.5: Instalación de Geosintéticos: Caso 3 instalación de mantas orgánicas

### b. Productos Aglutinantes y Adherentes

Son productos que se proyectan en solución acuosa sobre la superficie del talud. Una vez se seca esta solución, forma un película o costra protectora que impide la desagregación de las partículas del suelo. Entre estos productos, se utilizan como pegantes emulsiones bituminosas, plásticos líquidos, emulsiones naturales derivadas de productos lignocelulósicos y emulsiones de aceite de butadieno.

Este tipo de productos protegen el talud frente a la erosión, pero no mejoran sus condiciones microclimáticas, ni favorecen por sí solas los procesos de revegetación. Su acción es temporal y el efecto protector desaparece a corto plazo. Por otro lado, disminuyen la tasa de infiltración, por lo que no deben ser utilizados en situaciones en las que se prevé la generación de grandes volúmenes de escorrentía, ya que pueden provocar un efecto contrario al buscado, e incrementar la intensidad de los procesos erosivos.

El tipo de producto a utilizar debe ser seleccionado cuidadosamente, considerando su capacidad de penetración en el suelo, su grado de

toxicidad para las plantas y la resistencia que opondrá la película protectora creada tras su aplicación a la emergencia de las plántulas.

### **c. Mulches**

Se define como mulch toda cubierta orgánica o inorgánica, que tiene un efecto protector, aunque normalmente sólo se utiliza este término para hacer referencia a materiales orgánicos desmenuzados. Se suelen utilizar residuos agrícolas (paja de cebada o trigo), residuos forestales (aserrín, astillas, corteza, pasta triturada de papel, etc). Generalmente se proyectan sobre el talud junto con productos pegantes para asegurar que queden fijados al talud.

Se utilizan fundamentalmente para proteger la superficie del talud frente a la erosión hídrica y eólica, aunque también mejoran el microclima de la superficie del terreno y lo hacen más favorable para las plantas (disminuyen las variaciones extremas de temperatura en la superficie del suelo, reducen las pérdidas de agua por evaporación e incrementan el nivel de humedad del suelo) y evitan que las semillas sean arrastradas pendiente abajo.

## **3.4 Implantación y Siembra de la Vegetación**

### **a) Siembra**

La siembra consiste en depositar semillas sobre el terreno previamente preparado. Mayormente se utilizan semillas de especies herbáceas, pero también se suele utilizar semillas de arbustos y árboles.

Permite crear a corto plazo una cubierta vegetal de bajo crecimiento, pero densa, capaz de proteger el suelo de los procesos erosivos y de otros factores perjudiciales (deslizamientos, temperaturas extremas, superficies de escorrentía, etc) y juega también un papel destacado en el desarrollo del sustrato edáfico.

Los métodos mas usados en la siembra son:

- *Siembra en hileras*, consiste en depositar las semillas en surcos abiertos previamente con un arado de discos o manualmente. Una vez depositadas las semillas, éstas se entierran por acción del propio apero que abre el surco o mediante el uso de rastrillos, etc. y se compacta el suelo alrededor de las semillas. Todas estas acciones se

realizan en una sola pasada. Este método se puede realizar en zonas de topografía suave y con suelos fértiles y libres de piedras.

- Siembra a voleo convencional, Consiste en distribuir las semillas directamente sobre la superficie del suelo. Puede realizarse por medios manuales, cuando se trata de terreno de difícil acceso, o por medios mecánicos, utilizando sembradoras neumáticas. Con este método, las semillas no son introducidas en el suelo, sino que quedan depositadas en la superficie, y expuestas a la desecación y el arrastre. En materiales de textura gruesa las semillas pueden introducirse de forma natural entre las pequeñas grietas y hendiduras del terreno, donde el microclima es más favorable para la germinación. Pero, en terrenos de textura fina, donde no existen estas irregularidades, las semillas quedan expuestas a la desecación y es conveniente realizar un tapado posterior con mulch o bien enterrar posteriormente las semillas. La distribución de las semillas es irregular, por lo que conviene realizar la siembra en varias aplicaciones, repartiendo las semillas en diferentes direcciones. En los taludes la siembra debe realizarse en sentido ascendente y distribuyendo más cantidad de semillas en la parte alta del talud y en los bordes de la zona de tratamiento.
- *Hidrosiembra*, es la proyección a gran presión sobre la superficie del terreno de una suspensión homogénea de agua y semillas, con otros aditivos opcionales, como fertilizantes, mulches y estabilizadores químicos, para fijar las semillas y el mulch al terreno y evitar pérdidas por efecto del viento, de la escorrentía o por gravedad. Está especialmente indicada para superficies de gran pendiente, terrenos poco consolidados y espacios inaccesibles a la maquinaria convencional. Se realiza con una hidrosembradora, que consiste en un camión o remolque al que se acopla una cisterna metálica con un agitador en su interior constituido por varias paletas que sirven para mezclar los componentes de la hidrosiembra, y un cañón hidráulico dirigible a través del cual se proyecta la mezcla. La dosis de aplicación varía de 2 a 4lts/m<sup>2</sup>. Generalmente la cantidad de sólidos en suspensión que las hidrosembradoras admiten en la mezcla oscila entre el 10 y 15%, pero en las zonas de mucha pendiente (>35°) o

con graves problemas de estabilidad, es necesario aumentar las dosis de estabilizador y mulch. La hidrosiembra debe realizarse en dos pasadas, la primera incorporando las semillas y los fertilizantes y la segunda aplicando el resto del mulch.

- *Siembra con Mulch en seco*, es una variación de la siembra a voleo que se utiliza cuando es necesario aplicar una gran cantidad de mulch. Se diferencia de la hidrosiembra en que el extendido del mulch se realiza en seco mediante aire comprimido, una vez que las semillas se han distribuido con un equipo de hidrosiembra o por medios manuales. Se suele utilizarse mulch en cantidades que oscilan entre 4.5 y 6.0 toneladas por hectárea. Presenta ventajas sobre la hidrosiembra en zonas donde las características de suelo y clima son especialmente desfavorables, el riesgo de erosión es muy elevado o bien las semillas empleadas son especialmente sensibles al desecamiento, ya que la capa de mulch creada es mucho más gruesa que en la hidrosiembra y la protección que proporciona más efectiva. Una variante de esta técnica consiste en utilizar una manta orgánica con semillas y mulch montada en un geotextil que se fija sobre el talud con grapas o clavos. Los fertilizantes y el suelo se extienden antes de fijar la manta. Es importante que la manta quede muy junta con el suelo, por lo que no es recomendable su uso en superficies muy irregulares.
- *Siembra en Hoyo*, es un método de siembra manual en el que las semillas se introducen en un hoyo previamente excavado. El número de semillas que se introducen en cada hoyo varía en función del tamaño de las mismas. Los hoyos suelen tener de 10 a 15 cm de diámetro y 10 – 20 cm de profundidad. La distancia entre hoyos es variable dependiendo de la densidad final de cubierta que se pretenda, aunque normalmente se suele utilizar una distancia de entre 1 y 5 m. Este método suele utilizarse para la implantación de árboles y arbustos. También es recomendable cuando no es viable realizar una siembra extensiva del talud, en los casos donde ya existe una cubierta herbácea en la zona a tratar y únicamente se pretende introducir algunas especies leñosas, o cuando no es necesario crear una cubierta vegetal a corto plazo.

## b) Plantación

La plantación es el método habitual de establecimiento de vegetación cuando las condiciones de la zona de tratamiento no son adecuadas para que las semillas germinen y las plántulas se desarrollen.

Para mejorar las condiciones nutricionales e incrementar la capacidad de retención de agua del suelo, suelen añadirse al hoyo de plantación diversos productos como compost, estiércol, turba, fertilizantes de liberación lenta y polímeros absorbentes. Cuando los suelos son especialmente pobres, al rellenarse los hoyos puede sustituirse el material obtenido de su excavación por tierra vegetal o suelo de buena calidad.

Prácticamente todo tipo de árboles, arbustos e incluso herbáceas pueden ser plantados. El tamaño de planta y su forma de presentación deben elegirse considerando las condiciones de suelo y clima del talud, las características morfológicas y fisiológicas de las plantas, las funciones asignadas a la vegetación dentro de los objetivos de estabilización y/o protección del talud y el efecto que se pretenda conseguir.

### **Plantación en Taludes de Gran Pendiente con Problemas de Inestabilidad Superficial**

En este tipo de taludes el problema principal es que las plantas pueden quedar enterradas con los materiales que se deslizan pendiente abajo.

Durante la plantación el paso de los operarios por la superficie del talud también puede provocar la caída de materiales y agravar este problema. En estas circunstancias lo más recomendable es estabilizar previamente la superficie del suelo mediante una siembra con especies que no sean competidoras de las plantas que vayan a utilizarse en la plantación.

Para minimizar los daños que pudieran ocasionarse por el deslizamiento y la caída de materiales, los trabajos de plantación deben comenzar por la cabecera del talud y progresar hacia la base perpendicularmente a la línea de máxima pendiente.

### **Plantación en Suelos muy Secos**

En este tipo de suelos el objetivo es maximizar la tasa de infiltración e incrementar la capacidad de almacenamiento de agua del suelo. Esto puede lograrse de diferentes formas:

- Aportando al hoyo de plantación productos absorbentes para retener la humedad.
- Cubriendo los alrededores de la planta con mulches o protectores de base para reducir el nivel de evaporación de agua a nivel del suelo.
- Realizando riegos periódicos de mantenimiento hasta la estabilización de la plantación.
- Realizando la plantación en pequeñas terrazas con contrapendiente, para recoger la escorrentía y concentrarla en un área accesible a las raíces de las plantas.
- Rellenando los hoyos de plantación con una mezcla de turba húmeda, suelo y fertilizante.

### **Plantación de Tepes**

La vegetación herbácea puede ser introducida mediante el trasplante de tepes. Los tepes son porciones de tierra cubierta de césped, muy trabada por las raíces, que se corta para colocarla en otro sitio.

Es un método que asegura el recubrimiento y estabilización inmediata de la superficie tratada, pero su realización es mucho más cara que otras técnicas y sólo se suele utilizar en situaciones muy concretas, tales como :

- En zonas sometidas a procesos de erosión muy activa, donde es imprescindible lograr un recubrimiento instantáneo del talud, como pueden ser en orillas o márgenes sometidas a la acción directa de la corriente.
- En taludes con gran longitud de pendiente, plantando franjas de tepes en líneas transversales o formando un enrejado, para que actúen como núcleo estabilizado de vegetación desde el cual ésta pueda propagarse y colonizar el resto del talud.

Los tepes cultivados en vivero generalmente se sirven en pequeños bloques o en tiras, de 0.3 a 0.4 m de ancho y 0.5 a 1.0 m de largo. También pueden obtenerse tepes de forma natural retirando previamente las tiras de césped de las zonas que van a ser alteradas por la construcción del talud. Los tepes obtenidos de esta forma, generalmente, son menos consistentes y de calidad inferior a los producidos en viveros, aunque presentan la ventaja de que las plantas están perfectamente adaptadas a las condiciones climáticas de la zona de actuación.

La superficie donde vayan a ser instalados los tepes debe ser descompactada y nivelada, para facilitar la penetración de las raíces y asegurar un íntimo contacto entre estos y la superficie del talud. Dependiendo de las características del sustrato y la climatología de la zona puede ser conveniente aplicar fertilizantes y/o productos absorbentes y estabilizantes al suelo.

### 3.5 Cuidados Posteriores.

La implantación de la nueva vegetación no queda concluida con la plantación o siembra propiamente dicha, sino que es necesario efectuar una serie de cuidados posteriores que garanticen el desarrollo adecuado a la vegetación hasta que pueda mantenerse por si sola.

Los siguientes cuidados son necesarios a la vegetación:

- *Fertilización*, es conveniente efectuar chequeos anuales para asegurarse de que no existen deficiencias nutricionales. Los síntomas más típicos de que esto ocurre son el amarillamiento del follaje y la aparición de calveros. Los fertilizantes pueden ser añadidos en forma de abonado foliar o diluidos en el agua de riego.
- *Riego*, es preciso proporcionar agua abundante a las plantas y a las semillas sembradas desde los momentos iniciales hasta que se haya asegurado el arraigo. El riego de superficies hidrosebradas deberá efectuarse con máximo cuidado para evitar el arrastre de tierra o semillas. Los momentos del día más oportunos para regar son las primeras horas de la mañana y de la tarde, y en cualquier caso no es recomendable efectuar el riego durante periodos de fuertes vientos.
- *Resiembra*, si existen zonas donde las semillas no han llegado a germinar, debe proceder a la resiembra de estas superficies con las mismas especies y dosis que en la primera siembra.
- *Reposición* durante el verano siguiente a la plantación debe comprobarse la presencia de ejemplares arbóreos o arbustivos muertos. El número de plantas secas o la proporción de superficie donde las plantas no han arraigado respecto al total plantado, son indicativos del tipo de problema que ha podido producir la muerte de las plantas. Sea cual sea la causa de la mortandad, es necesario reponer los pies muertos utilizando las mismas especies empleadas en la primera plantación,

excepto cuando la mortalidad haya afectado a más del 70% del total de los pies, o cuando se observen grandes calveros entre la plantación, ya que ello puede ser debido a que la especie o especies empleadas no son adecuadas para la zona.

- *Aclareo y Eliminación de las Malas Hierbas*, cuando la densidad de la plantación, una vez logrado el arraigo y estabilización de la vegetación introducida sea superior a la considerada inicialmente como adecuada para cubrir los objetivos de estabilización y protección, es conveniente efectuar un aclareo con el fin de conseguir la densidad de plantación deseada. Normalmente, en las zonas donde la vegetación haya sido introducida mediante plantación no será necesario efectuar aclareos. Este tipo de prácticas suele emplearse en superficies sembradas a voleo donde no es fácil predecir la distribución espacial de las especies. La eliminación de las malas hierbas se puede efectuar de forma mecánica, arrancándolas directamente, o con química, mediante herbicidas. Los herbicidas deben aplicarse una o dos veces durante la estación de crecimiento en el primer año. En plantación de especies jóvenes puede ser necesario prolongar esta actuación a los dos o tres primeros años, si la vegetación competitiva es muy densa.
- *Siegas*, en las superficies hidrosembreadas o sembradas a voleo con especies de tipo césped, la vegetación se desarrolla rápidamente. Si no se efectúan algunas siegas periódicas, se pueden producir cúmulos de vegetación muerta, perjudiciales para el desarrollo futuro de la cubierta vegetal implantada.

# CAPÍTULO IV

## APLICACIONES DE LA BIOINGENIERÍA EN TALUDES

---

Como se ha visto la vegetación juega un importante papel en el control de procesos y como elemento de protección y conservación del suelo. Por tal motivo mediante la Bioingeniería se ha introducido el uso de especies vegetales en diversos campos ingenieriles, lográndose una alta efectividad en las funciones requeridas.

La Ingeniería Civil hace uso de la Bioingeniería introduciendo especies vegetales que brinden protección y refuerzo a las construcciones civiles. Sin bien es cierto que el uso es restringido por la importancia y el factor de riesgo de la construcción, el beneficio recibido es cuantioso y se puede apreciar en términos económicos, prácticos y estéticos.

Por tal motivo el uso de la Bioingeniería en la Ingeniería Civil esta presente en distintas obras en todo el Perú. Se han escogido campos distintos de acción como ejemplos de aplicación:

- Control de la erosión en taludes de carreteras y en taludes de relaves mineros, realizados por la minera Antamina en Cajamarca y por la minera Atacocha en Cerro de Pasco.
- Estabilización de taludes y revegetación en la Línea de Conducción del Gasoducto, zona de Las Malvinas, realizado por la empresa INMAC.
- Estabilización de taludes mediante reforestación y construcción de andenes en la localidad de Acopalca, ejecutado por la comunidad de Acopalca en trabajo conjunto con el Ministerio de Agricultura.
- Estabilización de taludes y reforestación en el sector denominado "Torre Torre" hasta el sector de Palián, en la ciudad de Huancayo con la finalidad es reforzar los taludes, detener y evitar la formación de cárcavas y proveerlos de un atractivo estético. Fue ejecutado por la comunidad de Palián en colaboración con la UNCP.

## **4.1. Aplicación de la Bioingeniería en la Minería.**

### **4.1.1. Generalidades**

Desde la etapa de construcción de la infraestructura de acceso y operación, la Compañía Minera Antamina ha venido desarrollando un importante trabajo de forestación para el control de erosión y sedimentos, según los estándares ambientales de las empresas dueñas. Tanto el movimiento de tierras para la construcción de vías de acceso y las instalaciones mineras, la recuperación de suelo orgánico y las actividades de operación en la zona del tajo abierto y botaderos de roca, son las principales fuentes de erosión que enfrenta la empresa desde sus inicios.

Debido a las altitudes en las que se desarrollan las actividades de la mina se vienen empleando especies tanto forrajeras como arbustivas y arbóreas que se adaptan a estas zonas de vida.

Los datos obtenidos figuran en el “Informe Sobre Trabajos de Forestación Realizados por la Empresa Antamina” (4).

### **4.1.2. Objetivos**

- Reducir las fuentes de erosión en las zonas afectadas por los trabajos de construcción de Antamina.
- Mejorar el paisaje de la zona y en el largo plazo contribuir con un ecosistema autosustentable

### **4.1.3. Área de Trabajo**

Carretera de acceso Conococha –Antamina: En zonas críticas como son el denominado By Pass de Chiquian en las progresivas ubicadas entre los km. 17+000 y 29+000, y, la zona aledaña a la laguna Canrash, ubicada entre las progresivas 93+000 y 97+000

### **4.1.4. Acciones Realizadas**

Los trabajos de forestación han sido complementados en muchos de los casos con trabajos de conservación de suelos, asimismo las técnicas que se han empleado han sido diversas, éstas han incluido transplante a terreno definitivo de plántones reproducidos en viveros de comunidades campesinas aledañas a Antamina, siembra directa en campo de semillas y plantación de estacas y esquejes, así como hidrosiembra de semillas de pastos mejorados y arbustos nativos.

Actividades desarrolladas en los taludes de corte y relleno:

- Construcción de muros enrocados para conservación de suelos
- Refuerzo en revegetación de áreas dañadas.
- Siembra de pastos, *Festuca arundinacea*, *Dactylis glomerata*, *Trifolium sp.* *Calamagrostis*.
- Plantación de especies nativas (*Stipa ichu*, *Calamagrostis*, *Lupinus*, *Sambucus spp* y *Polylepis spp*). Este transplante se realizó utilizando técnicas de propagación como son por siembra directa y por transplante.
- Hidrosiembra en taludes con especies forrajeras y arbustivas, tanto nativas y exóticas

Actividad	Resultado
Construcción de muros enrocados	11325 mts
Refuerzo en revegetación de áreas dañadas	77,803 m <sup>2</sup>
Hidrosiembra	140,000 m <sup>2</sup>
Siembra de pastos	26.4 has
Transplante de especies nativas	03 has
Personal empleado durante 03 años	184 comuneros

Tabla N° 4.01: Resultados logrados según informe (4).



Imagen N° 4.01: Crecimiento del Sauco – propagado mediante técnica de estaca



*Imagen N° 4.02: Siembra de especies forrajeras con trabajos de conformación de suelos y drenaje (Km 20 +000 carretera Conococha – Antamina)*



*Imagen N° 4.03: Hidrosiembra en Talud de Corte (Km 18 +800 carretera Conococha – Antamina)*



*Imagen N° 4.04: Trabajos de revegetación y plantación de Polylepis spp. con pasturas en talud de relleno*



*Imagen N° 4.05: Resultado de crecimiento de pasturas en el talud de relleno (Km 94 + 000 carretera Conococha – Antamina)*



*Imagen N° 4.06: Resultado de Hidrosiembra en el talud de corte (Km 18 + 500 carretera Conococha – Antamina)*



*Imagen N° 4.07: Prendimiento de Quinales (Polylepis racemosa) dentro del campamento de Yanacancha.*

Adicionalmente, se puede agregar la experiencia vista en la localidad de Chicrín, en Cerro de Pasco, en obras ejecutadas por la minera Atacocha. Se utilizó la especie *Eucalyptus Globulus* para la estabilización de taludes de relaves.



Imagen N° 4.08: Estabilización de taludes de relaves en Chicrín, Cerro de Pasco.



Imagen N° 4.09: Estabilización de taludes de relaves utilizando *Eucalyptus Globulus*.

## 4.2. Aplicación de la Bioingeniería en la Línea de Conducción del Gasoducto

### 4.2.1. Generalidades

La empresa INMAC S.A. fue contratada por empresa Pluspetrol, para los trabajos de control de erosión y revegetación en el lote 88 en el área de Las Malvinas, como parte de las obras en la Línea de Conducción del Gasoducto del Gas de Camisea.

Los trabajos realizados fueron para el control de la erosión y sedimentación a lo largo de las líneas de conducción, el área de las Malvinas y las locaciones de pozo San Martín 1 y San Martín 3 (lote 88 y área de influencia).

Los datos obtenidos figuran en el "Informe de Inspección sobre Efectividad de las Medidas de Control de Erosión y Sedimentación Lote 88 – Área Las Malvinas" (10)



Imagen Nº 4.10: Vista del Pozo San Martín 3 en el Sector de Las Malvinas (Lote 88).

### 4.2.2. Problemas Presentados

Las Malvinas, pertenece a una zona sub tropical de abundantes lluvias y terrenos colapsables. Motivo por lo cual, se presentan continuos casos de erosión y inestabilidad de taludes, que ponen en riesgo los trabajos realizados en el tendido de la Línea de Conducción del Gasoducto del Gas de Camisea.

#### 4.2.3. Acciones Realizadas

Presentamos algunos trabajos realizados por la empresa INMAC SA como aplicación de la Bioingeniería en el control de la erosión y estabilidad de taludes.



*Imagen N° 4.11: En la Progresiva Km3 +000, se realizaron trabajos de terracerías para el control de la erosión.*



*Imagen N° 4.12: Entre los sectores SM1 y SM3, se construyeron andenes y se plantaron gramíneas "paja pichi" como control de la erosión e inestabilidad del talud.*



*Imagen N° 4.13: En el pozo San Martín 1, se realizaron trabajos de aterrazamiento y posterior ejecución de trincheras de contención por curva de nivel, direccionando el escunimiento hacia canales protegidos, lo cual generó estabilidad a los taludes.*



*Imagen N° 4.14: En el pozo San Martín 3, se realizaron trabajos de terrecerías y sembrado de plantas, como parte de la estabilización de taludes y protección contra la erosión.*



*Imagen N° 4.15: En la progresiva Km. 0 + 900 del sector Las Malvinas – San Martín 01, se realizaron trabajos de reparación de cárcavas con sacos de yute y esquejes. Con la finalidad de proteger el terreno donde está el gasoducto y el dieselducto.*



*Imagen N° 4.16: En el pozo San Martín 3, se ejecutaron trabajos de estabilización de taludes, mediante la construcción de terrecerías, con la finalidad de evitar la erosión y estabilizar el talud. Posteriormente se plantaron especies para aportar a la estabilidad del talud.*

### 4.3. Experiencia de Bioingeniería: Acopalca

#### 4.3.1. Generalidades:

Acopalca es una comunidad andina que se encuentra en la cuenca del río Shullcas a 17 Km. de la ciudad de Huancayo, a una altitud promedio de 4500 m.s.n.m. Cuenta con una población de 688 personas y se tiene acceso por vía terrestre. Se desarrolla activamente la agricultura, la ganadería y el turismo de montaña.



*Imagen N° 4.17: Vista General de Acopalca*

#### 4.3.2. Presentación del Problema

Acopalca se ubica entre laderas de cerros y es cruzado por el río Shullcas, de donde se obtiene agua para el riego de los campos de cultivo y para el consumo humano.

Las aguas del río Shullcas son usadas para regar terrenos de cultivo en la cuenca del río Shullcas, estas aguas son reguladas y administradas por la ATDRM (Administración Técnica del Distrito de Riego Mantaro, creado mediante decreto Ley N° 7335 del 28 de septiembre de 1931), según el requerimiento de los regantes asociados. También las aguas provenientes del río Shullcas son usadas para el abastecimiento de agua potable de Huancayo metropolitano, estas son

captadas en la planta de tratamiento de Vilcacoto y administradas por la empresa SEDAN Huancayo SAC.

Los deslizamientos ocasionan distintos daños en el medio, tales como la pérdida de suelo agrícola, daños e interrupciones en vías, daños en viviendas, daños al ecosistema del lugar, enturbiamiento y obturación del flujo del río, etc.

Luego es necesario proteger la estabilidad del talud para evitar los problemas que acarrearán estos daños y tratar de extender estas prácticas no solo a zonas urbanas o zonas agrícolas, sino también a zonas silvestres con la finalidad de proteger la ecología del lugar.

En una zona próxima al pueblo, 25 minutos de caminata aguas arriba del río Shullcas, se encuentra una zona en la cual se presentan taludes con problemas de erosión y deslizamientos. Los problemas de erosión son originados por cursos de agua que se forman durante las lluvias, mientras que los problemas de estabilidad se forman debido a la saturación del suelo que se da durante las lluvias, lo cual disminuye la resistencia efectiva del terreno.



*Imagen N° 4.18: Vista Frontal de un deslizamiento ocurrido en Acopalca.*

El efecto de las aguas de lluvia ha ocasionado la disminución del esfuerzo de corte del terreno, provocándose deslizamientos; algunos de éstos son nuevos y otros antiguos (fallas cíclicas).

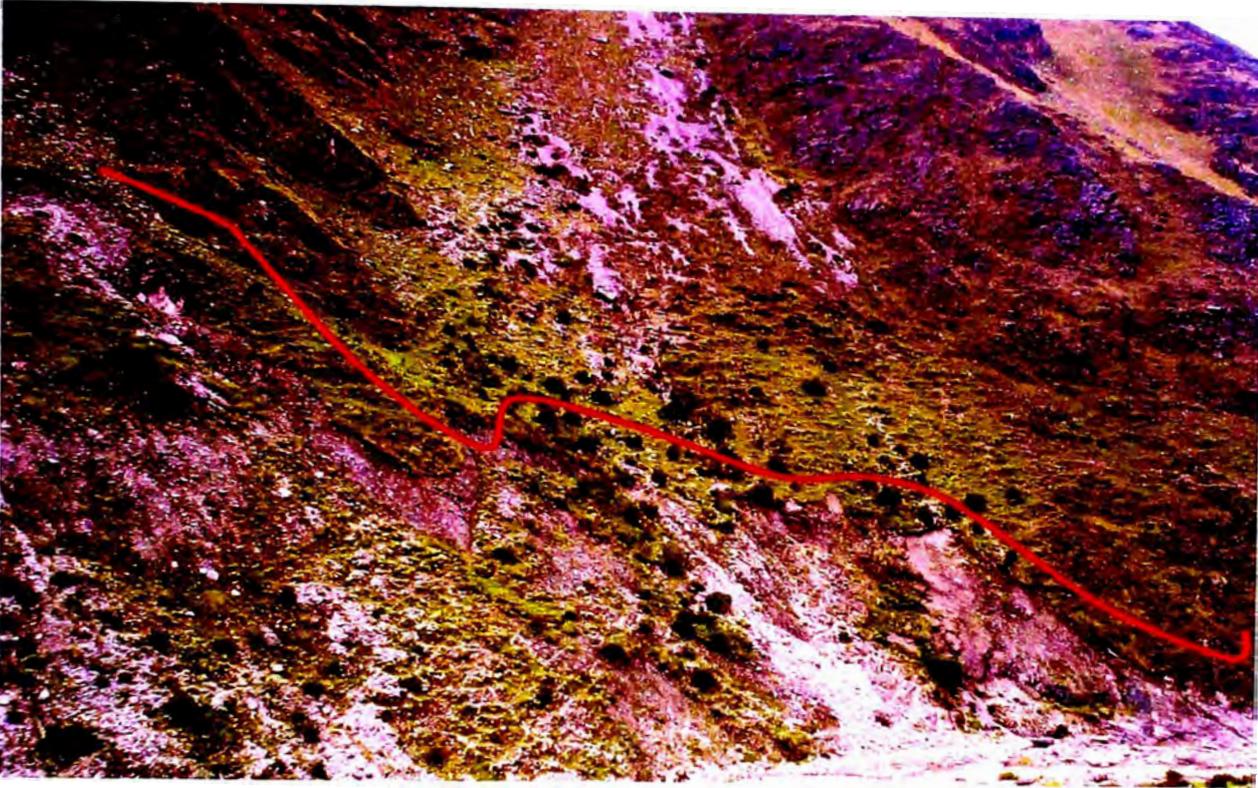


Imagen N° 4.19: Deslizamientos antiguos ocurridos en la zona.

#### 4.3.3. Acciones Realizadas

En zonas aledañas a la comunidad de Acopalca, mediante programas del gobierno, se ha aplicado en forma experimental un control de estabilización de taludes mediante el sembrado de especies forestales y la suavización de taludes mediante la construcción de andenes.

La especie forestal utilizada es el *Pinus Radiata* (pino), que fue integrada al sistema ecológico del lugar, y el *Stipa Ichu* (ichu), que es una especie nativa, con resultados significativos. El ichu es una gramínea que crece en altura, que por la forma que posee absorbe muy bien el impacto de la lluvia y protege la superficie del suelo de la erosión de cursos de agua.

El crecimiento del ichu ha hecho que se formen “mini andenes” en el talud. Esto permite disminuir en cierta manera la pendiente del talud y dificulta el paso de cursos de agua pluvial, disminuyendo la tasa de erosión y pérdida de finos. Como se pudo observar se ha controlado la

formación de surcos y cárcavas y el deslizamiento del terreno, debido al papel que cumple la vegetación como regulador de la humedad, protección contra la erosión pluvial y el refuerzo que significa para el suelo las raíces de las plantas.



*Imagen N° 4.20: Reforestación de taludes mediante esquejes con el Pinus Radiata*



*Imagen N° 4.21: El Pinus Radiata controla la humedad del suelo y refuerza el terreno*



*Imagen N° 4.22: Vista lateral del Talud tratado mediante la reforestación.*



*Imagen N° 4.23: Vista Inferior Talud tratado, se puede observar que la base del talud fue tratado mediante el sembrado de *Spartium Junceum* (Retama) por su capacidad de retención de Suelos .*

La construcción de los andenes fue realizado experimentalmente por el Ministerio de Agricultura frente a la comunidad de Acopalca como un plan para el control de la erosión y la tecnificación de riego en la zona. Esta construcción fue realizada mediante un trabajo conjunto entre el Ministerio de Agricultura y la comunidad de Acopalca.

Mediante esta técnica se ha podido disminuir la tasa de pérdida de finos del suelo que son arrastrados por las corrientes formadas en las lluvias y por las aguas de riego, siendo retenidas y controladas adecuadamente. Con esto se busca mantener la productividad del suelo y establecer zonas adecuadas de sembríos en las cuales se puede realizar un apropiado riego. Esta técnica no es actual, ya que los incas los utilizaron ampliamente, sin embargo con el paso del tiempo se perdió el uso y por tanto los beneficios que estos traen. Existen zonas, donde los andenes no fueron mantenidos o fueron destruidos por los propios pobladores por ignorancia, ya que los andenes presentan dificultad a ser arados de la manera tradicional. En estas zonas se puede apreciar los efectos de erosión ocasionada por la lluvia, como el lavado de finos y formación de surcos.



Imagen N° 4.24: Estabilización de taludes mediante la construcción de andenes.

#### 4.4. Experiencia de Bioingeniería: “Torre Torre“

##### 4.4.1. Generalidades

Torre Torre se localiza al este de la ciudad de Huancayo, a unos 5 Km de distancia del Centro Cívico. Por su curiosa conformación geológica es un atractivo turístico de la localidad. La erosión y continuos deslizamientos han ido modelando la zona a manera de un conjunto de torres, derivándose de esta manera el nombre.

Este conjunto geológico se formó a partir de surcos, que por la erosión pluvial llegaron a convertirse en cárcavas. A través del tiempo, las cárcavas fueron creciendo hasta convertirse en quebradas.

Sin embargo la heterogeneidad del terreno, hizo que la erosión no sea uniforme, por lo que se formaron “torres” o sectores más resistentes a la erosión.



*Imagen N° 4.25: Formación Geológica “Torre Torre” – Huancayo.*

El tipo característico del terreno se extiende a lo largo de la falda del cerro, hasta el sector denominado Palián, al norte del lugar, donde en distintos puntos se presentan cárcavas en formación.

#### 4.4.2. Presentación del Problema

Las lluvias en la región central son muy intensas en los meses de noviembre a marzo. Durante una precipitación intensa se forman cursos de agua que van erosionando el terreno, haciéndolo inestable. De esta manera se producen surcos y cárcavas, que sin una adecuada protección va creciendo tanto en profundidad como en anchura.

Dado que el terreno es muy similar en todo el sector, la probabilidad de formación de nuevas cárcavas y deslizamientos es muy alta. Las cárcavas y deslizamientos hacen que el terreno sea sumamente accidentado, se pierdan zonas de cultivo, que los caminos se vean afectados por los deslizamientos y que las casas cercanas a los taludes corran el riesgo de deslizarse o que sean sepultadas por el material caído. Algunos taludes del lugar pueden alcanzar fuertes pendientes, debido a su contenido arcilloso en algunos casos y en otros a la sub presión existente. Sin embargo estas son condiciones que pueden revertirse, ocasionando la falla del talud, si es que no existe una adecuada protección.



*Imagen N° 4.26: Sector cercano a "Torre Torre", se puede apreciar que el paso de las aguas pluviales han formado surcos en el terreno, que hacen que el talud sea inestable, poniendo en riesgo a las construcciones en la cima del talud.*

#### 4.4.3. Acciones Realizadas

El problema expuesto fue tratado con anterioridad por la misma comunidad, que viendo sus terrenos afectados optaron por la siembra de árboles como el eucalipto, que fija la terreno y tiene un elevado requerimiento de agua; estas características permite elevar la resistencia efectiva al corte del terreno y por tanto ser mucho más estable. Los árboles de eucalipto son también usados por la comunidad como un recurso maderero, sin embargo, gracias a programas de reforestación la extracción de eucalipto no ha afectado la población total de árboles y su efecto positivo para el control de la erosión y estabilidad de taludes.

La erosión superficial del terreno por las aguas pluviales es controlada por gramíneas propias de la zona, la cual absorbe las aguas pluviales, controla los efectos de la escorrentía superficial y protege al terreno de la erosión de las gotas de lluvia.

A iniciativa de la Universidad Nacional del Centro, mediante la facultad de Ingeniería Forestal se han llevado a cabo programas de reforestación y trabajos de conformación lenta de terrazas que buscan el tratamiento de taludes contra la erosión y desestabilización mediante la Bioingeniería.



Imagen N° 4.27: Reforestación de Taludes mediante *Pinus Radiata* (Pino) en Torre Torre.



*Imagen N° 4.28: Tratamiento de Taludes con Eucaliptus Globulus (se aprecia el sembrado de nuevos árboles en cambio de otros talados).*



*Imagen N° 4.29: Tratamiento de Taludes con Reforestación, se aprecian especies como el Eucaliptus Globulus y el Pinus Radiata, la superficie esta protegida por gramíneas. Mediante esta conformación se logra un talud estable.*



*Imagen N° 4.30: Los árboles han sido sembrados hasta la base de los taludes, como medida de protección contra el deslizamiento, erosión y como recurso maderable.*



*Imagen N° 4.31: Sector de Palián se tienen zonas importantes de reforestación, con la finalidad de controlar cárcavas, tener un recurso maderable y mejorar el impacto visual del lugar.*

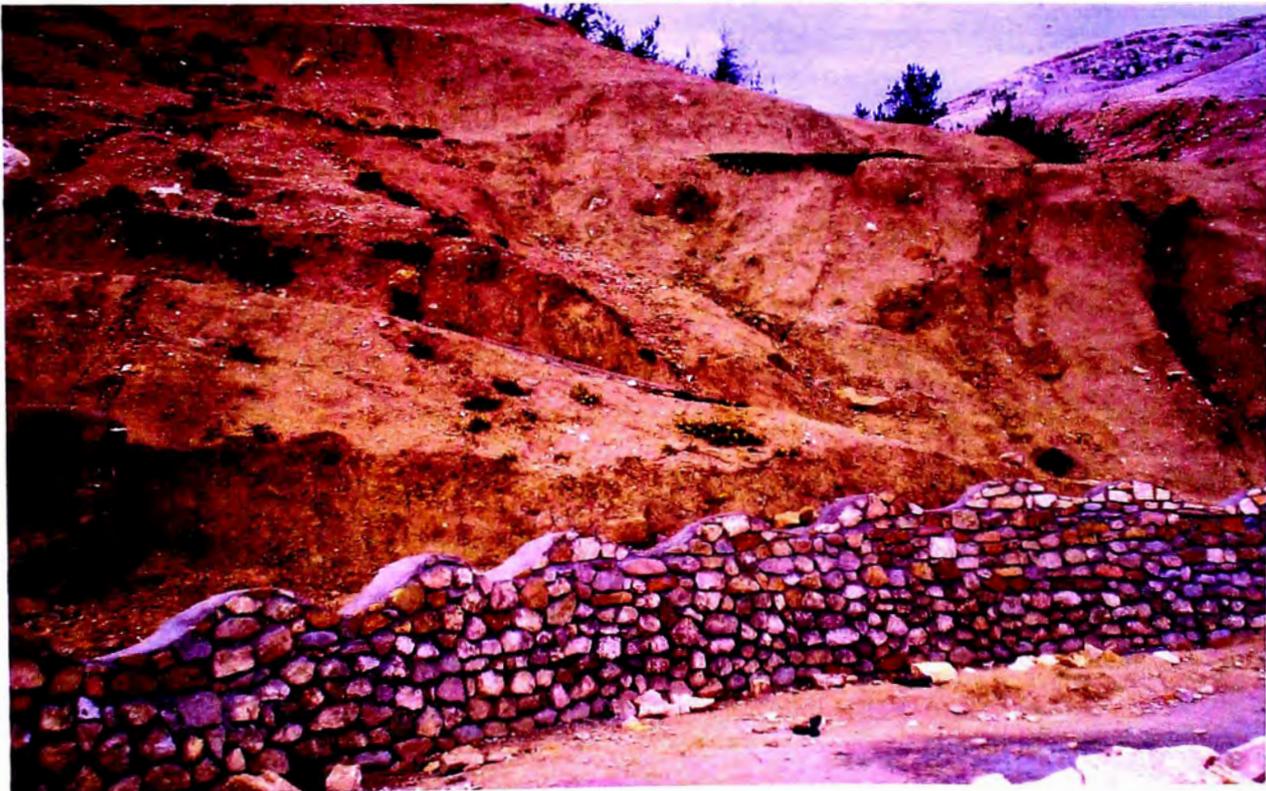
# **CAPÍTULO V**

## EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD: LOCALIDAD CARHUASCAYÁN – LA OROYA

### 5.1 Generalidades sobre el Proyecto

La Municipalidad Provincial de Yauli y el comité de Gestión “Carhuascayán” a través del programa “A Trabajar Urbano”, plantearon el proyecto “Escalinatas, Muros de Contención y Forestación en Acceso a La Oroya” con el objetivo de fomentar el empleo, desarrollar atractivos turísticos y estabilizar taludes como medida de protección a la Carretera Central.

El proyecto fue realizado por el Arquitecto Héctor Avilez Peña en el año 2005 para el programa “A Trabajar Urbano” de manera conjunta con la Municipalidad Provincial de Yauli.



*Imagen N° 05.01: Vista lateral del Proyecto*

Sin embargo, durante la ejecución del proyecto se presentaron problemas de erosión, deslizamientos e inestabilidad de taludes que afectaron algunas estructuras planteadas y la paralización de la obra.

La información complementaria sobre las condiciones geotécnicas del lugar fueron obtenidos del “Estudio de Suelos con Fines de Cimentación – Edificación Sede Universitaria - UPLA”, realizado por la Municipalidad Provincial de Yauli (7).

## 5.2 Problemática Presentada

La zona del proyecto presenta cuadros de erosión y deslizamientos en distintas zonas, lo cual hace inestable al talud y a las construcciones realizadas, tales como escaleras, barandas, pisos y muros que conforman la propuesta arquitectónica del proyecto “Escalinata, Muros de Contención y forestación en Acceso a La Oroya”.

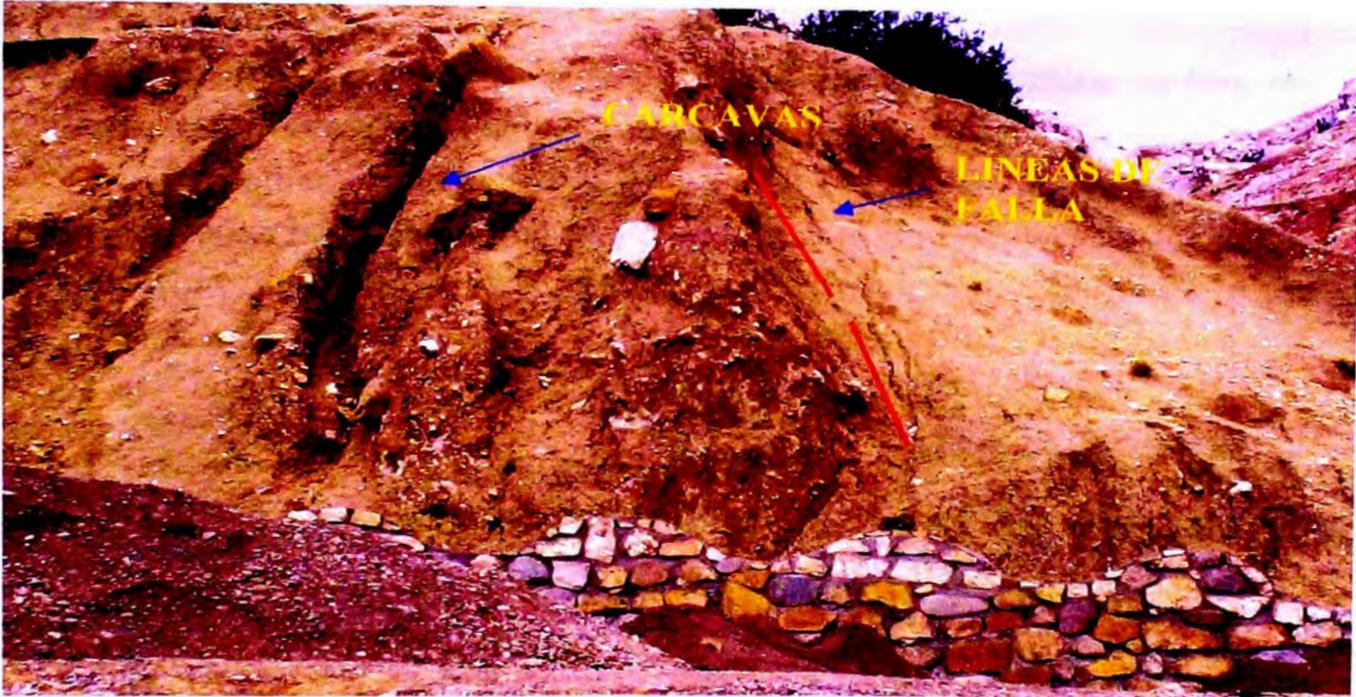


Imagen N° 05.02: Se muestra uno de los taludes del proyecto y los problemas existentes.

En la Imagen N° 05.02 se puede observar el deterioro del talud ubicado en el segundo nivel del proyecto, hay una fuerte presencia de cárcavas en su superficie y en algunos sectores se ven claramente líneas de falla. Esto pone en grave riesgo el proyecto y que en una eventual falla podría afectar el tránsito en la carretera central y la vida de las personas que circulen por el mirador.

Según el Análisis Granulométrico por Tamizado ASTM-D422, el material está clasificado como SW – SM (arena bien graduada – arena limosa), siendo este un material susceptible a ser erosionado.

Por su naturaleza, el ángulo de estabilidad para el talud debe ser menor al ángulo de fricción interna del material que lo conforma. Sin embargo en ciertos sectores se pueden encontrar taludes de gran pendiente, lo cual

sugiere que la estabilidad la consiguen por el efecto de succión del nivel freático en el terreno.

En caso de un eventual sismo, un incremento de sobrecarga en el talud o una variación de la humedad, las condiciones podrían tornarse desfavorables, produciendo inestabilidad en el talud hasta llegar a la falla del mismo como un deslizamiento. Según se pudo observar, en la visita al lugar, las construcciones realizadas durante la ejecución del proyecto han provocado una variación en la estabilidad de los taludes, provocando pequeños deslizamientos y dibujando en distintos sectores líneas de falla, tal como se muestra en la imagen N° 05.02.

Los elementos desestabilizadores son el peso de los muros, el paso de las personas (obreros y visitantes) y los cortes realizados; los cuales alteran el nivel freático, haciendo inestable al talud y provocando deslizamientos en distintas zonas.



*Imagen N° 05.03: Deslizamiento ocurrido en el talud lateral del proyecto.*

### 5.3 Objetivos de la Evaluación

Ante las evidencias de deslizamientos producidos en el proyecto “Escalinatas, Muros de Contención y Forestación en Acceso a la Oroya”, se hace necesario plantear una evaluación del proyecto que verifique la estabilidad global y local en el talud, así como también la estabilidad de los diseños de los elementos de contención realizados con la finalidad de encontrar las deficiencias del proyecto.

La evaluación planteada seguirá la siguiente secuencia:

- Marco de referencia del proyecto, lo cual implica un breve resumen de las características geopolíticas, socioeconómicas, topográficas, climáticas y geológicas de la zona del proyecto.
- Análisis de suelos, el cual fue realizado para la elaboración del Proyecto y contempla la exploración de campo, perfil estratigráfico, análisis granulométrico y ensayo de corte directo.
- Estudio de topografía, el cual indica las principales características topográficas del talud.
- Análisis de la estabilidad global del talud, con la finalidad de descartar la posibilidad de una falla del mismo.
- Análisis de la estabilidad de los muros de contención en concreto según la altura requerida en el proyecto.
- Análisis de la estabilidad local del talud mediante un análisis a la estabilidad contra deslizamientos por translación.
- Evaluación de los análisis y propuesta de solución, determinando el motivo de la inestabilidad y el método recomendado para estabilizar el talud.

En el contexto de la tesis, la solución propuesta buscará:

- El empleo de especies vegetales para el control de la erosión, refuerzo en la estabilidad del talud y con la finalidad que se tenga un impacto visual agradable.
- Por las difíciles condiciones climáticas y el estrés ambiental existente es necesario plantear especies que se puedan adaptar al medio y sistemas de soporte biodegradables que ayuden a su establecimiento (utilización de biomantas).

## 5.4 Marco de Referencia del Proyecto

### Características Geopolíticas

La Oroya se encuentra ubicada a 3750 m.s.n.m. en la cuenca alta del río Mantaro, Provincia de Yauli, Departamento de Junín, Sierra Central al oeste de la cordillera occidental del Perú. Tiene un superficie total de 388.42 Km<sup>2</sup> y se encuentra distante a 176 Km. al este de la capital del país, así como a 125 Km. de la capital del departamento (Huancayo).



*Imagen N° 05.04: Vista Superior del Proyecto: se puede ver la carretera central y su relación con el proyecto.*

La Provincia de Yauli fue creada por Ley N° 459 de 10 de Diciembre de 1916 y se creó los siguientes distritos: Yauli, Marcapomacocha, Chacapalca, La Oroya. Está misma Ley señaló como capital de la provincia al pueblo del mismo nombre. Por Ley N° 5216 de 15 de Octubre de 1925, se señaló la capital provincial a la villa de La Oroya; la Ley No. 9606 de 18 de Septiembre de 1942 elevó esta villa a la categoría de ciudad.

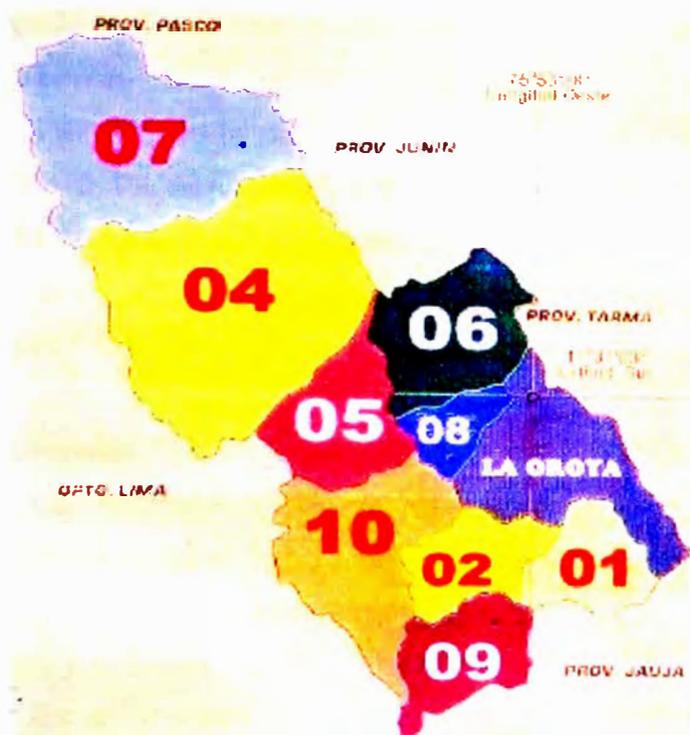


Fig. N° 5.01: Distribución Política de Yauli

01. Chacapalpa
02. Huayhuay
03. La Oroya
04. Marcapomacocha
05. Morococha
06. Paccha
07. Sta Bárbara Carhuacayán
08. Sta Rosa de Sacco
09. Suitucancha
10. Yauli

**Ubicación:**

Latitud Sur 11° 31'03"

Longitud Oeste 75°53'58"

**Límites**

Norte: Santa Rosa de Sacco

Sur: CC Huari

Este: C.C. Paccha

Oeste: Río Mantaro

## Características Socioeconómicas

### Población

- El 98.2% de la población vive en zona urbana y un 1.2% en área rural.
- El 40.1% tiene menos de 21 años y un 59.9% es mayor a 21 años.
- El 48.7 es de sexo masculino y 51.3% femenino
- Densidad demográfica: La superficie del distrito es de 388.42 Km<sup>2</sup>, y una población de 33,043 habitantes, esto es 85 habitantes por Km<sup>2</sup>.

### Economía

La Oroya constituye el punto de convergencia de las 3 vías de comunicación del centro del país, una hacia la costa a Lima, otra hacia el sur a Huancayo (Huancavelica Ayacucho, Cuzco) y la tercera ruta hacia Tarma, Pasco y el Valle de Chanchamayo, Junín Tingo María hasta Pucallpa.

Es el soporte económico de la región, debido a que aloja al Complejo Metalúrgico de La Oroya cuya administración actual está a cargo de la empresa norteamericana Doe Run Perú. (Anteriormente La Cerro de Pasco Cooper Corporation, luego Centromin Perú). Su ubicación la convierte también en el punto de comunicación terrestre entre la Costa Sierra y Selva.

### Población Económicamente Activa (PEA)

Grupos de Edad	PEA	no PEA	Total
De 6 a 14 años	84	3936	4020
De 15 a 29 años	1525	3433	4958
De 30 a 44 años	2953	1376	4329
De 45 a 64 años	1901	588	2489
De 65 a más años	419	147	566
Total	6882	9480	16362

Tabla N° 5.01: Tabla Población Económicamente Activa PEA

### Características Topográficas

La topografía de La Oroya es abrupta y variada, con pendientes que oscilan entre 1 y 10% en las zonas bajas y 2% y 6% en las zonas altas. Se caracteriza por la ubicación de la cuenca alta del río Mantaro que corre de Norte a Sur por la vertiente oriental del territorio y la presencia de subcuencas que confluyen a él: Carhuacayán, Corpacancha, Huayhuay y

Yauli y 5 microcuencas como las del río Andaychagua que originan la cuenca alta del río Mantaro. La ciudad de La Oroya se encuentra ubicada en una quebrada del río Mantaro que corre de norte a sur.

### **Características Climáticas**

El clima es frígido boreal y seco en las partes bajas o región Suni con una temperatura promedio de 8 °C. En la región Jalca el clima es frígido de tundra, a veces gélido con temperaturas que descienden debajo de los 0 °C, con precipitaciones pluviales de 700 mm al año en forma variada. Siendo los meses de diciembre, enero, febrero y marzo los de mayor precipitación pluvial.

La temperatura varía de acuerdo a la ubicación geográfica, siendo la más alta registrada a la fecha de 22.2 °C en febrero de 1998 (Estación Oroya, 3750 m.s.n.m.) y la más baja -8.1°C en Agosto de 1997 (Estación Atocsaico 4150 m.s.n.m.).

### **Características Geológicas**

La ciudad de La Oroya se encuentra asentada sobre una terraza formada por un material aluvial constituido por arenas, gravas y bolonería, que cubren a la roca madre de origen sedimentario marino. El espesor del suelo coluvial varía desde 1.00 m a 2.00 m. tal como se puede apreciar en la margen derecha del río Mantaro. El río Mantaro divide a La Oroya en dos poblaciones, a la margen derecha La Oroya Nueva y a la margen izquierda La Oroya Antigua; el área de estudio se ubica en la segunda población, en el barrio de Carhuascayán.

El área de estudio se ubica en la margen izquierda del río Mantaro y está rodeada por afloramientos de la roca sedimentaria de origen marino, sobre un depósito de material transportado por acción de este río y por la escorrentía de las precipitaciones pluviales, que discurren por los innumerables drenes naturales de los taludes. En la margen derecha se encuentra una terraza constituido por un material conglomerado, mostrando de esta forma la historia geológica de la actividad hídrica del río Mantaro y la contribución de los drenes naturales provenientes del Oeste y del Este.



*Imagen N° 05.05: Se aprecia el río Mantaro y la Carretera Central, así como también la formación geológica del lugar.*

La zona de La Oroya es de clima gélido, con lluvias intensas en los meses de noviembre a abril y temperatura promedio de 8°C, esto restringe mucho las especies vegetales adaptables al sitio. También, dado la presencia de la Fundición, hay una alta tasa de contaminación con plomo en el lugar, esto da como característica principal un ambiente negativo extremo para el crecimiento y establecimiento de las plantas.

## **5.5 Análisis de Suelos**

El Estudio de Suelos fue realizado por el especialista de Mecánica de Suelos y Pavimentos Oscar Ortiz Jahn y los ensayos fueron realizado en el laboratorio de mecánica de suelos de la “Universidad Peruana Los Andes”. A continuación presentamos los puntos más importantes del estudio de suelos:

### **Exploración de Campo – Calicatas**

Se realizaron 03 calicatas con el objeto de investigar las características de las capas del suelo. La profundidad alcanzada del pozo exploratorio fue de 1.50 m con respecto a la superficie del terreno en cada calicata

## **Perfil Estratigráfico**

### **Calicata N° 01**

- ✓ Se excavó hasta una profundidad de 1.50 m.
- ✓ Se tiene un material de arenas limosas, con mezclas de arena y limos, en estado semi compacto, con humedad óptima.

### **Calicata N° 02**

- ✓ Se excavó hasta una profundidad de 1.50 m.
- ✓ Se tiene un material de arenas limosas, con mezclas de arena y limo, en estado compacto, con humedad óptima de color marrón.

### **Calicata N° 03**

- ✓ Se excavó hasta una profundidad de 1.50 m.
- ✓ Se tiene un material de arenas limosas, con mezclas de arena y limo, en estado compacto, con humedad óptima de color marrón.

## **Análisis Granulométrico por Tamizado ASTM – D422.**

Para describir los diferentes materiales que aparecen en las exploraciones es necesario contar con una clasificación convencional de los tipos de suelos. El sistema más usado para la clasificación de suelos es el Sistema Británico para Clasificación de Suelos (SUCS), ya que esta orientado para construcciones (9).

El proceso de análisis consiste en realizar una calicata en el lugar de estudio y obtener una muestra a una profundidad mayor al estrato de suelo disturbado. Luego se realiza un análisis de tamaños de partículas del suelo, el cual se lleva a cabo determinando los porcentajes en peso, que caen entre ciertos límites.

En el caso de un suelo de granos gruesos del que se han separado las partículas finas o no las contiene, el proceso usual es un análisis por tamizado. La muestra representativa se subdivide sistemáticamente hasta obtener una sub muestra del tamaño adecuado y después se seca en horno.

Esta muestra se hace pasar a través de tamices estándar apilados en orden descendente (mayor a menor abertura). Después de agitar el primer tamiz y los siguientes, en secuencia, se determina el peso retenido en cada uno de ellos y se calcula el porcentaje del peso acumulado en la sub muestra. A partir de estas cifras se grafica la distribución de tamaños de partícula en una curva semilogarítmica que se denomina curva de granulometría.

Cuando la muestra del suelo contiene partículas de granos finos, primero se procede a efectuar un tamizado en húmedo para eliminarlos y determinar el porcentaje de la fracción combinada de arcilla / limo. Primero se seca una sub muestra de tamaño adecuado y después se tamiza para separar las partículas más gruesas.

A continuación, la sub muestra se sumerge en agua que contiene un agente dispersante y se deja reposar; en seguida se lava en un tamiz de 63  $\mu\text{m}$ . La fracción retenida se vuelve a secar en la estufa y se hace pasar a través de una serie de tamices.

Después de pasar las fracciones retenidas en cada tamiz y calcular los porcentajes acumulados en cada uno, se traza la curva granulométrica. La fracción retenida arcilla / limo se determina a partir de la diferencia de peso y se expresa como porcentaje del total de la sub muestra.

El análisis de suelos se realizó a partir de una muestra única. Se practicaron análisis granulométricos, análisis de plasticidad y clasificación de suelos.

## ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM – D422

UNIVERSIDAD PERUANA LOS ANDES

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

“Escalinata, Muros de Contención y forestación en Acceso a la Oroya”

Malla	Peso Retenido	% Retenido Peso	% Retenido Acumulado	% que Pasa
3"				
2 ½"				
2"				
1 ½"				100
1"	156	7.8	7.8	92.2
¾"	108	5.4	13.2	86.8
½"	74	3.7	16.9	83.1
3/8"	87	4.3	21.2	78.8
N°4	119	6.0	27.2	72.8
N° 8	106	5.3	32.5	67.5
N° 10	21	1.0	33.5	66.5
N° 16	63	3.1	36.6	63.4
N° 20	37	1.8	38.4	61.6
N° 30	49	2.5	40.9	59.1
N° 40	52	2.6	43.5	56.5
N° 50	100	5.0	48.5	51.5
N° 80	174	8.7	57.2	42.8
N° 100	33	1.7	58.9	41.1
N° 200	101	5.1	64.0	36.0
< 200	720	36.0	100.0	
TOTAL	1280			
PESO INC	2000			

Tabla N° 5.02: Análisis Granulométrico por Tamizado ASTM – D422

### Descripción de la Muestra

<b>SUCS:</b>	SM (arena limosa mal gradada)
<b>Humedad Natural:</b>	8.2%
<b>Peso Específico:</b>	2.50
<b>Peso Húmedo Suelto:</b>	1638 Kg/m <sup>3</sup>
<b>Límite Líquido (%):</b>	17.0
ASTM D4318	
<b>Límite Plástico (%):</b>	NP
ASTM D4318	
<b>Índice de Plasticidad (%):</b>	NP

### Propiedad y características Físicas

<b>Permeabilidad:</b>	Baja
<b>Capilaridad:</b>	Mediana
<b>Elasticidad:</b>	Nula.

### Ensayo de Corte Directo

El Ensayo de Corte directo o también conocido como Prueba de la Caja de Corte Directo, mide directamente los esfuerzos normal y de corte en el plano de falla. Primero se corta un prisma rectangular de una muestra de suelo (o remoldeada, según se requiera) que se introduce con precisión en una caja metálica dividida en dos mitades horizontales. en el aparato de tipo estándar la caja es de 60 x 60 mm, pero para los suelos de granos gruesos y quizás arcillas agrietadas se usa una versión más grande (14).

Manteniendo unidas las dos mitades de la caja, el espécimen del suelo se coloca en forma de emparedado entre dos placas metálicas acanaladas y dos piedras porosas. Sobre la parte superior de la caja se coloca una almohadilla de presión y la caja misma se coloca en un aparato externa (que también sirve de baño de agua), que corre horizontalmente en rodamientos de rodillos. Después se aplica una carga vertical sobre el suelo, usando un suspensor estático de pesas. Después de extraer los tornillos que mantienen unidas las dos mitades de la caja, el suelo se somete a la acción del corte mediante una fuerza horizontal aplicada con un gato de tornillo a una velocidad de deformación constante. La

magnitud de la fuerza cortante se mide mediante un anillo de carga o un transductor de carga.

Este mismo procedimiento se repite en otros cuatro o cinco especímenes tomados de la misma muestra del suelo. Se calculan y se grafican los valores del esfuerzo normal y del esfuerzo cortante en el plano horizontal de falla. Las envolventes de resistencia al cortante que corresponden a los esfuerzos máximo y último se ajustan en forma de líneas de mejor correlación que pasan por los puntos  $\tau/\sigma_n$  que se graficaron.

### ENSAYO DE CORTE DIRECO ASTM D3080

#### UNIVERSIDAD PERUANA LOS ANDES

#### LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

#### “Escalinata, Muros de Contención y forestación en Acceso a la Oroya”

<b>Sondaje:</b>	C1
<b>Muestra:</b>	M1
<b>Peso Unitario:</b>	1638 Kg/m <sup>3</sup>
<b>Profundidad:</b>	Disturbado
<b>Peso Específico:</b>	2.50 Tn/m <sup>3</sup>
<b>Velocidad:</b>	0.5 mm/min
<b>Clasificación SUCS:</b>	SM arena limosa, mezcla mal gradada

Característica	Espécimen 1	Espécimen 2	Espécimen 3
Altura	18.00 mm	18.00 mm	18.00 mm
Lado	63.50 mm	63.50 mm	63.50 mm
Densidad Seca	1.81 gr/cm <sup>3</sup>	1.89 gr/cm <sup>3</sup>	1.81 gr/cm <sup>3</sup>
Humedad	8.20%	8.20%	8.20%
Esfuerzo Normal	0.63 Kg/cm <sup>2</sup>	1.26 Kg/cm <sup>2</sup>	2.53 Kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo de Corte	0.20 Kg/cm <sup>2</sup>	0.53 Kg/cm <sup>2</sup>	0.92 Kg/cm <sup>2</sup>

Tabla N° 5.03: Ensayo de Corte Directo ASTM D3080

#### Resultados:

**Cohesión:** 0.005Kg/cm<sup>2</sup>.

**Ángulo de Fricción:** 20°

## 5.6 Estudio de Topografía.

Para la elaboración del proyecto “Escalinata, Muros de Contención y forestación en Acceso a la Oroya”, se realizó un levantamiento topográfico, en base a esto se proyectaron obras de contención y mejoramiento del ornato. El proyecto se encuentra en el sector denominado Carhuascayán en la ciudad de La Oroya y es dividido en dos sectores por la Carretera Central, a una altitud de 3719 m.s.n.m.

**Zona 1:** El primer sector se extiende desde las orillas del río Mantaro a una altitud de 3697 m.s.n.m hasta la Carretera Central a una altitud de 3724 m.s.n.m. Linealmente abarca un máximo de 33.60 metros en promedio, dando con esto una pendiente promedio del 80.36% o  $38^{\circ}47'4''$  de inclinación.

**Zona 2:** El segundo sector se extiende desde la Carretera Central hasta llegar a una altitud de 3765 m.s.n.m. Linealmente, abarca una longitud máxima de 43.50 metros en promedio, es decir una pendiente de 94.26% o  $43^{\circ}18'19''$ .

Sin embargo ambas zonas no son lineales y en su trayecto se describen zonas de mayor y menor pendiente a la pendiente promedio hallada. La zona central, entre la Zona 1 y Zona 2, tiene una longitud de 25.4 metros de longitud y en él se ubica la carretera central.

La sección principal está descrita según el corte 54-54, en el plano de Cortes Transversales, en Anexos. También están descritos los cortes transversales de cada sector de la construcción.

En los planos de arquitectura se ha proyectado la construcción de terraplenes en cada sector, donde han de ubicarse miradores con sus respectivos elementos accesorios (áreas verdes, empedrados, bancas, área verde, etc).

Sin embargo, en el proyecto, los taludes conformados no tienen una pendiente homogénea. Esto implica hacer un análisis de estabilidad para cada zona en cada sector.

Los planos topográficos, de vista en planta del proyecto y secciones se adjuntan en Anexos.

## 5.7 Análisis de Falla Global

Para el análisis global del talud usamos el programa PCSTABL.EXE que analiza taludes mediante el método de Bishop (falla circular). Analizamos la estabilidad global del talud considerando una sola zona global que comprenda la Zona1 y Zona 2, según el corte 54 – 54 del plano Secciones Transversales .

### Características del Talud

Idealizamos la zona, según las siguientes características:

- Angulo máximo de fricción: 20°
- Cohesión del terreno: 0.005 Kg/cm<sup>2</sup>.
- Densidad del terreno: 1638 Kg/m<sup>3</sup>.
- Clasificación SUCS: SM arena limosa
- Sección asumida: Corte 54 – 54

### Ingreso de Datos

Ingresamos al programa puntos (x,y) en el plano cartesiano, que describen la forma de la superficie del talud.

Puntos	Eje X	Eje Y
1	0.00	20.00
2	20.00	20.00
3	21.26	24.00
4	25.81	25.00
5	54.07	47.06
6	79.00	48.00
7	82.01	52.11
8	92.69	62.00
9	101.69	69.00
10	113.00	72.11
11	122.44	78.00
12	130.00	79.00

Tabla N° 5.04: Coordenadas de puntos que describen la superficie del Talud

Idealizamos el talud como si estuviera conformado por un suelo homogéneo e isotrópico. Dado que carecemos de datos no consideramos el nivel freático ni sus efectos en el terreno, tampoco consideramos efectos de sismo.

Se calcularon las líneas de falla mediante el método de Bishop, según los parámetros requeridos por el programa, obteniéndose las 10 líneas de falla más críticas o de menor valor de seguridad.

Línea de Falla	Eje X	Eje Y	Radio	Factor de Seguridad
1	37.4	109.6	92.4	<b>1.196</b>
2	39.0	108.3	90.4	1.198
3	39.2	110.6	93.8	1.200
4	39.5	107.7	89.9	1.202
5	38.9	105.6	88.8	1.210
6	41.9	104.7	87.5	1.233
7	45.1	96.8	82.5	1.310
8	45.8	95.1	81.2	1.327
9	52.0	88.6	75.8	1.438
10	53.2	82.6	70.9	1.512

Tabla N° 5.05: Coordenadas del Centro, Radio y Factor de Seguridad de las líneas de falla circulares hallados con el PCSTABL .EXE

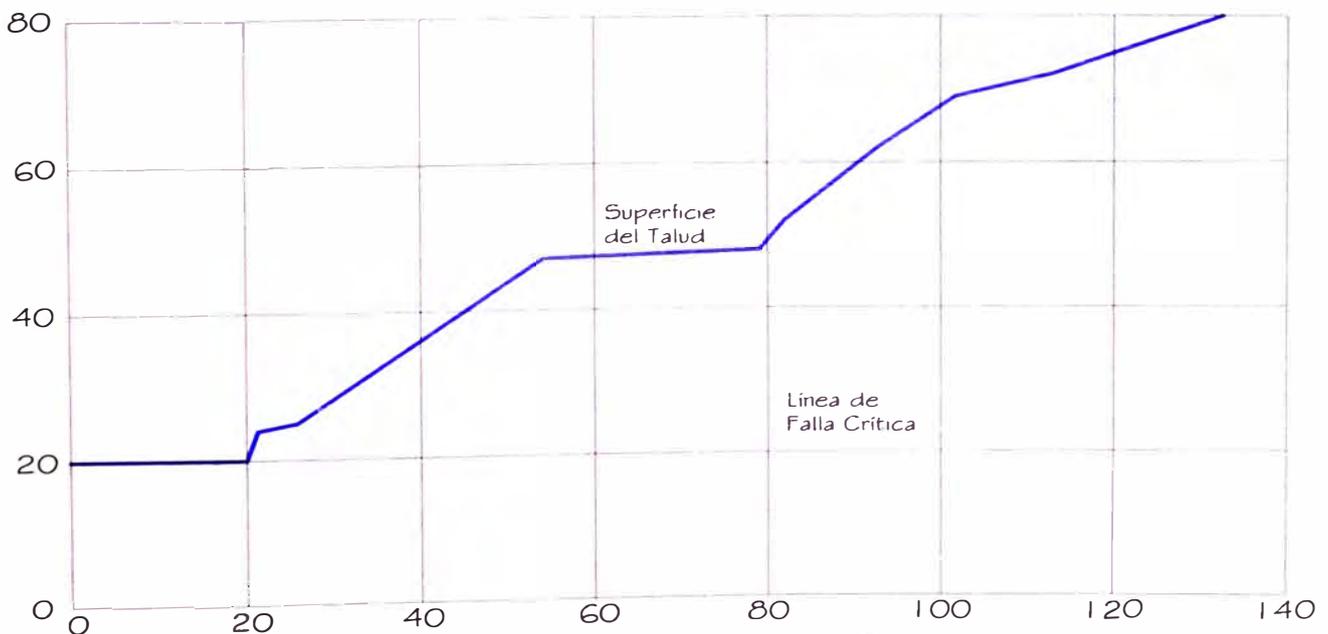


Fig. N° 5.02: Perfil del Talud y línea de falla crítica representado en el diagrama cartesiano.

## 5.8 Análisis de Estabilidad de Elementos de Contención

### Muros de Contención de Concreto

Dada la naturaleza del proyecto y las condiciones del terreno, existe una alta probabilidad de fallas circulares en algunos sectores del proyecto, por lo cual se están proyectando muros de contención en concreto. Se plantean muros de concreto en voladizo, por las condiciones arquitectónicas existentes, tales como insuficiente espacio y fines decorativos.

Para el análisis del muro de contención en concreto se empleará una hoja de cálculo "MUROS.XLS", la cual es realizada considerando condiciones de estabilidad para prevenir la falla por volteo, deslizamiento y falla por capacidad portante.

Para el diseño de la hoja de cálculo se ha empleado la teoría de Coulomb presentada por Roy Whitlow (14), la cual sugiere que el empuje que se ejerce sobre el muro se debe a una cuña de suelo que descansa contra la pared posterior de este.

Debido a las condiciones del terreno de aplicación se consideró una condición drenada y un material granular, teniendo que el coeficiente de presión activa de tierra  $K_a$  es el siguiente:

$$K_a = \left\{ \frac{\text{sen}(\theta - \phi') / \text{sen}(\theta)}{(\text{sen}(\theta + \delta))^{1/2} + \left\{ \frac{\text{sen}(\phi' + \delta) \cdot \text{sen}(\phi' - \beta)^{1/2}}{\text{sen}(\theta - \beta)} \right\}} \right\}^2$$

Donde :

$\phi'$  : Ángulo de fricción del suelo.

$\theta$  : Ángulo de la pendiente posterior del muro

$\delta$ : Ángulo de fricción del muro, entre el suelo y el muro.

$\beta$ : Ángulo de la pendiente superficial.

Se han modelado muros de contención para alturas de 2.0 m, 2.5 m, 3.0 m y 3.5 m que son las dimensiones requeridas por el proyecto.

**DISEÑO DE MURO DE CONTENCIÓN – H1 = 2.0 m**

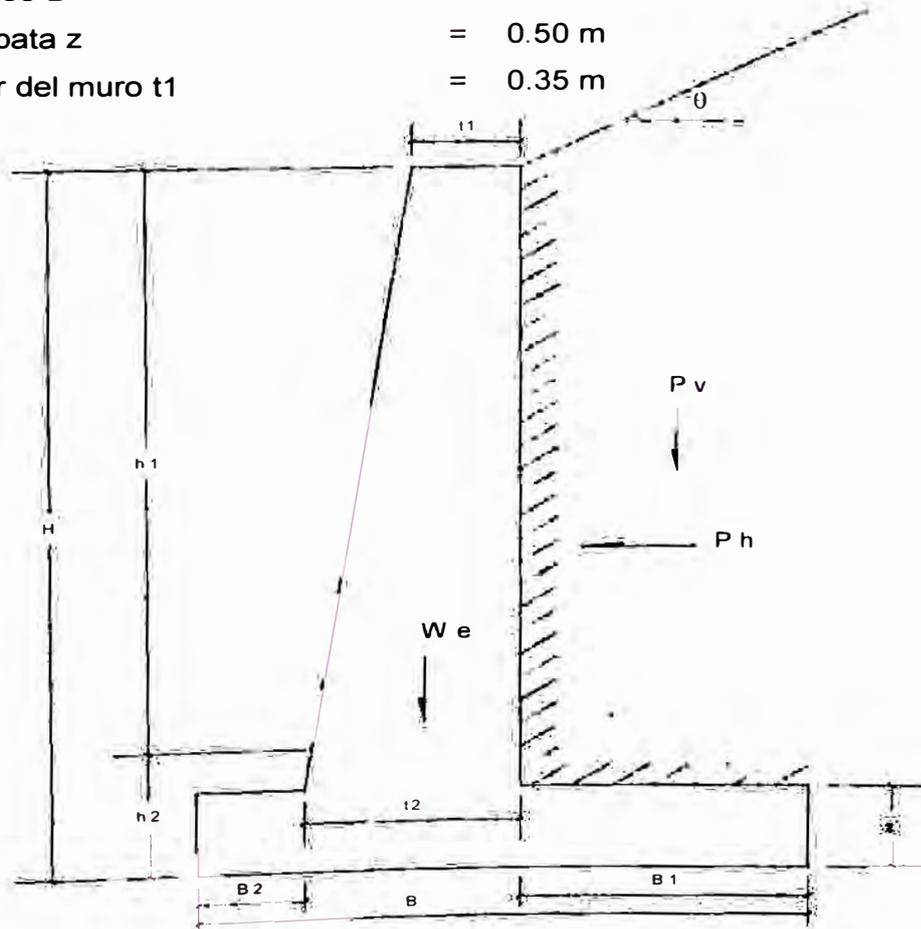
Basado en la Teoría de Coulomb – Roy Whitlow, "Mecánica de Suelos" (14)

**Condiciones de Aplicación**

Angulo de Fricción del Terreno $\phi$	=	20°
Densidad del Terreno $\rho$	=	1.638 Tn/m <sup>3</sup>
Capacidad Portante del Terreno $\sigma$	=	20 Tn/m <sup>2</sup>
Sobrecarga del Terreno s/c	=	0.1 Tn/m <sup>2</sup>
Angulo de la Pendiente Superficial $\beta$	=	18°
Angulo de la Pendiente Posterior $\theta$	=	90°
Angulo de Fricción muro/suelo $\lambda$	=	20°
Coefficiente de Presión Activa $K_a$	=	0.7

**Características del Muro**

Altura Libre H1	=	2.0 m
Profundidad de Cimentación H2	=	1.2 m
Altura Total del muro H	=	3.2 m
Volado interno de la Cimentación B1	=	1.0 m
Volado externo de la Cimentación B2	=	0.5 m
Ancho inferior del muro t2	=	0.75 m
Ancho de la Base B	=	2.25 m
Altura de la Zapata z	=	0.50 m
Ancho Superior del muro t1	=	0.35 m



## ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

### Cálculo de las Fuerzas Actuantes del Terreno

Empuje del Terreno	=	5.873 Tn
Empuje de la Sobrecarga	=	0.070 Tn
Empuje Total	=	5.943 Tn
Momento Actuante	=	6.339 Tn . m

### Cálculo de las Fuerzas Resistentes

Característica	Área	Densidad	Peso	Brazo	Momento
Muro (rect.)	0,95	2,40	2,27	1,08	2,44
Muro (triang)	0,54	2,40	1,30	0,77	0,99
Base	1,13	2,40	2,70	1,13	3,04
Tierra (rect)	2,70	1,64	4,42	1,75	7,74
Tierra (triang)	0,16	1,64	0,27	1,92	0,51

Fuerza Resistente	=	10.950 Tn
Momento Resistente por metro lineal	=	14.72 Tn . m

### Análisis de Estabilidad contra el Deslizamiento

Condición (F.S.D. = 1.5)	=	1.840	Cumple
--------------------------	---	-------	--------

### Análisis de Estabilidad contra el Volteo

Condición (F.S.V. = 1.75)	=	2.320	Cumple
---------------------------	---	-------	--------

### Análisis de Estabilidad para Capacidad Portante

Cálculo del Valor de q1	=	9.54 Tn/m <sup>2</sup>	Es Estable
-------------------------	---	------------------------	------------

Cálculo del Valor de q2	=	0.20 Tn/m <sup>2</sup>	Cumple
-------------------------	---	------------------------	--------

## DISEÑO DE MURO DE CONTENCIÓN – H1 = 2.5 m

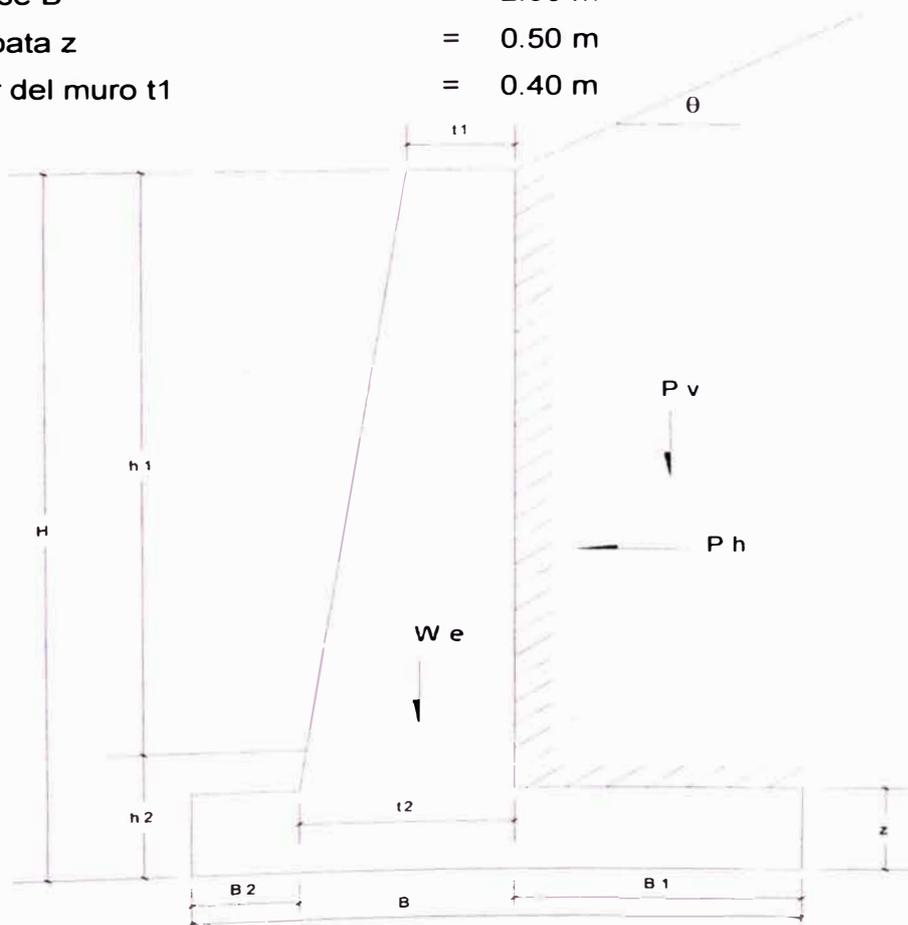
Basado en la Teoría de Coulomb – Roy Whitlow, "Mecánica de Suelos" (14)

### Condiciones de Aplicación

Angulo de Fricción del Terreno $\phi$	=	20°
Densidad del Terreno $\rho$	=	1.638 Tn/m <sup>3</sup>
Capacidad Portante del Terreno $\sigma$	=	20 Tn/m <sup>2</sup>
Sobrecarga del Terreno s/c	=	0.1 Tn/m <sup>2</sup>
Angulo de la Pendiente Superficial $\beta$	=	18°
Angulo de la Pendiente Posterior $\theta$	=	90°
Angulo de Fricción muro/suelo $\lambda$	=	20°
Coefficiente de Presión Activa $K_a$	=	0.7

### Características del Muro

Altura Libre H1	=	2.5 m
Profundidad de Cimentación H2	=	1.2 m
Altura Total del muro H	=	3.7 m
Volado interno de la Cimentación B1	=	1.1 m
Volado externo de la Cimentación B2	=	0.6 m
Ancho inferior del muro t2	=	0.90 m
Ancho de la Base B	=	2.60 m
Altura de la Zapata z	=	0.50 m
Ancho Superior del muro t1	=	0.40 m



**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD****Cálculo de las Fuerzas Actuales del Terreno**

Empuje del Terreno = 7.851 Tn

Empuje de la Sobrecarga = 0.070 Tn

Empuje Total = 7.921 Tn

Momento Actuante = 9.769 Tn . m

**Cálculo de las Fuerzas Resistentes**

Característica	Área	Densidad	Peso	Brazo	Momento
Muro (rect.)	1,28	2,40	3,07	1,30	3,99
Muro (triang)	0,80	2,40	1,92	0,93	1,79
Base	1,30	2,40	3,12	1,30	4,06
Tierra (rect)	3,52	1,64	5,77	2,05	11,82
Tierra (triang)	0,20	1,64	0,32	2,23	0,72

Fuerza Resistente = 14.20 Tn

Momento Resistente por metro lineal = 22.38 Tn . m

**Análisis de Estabilidad contra el Deslizamiento**

Condición (F.S.D. = 1.5) = 1.790 Cumple

**Análisis de Estabilidad contra el Volteo**

Condición (F.S.V. = 1.75) = 2.290 Cumple

**Análisis de Estabilidad para Capacidad Portante**

Cálculo del Valor de q1 = 10.65 Tn/m<sup>2</sup> Es Estable

Cálculo del Valor de q2 = 0.27 Tn/m<sup>2</sup> Cumple

## DISEÑO DE MURO DE CONTENCIÓN – H1 = 3.0 m

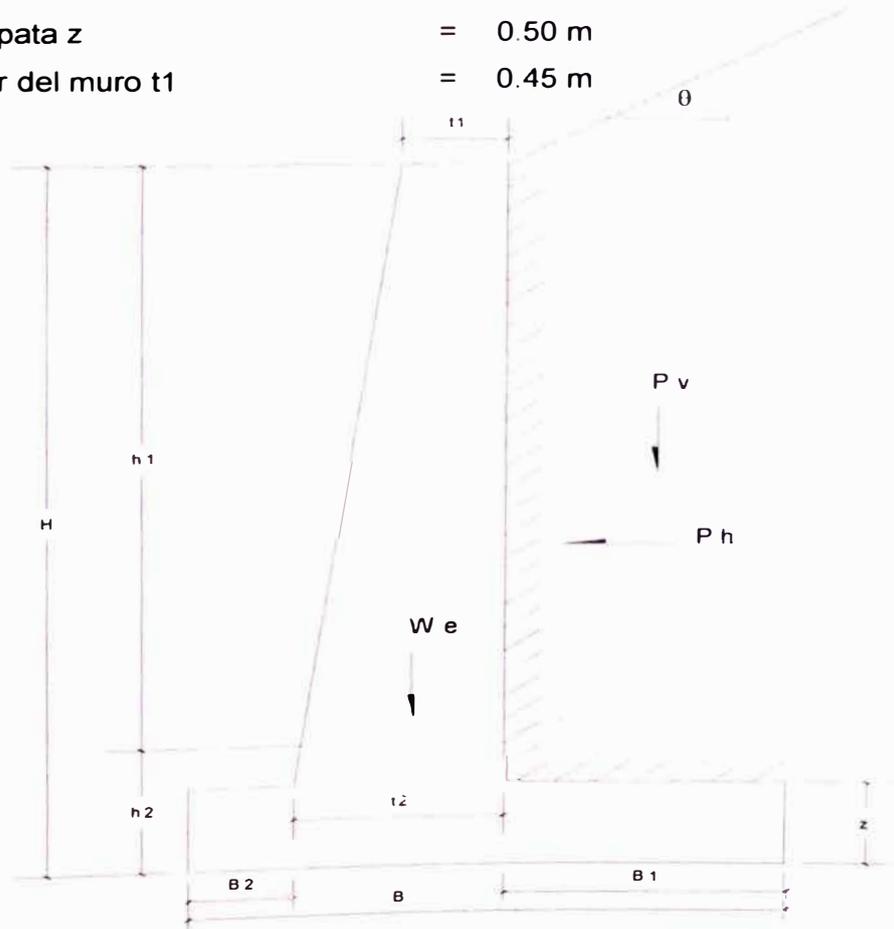
Basado en la Teoría de Coulomb – Roy Whitlow, "Mecánica de Suelos" (14)

### Condiciones de Aplicación

Angulo de Fricción del Terreno $\phi$	= 20°
Densidad del Terreno $\rho$	= 1.638 Tn/m <sup>3</sup>
Capacidad Portante del Terreno $\sigma$	= 20 Tn/m <sup>2</sup>
Sobrecarga del Terreno s/c	= 0.1 Tn/m <sup>2</sup>
Angulo de la Pendiente Superficial $\beta$	= 18°
Angulo de la Pendiente Posterior $\theta$	= 90°
Angulo de Fricción muro/suelo $\lambda$	= 20°
Coefficiente de Presión Activa $K_a$	= 0.7

### Características del Muro

Altura Libre H1	= 3.0 m
Profundidad de Cimentación H2	= 1.2 m
Altura Total del muro H	= 4.2 m
Volado interno de la Cimentación B1	= 1.2 m
Volado externo de la Cimentación B2	= 0.8 m
Ancho inferior del muro t2	= 1.00 m
Ancho de la Base B	= 3.00 m
Altura de la Zapata z	= 0.50 m
Ancho Superior del muro t1	= 0.45 m



**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD****Cálculo de las Fuerzas Actuantes del Terreno**

Empuje del Terreno	=	10.116 Tn
Empuje de la Sobrecarga	=	0.070 Tn
Empuje Total	=	10.186 Tn
Momento Actuante	=	14.261 Tn . m

**Cálculo de las Fuerzas Resistentes**

Característica	Área	Densidad	Peso	Brazo	Momento
Muro (rect.)	1,67	2,40	4,00	1,58	6,29
Muro (triang)	1,02	2,40	2,44	1,17	2,85
Base	1,50	2,40	3,60	1,50	5,40
Tierra (rect)	4,44	1,64	7,27	2,40	17,45
Tierra (triang)	0,23	1,64	0,38	2,60	1,00

Fuerza Resistente	=	17.690 Tn
Momento Resistente por metro lineal	=	32.990 Tn . m

**Análisis de Estabilidad contra el Deslizamiento**

Condición (F.S.D. = 1.5)	=	1.740	Cumple
--------------------------	---	-------	--------

**Análisis de Estabilidad contra el Volteo**

Condición (F.S.V. = 1.75)	=	2.310	Cumple
---------------------------	---	-------	--------

**Análisis de Estabilidad para Capacidad Portante**

Cálculo del Valor de q1	=	11.10 Tn/m <sup>2</sup>	Es Estable
-------------------------	---	-------------------------	------------

Cálculo del Valor de q2	=	0.69 Tn/m <sup>2</sup>	Cumple
-------------------------	---	------------------------	--------

## DISEÑO DE MURO DE CONTENCIÓN – H1 = 3.5 m

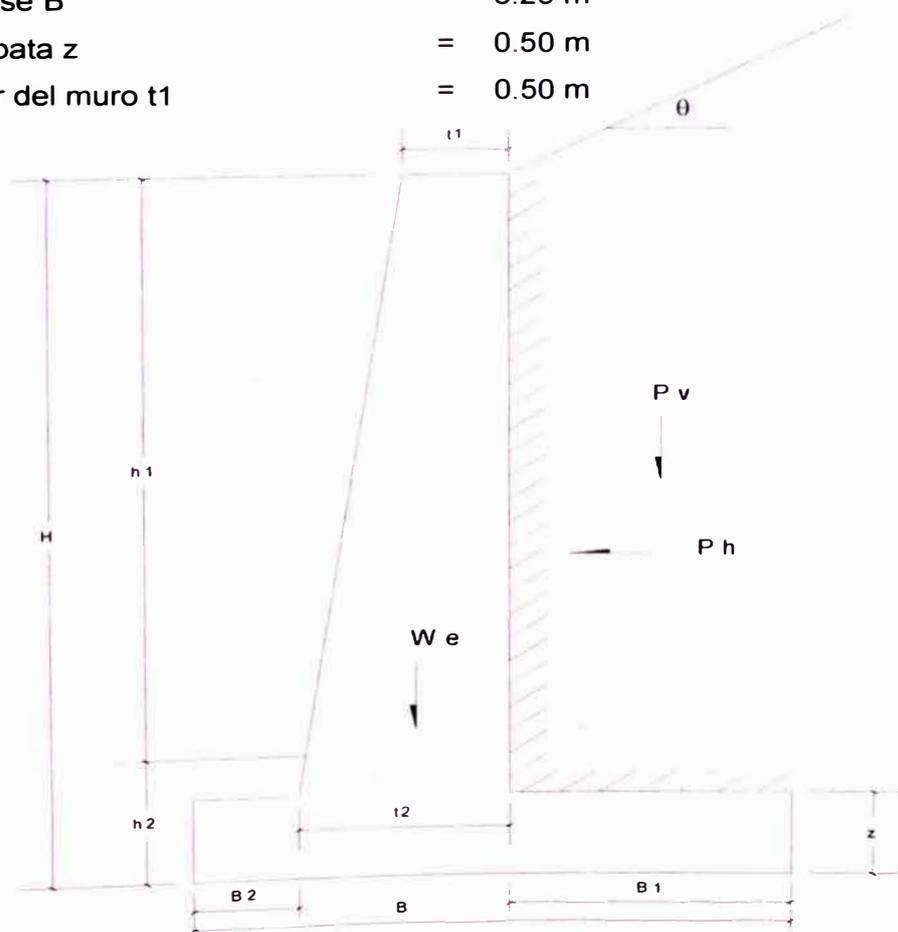
Basado en la Teoría de Coulomb – Roy Whitlow, "Mecánica de Suelos" (14)

### Condiciones de Aplicación

Angulo de Fricción del Terreno $\phi$	=	20°
Densidad del Terreno $\rho$	=	1.638 Tn/m <sup>3</sup>
Capacidad Portante del Terreno $\sigma$	=	20 Tn/m <sup>2</sup>
Sobrecarga del Terreno s/c	=	0.1 Tn/m <sup>2</sup>
Angulo de la Pendiente Superficial $\beta$	=	18°
Angulo de la Pendiente Posterior $\theta$	=	90°
Angulo de Fricción muro/suelo $\lambda$	=	20°
Coefficiente de Presión Activa $K_a$	=	0.7

### Características del Muro

Altura Libre H1	=	3.5 m
Profundidad de Cimentación H2	=	1.2 m
Altura Total del muro H	=	4.7 m
Volado interno de la Cimentación B1	=	1.3 m
Volado externo de la Cimentación B2	=	0.85 m
Ancho inferior del muro t2	=	1.10 m
Ancho de la Base B	=	3.25 m
Altura de la Zapata z	=	0.50 m
Ancho Superior del muro t1	=	0.50 m



## ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

### Cálculo de las Fuerzas Actuantes del Terreno

Empuje del Terreno	=	12.668 Tn
Empuje de la Sobrecarga	=	0.070 Tn
Empuje Total	=	12.738 Tn
Momento Actuante	=	19.957 Tn . m

### Cálculo de las Fuerzas Resistentes

Característica	Área	Densidad	Peso	Brazo	Momento
Muro (rect.)	2,10	2,40	5,04	1,70	8,57
Muro (triang)	1,26	2,40	3,02	1,25	3,78
Base	1,63	2,40	3,90	1,63	6,34
Tierra (rect)	5,46	1,64	8,94	2,60	23,25
Tierra (triang)	0,27	1,64	0,45	2,82	1,27

Fuerza Resistente	=	21.360 Tn
Momento Resistente por metro lineal	=	43.210 Tn . m

### Análisis de Estabilidad contra el Deslizamiento

Condición (F.S.D. = 1.5)	=	1.680	Cumple
--------------------------	---	-------	--------

### Análisis de Estabilidad contra el Volteo

Condición (F.S.V. = 1.75)	=	2.160	Cumple
---------------------------	---	-------	--------

### Análisis de Estabilidad para Capacidad Portante

Cálculo del Valor de q1	=	13.08 Tn/m <sup>2</sup>	Es Estable
-------------------------	---	-------------------------	------------

Cálculo del Valor de q2	=	0.060 Tn/m <sup>2</sup>	Cumple
-------------------------	---	-------------------------	--------

## **Análisis de Deslizamiento Translacional**

Estabilizados los taludes ante fallas circulares mediante muros de contención, existe la posibilidad de un movimiento translacional plano a poca profundidad paralelo a una pendiente larga.

El término deslizamiento en pendiente infinita se usa normalmente para describir un movimiento translacional plano a poca profundidad paralelo a una pendiente larga. Con frecuencia una capa subyacente de mayor dureza es la que constriñe la superficie de falla a un plano, como es el caso nuestro donde la capa rocosa limita al estrato de suelo. En general se hace caso omiso de los efectos de curvatura en los extremos superior e inferior de la pendiente, así como en los laterales; con ello se tiene un resultado conservador para pendientes lateralmente rectas o cóncavas, pero se puede sobreestimar la estabilidad a lo largo de curvas y esquinas convexas. Frecuentemente la falla se promueve por un aumento repentino en la presión de poro, en especial de suelos parcialmente desecados en los cuales la capa superficial se une y se mueve como una laja delgada y plana. Esta situación se justifica debido a que en algunos sectores el terreno tiene poco espesor y descansa sobre una superficie rocosa inclinada y al variar las condiciones existentes, podría ocurrir un deslizamiento.

El análisis de la estabilidad ante fallas por deslizamiento de translación se analiza mediante la hoja de cálculo "DESLIZA TRANSLACION.XLS".

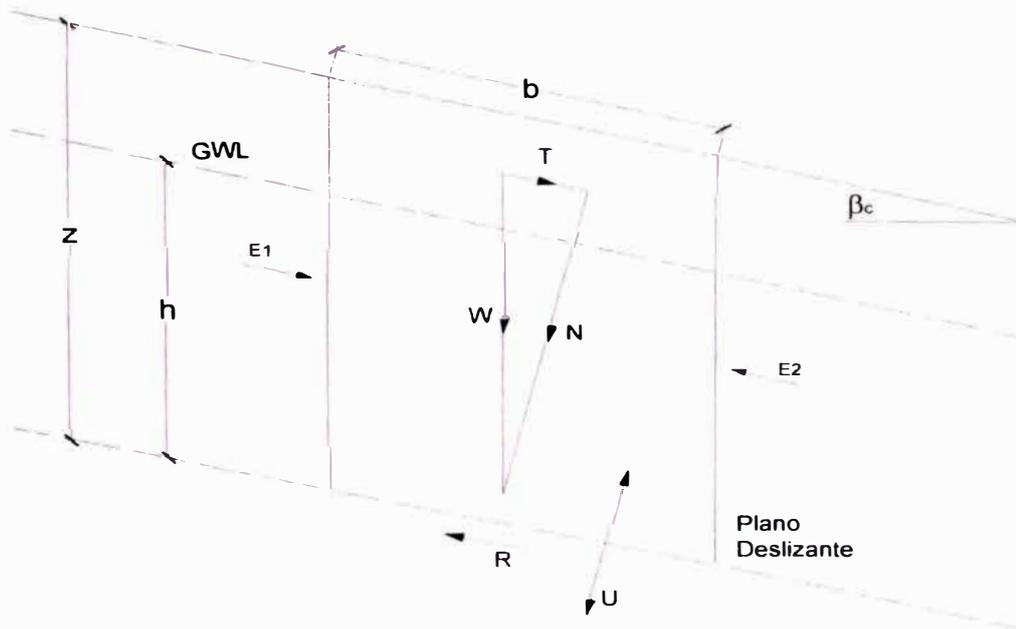
"DESLIZA TRANSLACION.XLS" fue preparado para analizar la estabilidad por deslizamiento de translación para los casos en pendientes sin drenaje y pendientes drenadas; para este segundo caso incluye opciones de talud tales como que si el material es arena seca, el nivel freático coincide con el plano deslizante, el nivel freático esta situado bajo el plano deslizante (efecto de succión). la pendiente saturada con infiltración es paralela a la superficie, la pendiente saturada tiene una infiltración vertical y para los casos donde la cohesión es mayor a cero. Las operaciones matemáticas y lógicas son realizadas según el subprograma "Translación" que es activado como un "macros" de la hoja.

## ANÁLISIS DE DESLIZAMIENTO DE TRANSLACIÓN

Roy Whitlow, "Mecánica de Suelos" (14)

### Características del Terreno

Condición	2	=	Pendiente Drenada y parámetros efectivos
Características del Talud	6	=	Suelos Cementados o sobreconsolidados, la cohesión es mayor a cero
Densidad Natural		=	1638 Kg/m <sup>3</sup>
Densidad del Agua		=	1000 Kg/m <sup>3</sup>
Cohesión del Terreno c'		=	50 Kg/m <sup>2</sup>
Angulo de Fricción del Suelo $\phi'$		=	20°
Angulo de la Pendiente Superficial $\beta$		=	28°
Profundidad del nivel freático		=	2 m
Profundidad de Falla		=	1.20 m



Factor de Seguridad con Drenaje = 1.02 (F.S.=1.2) Es inestable

**Nota:**

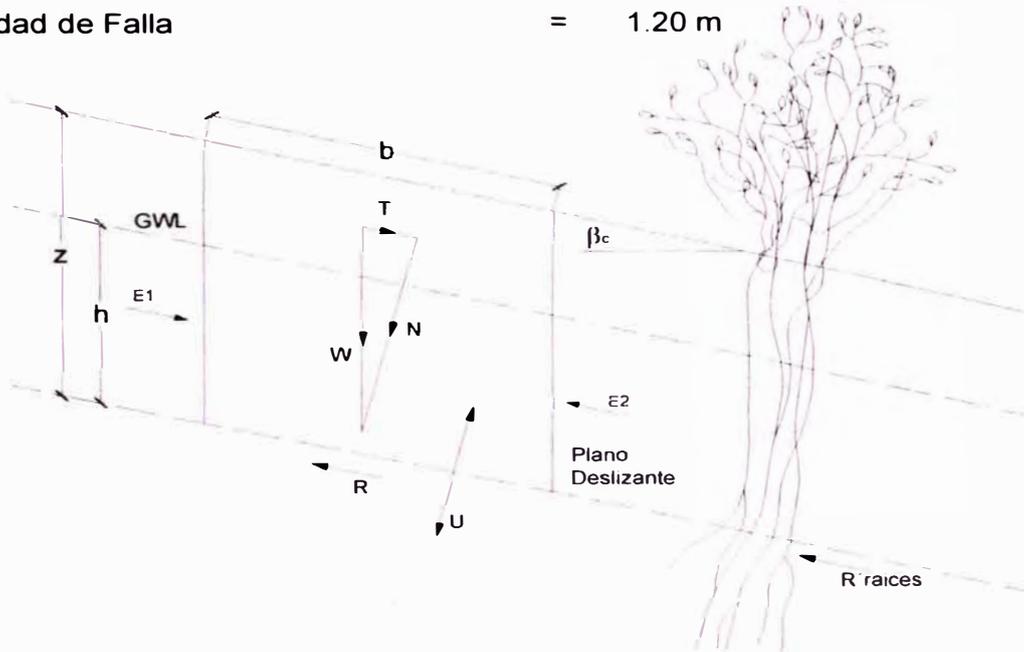
1. Se asume que el suelo es homogéneo y la pendiente infinita.
2. La condición del terreno varía según se cambien la numeración de la celda D5. Los números permitidos son 1 y 2.
3. Las características del talud varían según se cambie la numeración de la celda D8. Los números permitidos van del 1 al 6.
4. Los resultados se obtienen al ejecutar el subprograma "Translacion".

## ANÁLISIS DE DESLIZAMIENTO DE TRANSLACIÓN CON REFUERZO

Roy Whitlow, "Mecánica de Suelos" (14)

### Características del Terreno

Condición	2	=	Pendiente Drenada y parámetros efectivos
Características del Talud	6	=	Suelos Cementados o sobreconsolidados, la cohesión es mayor a cero
Densidad Natural		=	1638    Kg/m <sup>3</sup>
Densidad del Agua		=	1000    Kg/m <sup>3</sup>
Cohesión del Terreno c'		=	50      Kg/m <sup>2</sup>
Angulo de Fricción del Suelo $\phi'$		=	20°
Angulo de la Pendiente Superficial $\beta$		=	28°
Profundidad del nivel freático		=	2 m
Refuerzo aportado por raíces R		=	2000 Kg/m <sup>2</sup> (Valor Promedio)
Profundidad de Falla		=	1.20 m



Factor de Seguridad con Drenaje	=	3.48    (F.S.=1.2) Es Estable
Razón del Incremento del F.S. (F.S. Con Vegetación / F.S. Sin Vegetación)	=	3.40

1. Se asume que el suelo es homogéneo y la pendiente infinita.
2. Se asume que el refuerzo aportado promedio por las raíces de arbustos y árboles tiene un comportamiento similar a la cohesión y se incrementa al esfuerzo resistente del talud.
3. La condición del terreno varía según se cambien la numeración de la celda D5. Los números permitidos son 1 y 2.
4. Las características del talud varían según se cambie la numeración de la celda D8. Los números permitidos van del 1 al 6.
5. Los resultados se obtienen al ejecutar el subprograma "Translacion".

## 5.9 Evaluación de los Análisis y Propuesta de Solución

### a) Evaluación del Análisis de Falla Global

Si evaluamos los resultados y condiciones establecidas tenemos que el factor de seguridad hallado,  $FS = 1.196$ , es bastante bajo; el cual bajo determinadas condiciones críticas no consideradas (sismo, incremento de la carga actuante, variación del nivel freático, etc), podría desencadenarse la falla del talud. Sin embargo, en la visita realizada, se pudo observar que el talud es estable globalmente, lo cual sugiere que el material no sea homogéneo en toda su extensión y el estrato firme (roca o suelo sobre consolidado), esté próximo a la superficie.

Considerando la geología de la ciudad de La Oroya, la roca madre es de naturaleza sedimentaria de origen marino (Caliza) y está cubierta por material aluvial de poco espesor. En las elevaciones este espesor disminuye, teniendo que en algunos casos el estrato rocoso sobresale a la superficie.

Si consideramos que en nuestro caso el estrato rocoso está a poca profundidad, luego es poco probable una falla global con una superficie de deslizamiento circular.

### b) Evaluación del Análisis de Falla Local

Considerando la suposición anterior, basada en la geología del lugar, tenemos que el estrato rocoso está a poca profundidad, condicionando al talud a tener una superficie de falla paralela a su superficie, por tanto afirmamos que es muy probable que se generen fallas de tipo translacional.

Evaluando los resultados obtenidos en el Análisis de Deslizamiento Translacional, tenemos que el Factor de Seguridad hallado tiene un valor muy bajo,  $F.S. = 1.02$ . Por tanto resulta ser inestable ante variaciones de carga, nivel freático y corte en el talud. Esto confirmaría las suposiciones consideradas en función a la geología de la zona.

Luego, podemos afirmar que las construcciones realizadas durante la ejecución del proyecto contribuyeron a la desestabilización del talud al aportar mayor carga, provocar una variación del nivel freático y una variación de esfuerzos en el terreno al ejecutar trabajos de corte.

Entonces el talud es propenso a la falla translacional en las actuales condiciones existentes. Por tanto es necesario realizar trabajos complementarios para incrementar el Factor de Seguridad contra el deslizamiento translacional en el talud.

### c) Propuesta de Solución

El talud es estable globalmente y mediante la construcción de muros de contención se puede controlar los deslizamientos por fallas circulares en el talud, sin embargo el talud es susceptible a la erosión y a que se produzcan deslizamientos translacionales en su superficie, por tanto es necesario reforzar los taludes contra la erosión y para mejorar la estabilidad al deslizamiento translacional.

El análisis de estabilidad translacional muestra que:

- La línea de falla para un deslizamiento translacional ocurre a poca profundidad de la superficie.
- Un incremento del nivel freático produce un incremento de la presión de poros lo cual disminuye la resistencia al esfuerzo cortante del suelo y la estabilidad del talud. Sin embargo, si el nivel freático es regulado y se encuentra por debajo de la línea de falla, se produce un efecto de succión, la cual incrementa la estabilidad del talud.
- Un deslizamiento translacional puede darse en cualquier punto del talud y puede tener dimensiones variables.

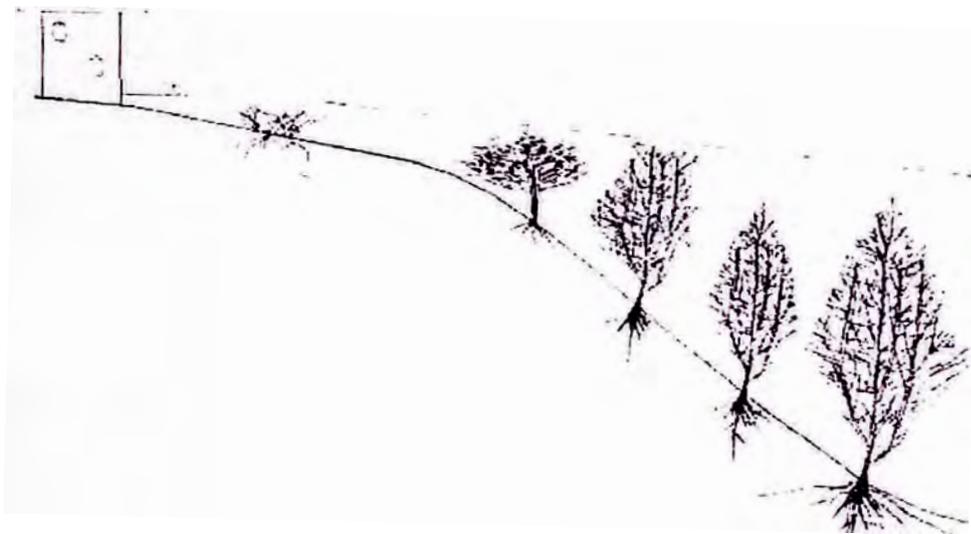
Luego, se puede incrementar la estabilidad translacional del talud si se logran los siguientes objetivos:

- Regular la humedad del sistema, de tal forma que no haya un exceso que disminuya la resistencia al esfuerzo cortante del suelo.
- Incrementar la resistencia al esfuerzo cortante del suelo mediante la inclusión de especies forestales, las cuales aportan mediante la resistencia ofrecida por sus sistemas radicales.
- Controlar la erosión existente en la superficie del talud, de tal manera que se evite la formación de cárcavas.

Para poder proteger el talud de la erosión e incrementar la estabilidad al deslizamiento, planteamos las siguientes acciones:

- Establecer una cubierta vegetal en el talud, distribuida adecuadamente según la técnica de Fajinas de tal manera que se logre escalonar la pendiente del talud y evitando procesos de erosión.
- La distribución más adecuada consiste en proteger de la erosión a todo el talud con gramíneas; colocar en la parte media arbustos que

protejan de la erosión causada por las lluvias, eviten la formación concentrada de flujos de agua y aporten a la sujeción del terreno con sus raíces; y colocar árboles en la parte baja para proteger al terreno de la erosión causada por las lluvias, retener el suelo arrastrado por los flujos de agua y principalmente para estabilizar el terreno con su peso y con la sujeción que ejercen sus raíces (efecto arco).



*Fig. N° 5.03: Distribución recomendada de especies forestales*

- Es necesario considerar las condiciones de estrés ambiental presentes en la zona para el desarrollo de las especies propuestas. Entre las condiciones desfavorables tenemos el clima frígido, la altitud, el poco espesor de la capa agrícola, la presencia de elementos nocivos en el ambiente (gases emanados por la fundición).
- Dado la carente vegetación en la zona, es necesario considerar plantas pioneras tolerantes al estrés ambiental para lograr el establecimiento de la cubierta vegetal en el talud, para posteriormente dar paso a plantas más estables. Dada las condiciones del lugar, las plantas propuestas sufrirán bajos niveles de perturbación (paso de personas, presencia de animales de pastoreo, etc) por lo cual no es un factor de consideración al momento de escoger la especie forestal.
- Dado que las pendientes son muy pronunciadas, se plantea el uso de biomantas reforzadas que aporten la resistencia necesaria hasta el establecimiento de las especies forestales.

- La existencia de cárcavas puede solucionarse mediante la técnica de paquetes de matorral, los cuales consisten en rellenos compactados y reforzados con la siembra de especies forestales (sembrados de esquejes), según se planteó en el Capítulo 3.

#### d) Especies Forestales Recomendadas

Es necesario considerar las siguientes condiciones existentes en la zona:

- Altitud promedio del proyecto: 3700 m.s.n.m.
- Clima de la zona del proyecto: frígido
- Temperatura promedio de la zona: 8°C.
- Promedio Precipitaciones pluviales: 700 mm
- Tipo de terreno: SM
- Condiciones del terreno: pH < 7 (ácido)
- Pendiente promedio: 30°

Luego, las especies recomendadas serán aquellas capaces de poder adaptarse al clima y difíciles condiciones edáficas de la zona. También es necesario señalar que en el medio existe una alta contaminación por la cercanía de la Planta de Fundición de La Oroya, lo cual podría limitar el establecimiento de las especies recomendadas. Sin embargo, ya existen experiencias de forestación en la zona, con resultados alentadores.

Luego, teniendo en cuenta las condiciones existentes, planteamos la reforestación del talud con las siguientes especies:

- *Stipa Ichu* (Ichu): es una gramínea oriunda del Perú que brinda una excelente protección contra la erosión. Resiste muy bien a la sequía, las heladas, el estrés ambiental y la perturbación debida a agentes externos (pisoteo). Se establece a una altitud entre los 3600 a 4200 m.s.n.m.
- *Lupinus Mutabilis* (Tarwi): es un arbusto oriundo del Perú. es resistente a las heladas, se adapta a diversos tipos de suelo y requiere una profundidad media – baja de suelo para establecerse. Tiene una resistencia media – alta a la pedregosidad y un requerimiento medio de agua. Se desarrolla a una altitud promedio entre los 2500 m.s.n.m. hasta los 4200 m.s.n.m.

- *Cassia Tormentosa* (Mutuy): es un árbol oriundo del Perú. Se adapta a todo tipo de suelo y es resistente a las heladas. Tiene una resistencia media – alta a la pedregosidad y un requerimiento medio de agua. Requiere una profundidad media escasa de suelo para su establecimiento y se desarrolla a una altitud entre los 2300 m.s.n.m. hasta los 4000 m.s.n.m.

#### e) Trabajos Complementarios

Según se pudo observar las condiciones de la superficie del talud no son las más adecuadas para el establecimiento de las especies planteadas.

Según la inspección realizada se presentan los siguientes problemas en la superficie del talud y en su suelo:

- Alta pedregosidad.
- Estrato escaso de suelo.
- Elevadas pendientes.
- Excesiva compactación del terreno.
- Características edáficas pobres.
- Estructura inadecuada del suelo.
- Deficiencia de un riego adecuado.
- Alta erosión pluvial.

Luego, para que las especies forestales puedan establecerse, es necesario considerar llevar a cabo los siguientes trabajos (15):

- *Descompactar la superficie de sembrado*, de tal manera que se produzcan caminos de drenaje y se incrementen la velocidad de infiltración a través del suelo, reduciendo el volumen de agua de escorrentía. Esto se logra mediante un rastrillado del terreno según se crea conveniente, pudiendo llegar a voltear el terreno si se cree conveniente. Dado que el talud tienen pendientes muy elevadas, los trabajos de descompactación serán ejecutados a mano, mediante herramientas manuales. Estos trabajos también pueden incluir el trazado de surcos, si es que la pendiente lo permite, para el sembrío o implantación de especies; es necesario considerar que los surcos trazados sean perpendiculares a la máxima pendiente del talud con la finalidad de evitar que el agua pluvial pueda erosionar la superficie. La

forma y los métodos de descompactación dependen de los métodos de sembrío o implantación a utilizar.

- *Mejoras Edáficas*, consiste en crear sobre la superficie del talud un perfil con características adecuadas para permitir el establecimiento de la vegetación. Es necesario evaluar el suelo para establecer las deficiencias existentes; tales como la deficiencia de materia orgánica, la pobreza en elementos nutritivos, estructuras poco desarrolladas, etc. Los trabajos realizados para mejorar las características edáficas pueden ser aporte de suelo orgánico (retirando previamente una capa del suelo oriundo), aporte de enmiendas orgánicas (aplicación de estiércol, compost de residuos sólidos, lodos de depuradora, etc), fertilización con productos químicos inorgánicos (productos que contengan nitrógeno, fósforo, potasio, et), adición de productos acondicionadores, estabilizantes y absorbentes para mejorar la estructura del suelo y su capacidad de retención de agua (alginatos, polímeros sintéticos, polisacáridos naturales, etc). Puede aplicarse uno o más de estos métodos, según sea las deficiencias del terreno a tratar.
- *Protección y Refuerzo*, si las condiciones son muy difíciles para el establecimiento de la vegetación, se recomienda usar mantas biodegradables (biomantas) o mantas no degradables (geomantas). No se está considerando el uso de productos aglutinantes, debido a que estos no permiten la infiltración del agua y son sensibles a la erosión pluvial
- En el mercado nacional existen diversas propuestas de geosintéticos, considerando la siguiente como la más recomendada en boletines especializados (16):

Biomantas, compuestas 100% de paja agrícola y de una o dos redes livianas de polipropileno fotodegradables. Estas mantas ofrecen un control de erosión en taludes con una inclinación máxima de 30°, y ofrecen una longevidad funcional de casi 12 meses. Al desintegrarse la biomanta, pasa a formar parte del contenido orgánico del terreno para la alimentación de la planta. Biomantas compuestas 70% de paja agrícola y 30% de fibra vegetal, encerradas dentro de una red pesada de polipropileno

estabilizada contra los rayos UV, por arriba y de una red liviana de polipropileno fotodegradable, que se utilizan normalmente en taludes con inclinaciones de 30° hasta 45° y en zonas donde se necesite protección por más de una temporada de crecimiento.

Biomantas compuestas 100% en fibra vegetal, encerradas dentro de dos redes pesadas de polipropileno estabilizadas contra los rayos UV, que le permiten ofrecer un control de erosión superior en taludes con inclinación mayor a 45°, o en lugares que requieren protección hasta por 3 años.

Geomantas (mantas no degradables) compuestas por 100% de fibra de polipropileno estabilizado contra los rayos UV, capaces de proporcionar control de la erosión y refuerzo permanente de la vegetación en taludes severos.

Geomantas tridimensionales compuestas de filamentos de polipropileno fundidos en sus puntos de contacto con un 90% de vacíos, que constituyen un excelente confinador de suelos fértiles para producir el efecto deseado de la revegetación sobre suelos no apropiados para ello. En una primera etapa protege al suelo del lavado por efecto de la lluvia y la escorrentía superficial y en la segunda, refuerza las raíces de la vegetación de manera permanente.

#### **f) Análisis de Deslizamiento Translacional – Con Vegetación**

Una vez establecidas las especies forestales en el talud, se tendrá un incremento en la estabilidad mecánica del talud, esto es cuantificable incluyendo la resistencia de las raíces de los arbustos y árboles en el análisis de estabilidad.

Según Patricio García Fayos (8), establece que el conjunto raíces/suelo constituye una estructura mixta formada por una trama semicontinua de fibras (raíces), que tienen una resistencia a la tracción y una adhesividad relativamente altas, incluida y ligada a una matriz (el suelo) que ofrece una resistencia a la tracción significativamente inferior.

En esta estructura mixta, las raíces actúan como un elemento equilibrador de fuerzas, transfiriendo una parte de la carga, desde las zonas sometidas a mayores esfuerzos, hacia otras en las que existen menores

tensiones, de forma que, el esfuerzo cortante al que está sometido el suelo queda repartido, y con ello, se incrementa el nivel máximo de tensión admisible en condiciones similares de pendiente.

Por otro lado, las raíces proporcionan al suelo una mayor resistencia al corte por el mayor grado de cohesión interna que tiene la estructura compuesta raíces/suelo y la adhesión de las partículas a las raíces.

En nuestro caso, el refuerzo mecánico aportado por las raíces de los arbustos y árboles es cuantificable en el análisis de Deslizamiento Translacional como un valor  $R$ , similar al de la cohesión, pero a diferencia de esta es aplicable a todos los casos expuestos en el análisis de estabilidad.

Luego en la hoja de cálculo “DESLIZA TRANSLACION.XLS” incluimos como  $R$ , al aporte de resistencia de las raíces de árboles y arbustos, en los análisis de estabilidad de cada caso considerado.

El factor de seguridad hallado es comparado con el factor de seguridad hallado para el caso anterior y según esto podemos cuantificar el incremento del factor de seguridad por el uso de una cubierta vegetal en el talud.

#### **g) Observaciones**

- En el Análisis de Deslizamiento Translacional, para las condiciones actuales, el factor de seguridad obtenido es de 1.02, inferior al Factor de Seguridad mínimo exigido. Esto nos indica que el talud está propenso a deslizamientos cuando las condiciones actuales cambien. La inestabilidad del talud puede ser provocada por una variación de las cargas actuantes, una variación en el nivel freático, movimientos sísmicos, erosión del talud, etc. La ocurrencia de estos hechos ha provocado, actualmente, fallas en distintos sectores del talud, aún cuando la construcción de muros de contención hayan asegurado la estabilidad del sistema a fallas circulares.
- En el Análisis de Deslizamiento Translacional - Con vegetación, se ha incluido el refuerzo de la vegetación para las condiciones actuales, obteniéndose un factor de seguridad de 3.48. Esto garantiza que el talud no fallará por translación ante cambios de cargas, nivel freático, movimientos sísmicos, erosión, etc. Con la inclusión de una cubierta

vegetal, el talud, incrementaría el factor de seguridad al deslizamiento por translación en 3.40 veces.

- El valor de R (incremento de la cohesión del suelo), para nuestro caso, es un promedio de los valores considerados para plantas similares a las recomendadas. En este aspecto no se tienen muchos datos actualmente; siendo los valores recomendados por los textos los pertenecientes a especies foráneas. Sin embargo es indudable el beneficio mecánico percibido por el uso de una cubierta vegetal en el talud.
- La acción reforzadora en el perfil por parte de gramíneas y arbustos es palpable hasta profundidades de entre 0.75 m y 1.5 m, que es hasta donde llegan sus raíces. Mientras que en los árboles esta influencia se extienden hasta profundidades de 3 m a más, dependiendo de la morfología de su sistema radical. Por tanto, con la profundidad alcanzada por las raíces se garantiza incrementar la estabilidad ante riesgos de fallas por translación, ya que en estos casos la profundidad de la línea de falla es relativamente pequeña en comparación a fallas circulares (8).

## 5.10 Anexos

En los anexos presentamos los documentos base utilizados en la Evaluación de Estabilidad al proyecto “Escalinatas, Muro de Contención y Forestación en Acceso a La Oroya”, los cuales fueron proporcionados por la Municipalidad Provincial de Yauli – La Oroya.

La relación de documentos es la siguiente:

- Estudio de Suelos realizado por el Técnico Oscar Ortiz Jahn, donde incluye el Perfil Estratigráfico, Clasificación e Identificación de Suelos y el Ensayo de Corte Directo.
- Planos utilizados en la evaluación de estabilidad del proyecto, los cuales incluyen:
  - Plano Topográfico Lámina N° 01.
  - Plano Arquitectónico Lámina N° 02.
  - Plano Corte Transversal 54 – 54 Lámina N° 03.

# CAPÍTULO VI

## CONCLUSIONES

---

### 6.1 Conclusiones Teóricas

#### Resistencia al Esfuerzo Cortante del Terreno

De la teoría de Coulomb, tenemos que:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi$$

Donde:

$\tau$  : Esfuerzo cortante a lo largo del plano de deslizamiento.

$c$  : Cohesión aparente.

$\sigma_n$  : Esfuerzo normal que actúa en el plano de deslizamiento.

$\phi$  : Ángulo de fricción interna.

Pero según la teoría de Terzaghi (1943), tenemos que la presión de poros afecta a la resistencia del suelo según la relación:

$$\sigma' = \sigma - u$$

Donde:

$\sigma'$  : Esfuerzo normal efectivo en el plano de deslizamiento.

$u$  : Presión de poro en el plano de deslizamiento.

Considerando la influencia del agua en el suelo, tenemos que la resistencia del suelo al esfuerzo cortante es:

$$\tau = c' + \sigma'_n \tan \phi'$$

Donde:

$c'$  : Cohesión aparente con respecto al esfuerzo efectivo.

$\phi'$  : Ángulo de fricción interna con respecto al esfuerzo efectivo.

Luego, tenemos que si la presión de poros se incrementa el esfuerzo normal efectivo disminuye y con esto también disminuye la resistencia al esfuerzo cortante del suelo. Por el contrario una disminución de la presión de poros incrementaría el esfuerzo normal efectivo y por tanto también se incrementa la resistencia al esfuerzo cortante del suelo.

Por tanto, podemos mejorar la estabilidad del suelo, incrementando la resistencia al esfuerzo cortante mediante la regulación de la humedad en el terreno. Una cobertura vegetal absorbe la humedad del suelo para su nutrición y evita excesos provenientes de las lluvias.

## 6.2 Conclusiones Aplicativas

La cobertura vegetal protege al terreno de la erosión, regula la humedad existente y contribuye con la estabilidad mecánica mediante tallos y raíces.

En función a la teoría y casos presentados, podemos concluir que:

- a) Un sistema de reforestación es aplicable como estabilizador en taludes si la posible falla del talud no compromete la vida de seres, construcciones o equipos. Esta restricción surge debido a que el comportamiento de las plantas, como elemento de refuerzo mecánico, es incierto ya que depende de numerosas condiciones (velocidad de crecimiento, posibilidades de establecimiento, adecuadas condiciones climáticas y edafológicas, etc). Luego concluimos que se puede estabilizar un talud mediante reforestación, cuando éste no represente en si un riesgo para la vida de seres, para construcciones o equipos; para taludes con condiciones elevadas de riesgo es conveniente aplicar la biotécnica, donde el elemento estabilizador principal depende de estructuras inertes y la vegetación representa una importante protección contra la erosión, regulación de la humedad y en forma secundaria. un aporte a la estabilización mecánica del talud.
- b) Las coberturas vegetales son aplicables si se tienen las condiciones necesarias para el asentamiento de las especies forestales integradas; por tanto es necesario escoger las especies forestales que puedan adaptarse a las condiciones climáticas y edafológicas del lugar.

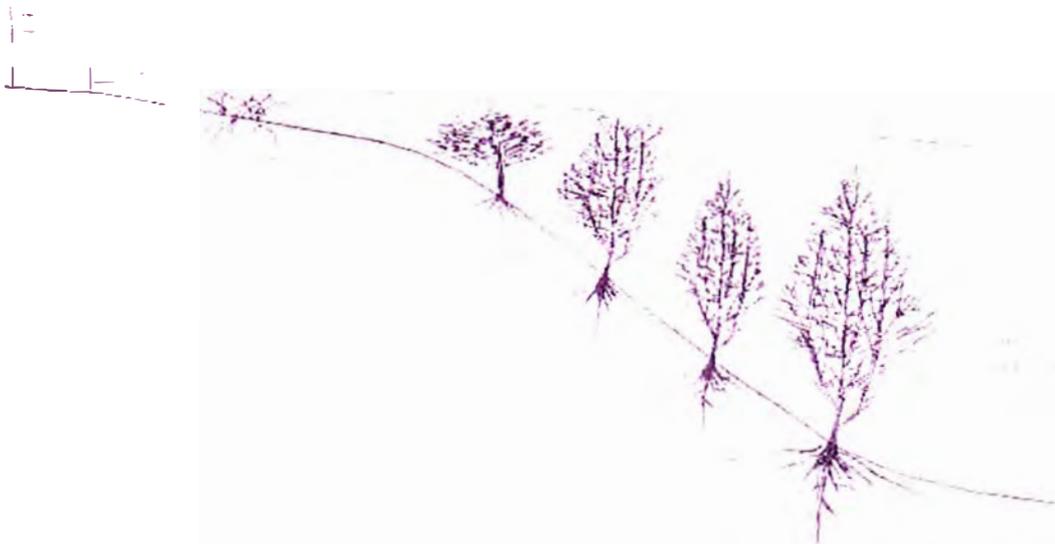
Se ha notado que en numerosos proyectos, las especies integradas no pueden sobrevivir a las condiciones impuestas, ya sea por encontrar características climáticas adversas (altura, precipitación, luz solar), condiciones edafológicas inadecuadas (espesor del sustrato, textura del suelo, fertilidad, condiciones de acidez) o un medio ambiente agresivo. Esto se pudo evidenciar en reforestaciones llevadas a cabo en la ciudad de La Oroya, donde muchas de las especies forestales no pudieron prosperar dado a condiciones adversas existentes (el clima del lugar, la altitud y principalmente la fuerte contaminación del medio por plomo que produce lluvia ácida).

- c) Cuando se integra una nueva especie en un hábitat, es importante tener en cuenta las características de comportamiento de la especie, ya que ésta podría convertirse en una especie invasora que afecta a las

especies oriundas del lugar. Como sabemos, la mayoría de las especies vegetales utilizadas en bioingeniería son plantas pioneras o pertenecientes a las primeras etapas de la sucesión vegetal, ya que generalmente las condiciones ambientales no son adecuadas para el desarrollo de especies pertenecientes a etapas superiores mucho más exigentes (especies oriundas). Estas especies pioneras sirven para estabilizar el talud y para abrir paso a la inserción de plantas pertenecientes a etapas superiores, generalmente oriundas de la zona, que no pudieran adecuarse a las condiciones iniciales del talud.

En experiencias vistas, sobretodo en la selva, las especies introducidas pueden llegar a convertirse en especies invasoras, saliendo de la zona de aplicación y afectando a la ecología del medio.

- d) Es necesario, evaluar convenientemente la problemática presente en el talud, para escoger el método de estabilización y seleccionar el conjunto más adecuado de especies. Según se pudo observar, la distribución más adecuada es la siguiente:



*Figura N° 06.01: Distribución recomendada de plantas en un talud.*

En un talud se recomienda la siguiente distribución de las especies forestales:

- Proteger toda la superficie con especies gramíneas que protejan la superficie de la erosión pluvial (efecto erosivo de las gotas de lluvia y cursos de agua).

- Establecer arbustos en la zona media a baja del talud. Con la característica de que tengan un sistema radical extendido que proporcione una sujeción adecuada al terreno, que posea una cubierta coposa con hojas pequeñas y de poca altura para que intercepte la lluvia y permita juntar las gotas en grupos pequeños que sean inofensivos al caer al suelo, y que su sistema de tallo no sea muy elevado, de tal manera que conforme un obstáculo a la creación de cursos de agua en el terreno.
  - Establecer árboles en la zona baja del talud. Con la característica que su sistema radical sea profundo y extendido de tal manera que pueda fijar el suelo por debajo de la línea de falla y pueda retener el terreno de la parte superior del talud (efecto de arco). No debe poseer mucha altura y sus hojas deben ser pequeñas y abundantes, para poder ofrecer las mismas ventajas presentadas en los arbustos. Los árboles se establecen en la parte inferior para que su peso sea un elemento estabilizador y el efecto de palanca ejercido por el viento no desestabilice al talud.
  - La distribución de árboles y arbustos se recomienda que sea uniforme y regular; pudiendo ser arreglos longitudinales, diagonales o radiales. Esto permite controlar los cursos de agua, controlar los efectos mecánicos de las plantas en el terreno y controlar el crecimiento, desarrollo y establecimiento de las especies.
- e) Para el control de la erosión y garantizar un adecuado asentamiento de las especies vegetales incorporadas en taludes críticos, se suelen utilizar *biomantas*. En el mercado tenemos:
- Mantas biodegradables (biomantas), compuestas 100% de paja agrícola y de una o dos redes livianas de polipropileno fotodegradables. Se utilizan en taludes con una inclinación hasta 30° y tienen una longevidad de hasta 12 meses.
  - Biomantas compuestas 70% de paja agrícola y 30% de fibra vegetal, encerradas dentro de una red pesada de polipropileno estabilizada contra los rayos UV, por arriba y de una red liviana de polipropileno fotodegradable. Se utilizan en taludes con inclinaciones de 30° hasta

- 45° y en zonas donde se necesite protección por más de una temporada.
- Biomantas compuestas 100% en fibra vegetal, encerradas dentro de dos redes pesadas de polipropileno estabilizadas contra los rayos UV, que le permiten ofrecer un control de erosión superior en taludes con inclinación mayor a 45°, o en lugares que requieren protección hasta por 3 años.

## BIBLIOGRAFÍA

La presente tesis se ha realizado en base a la información obtenida total o parcialmente de los siguientes libros, artículos y publicaciones:

1. ALBERTO SAYAO, PhD - "Alternativas para estabilización de Taludes" Conferencia Internacional de Ingeniería Geotécnica Sísmica, organizado por la Sección de Post Grado de la Facultad de Ingeniería Civil. Lima, noviembre del 2005.
2. ARNALDO CARRILLO GIL, Dr - "Bioingeniería Aplicada a la Ingeniería Civil". II Simposio Internacional: Geotecnia y Medio Ambiente, organizado por la Facultad de Ingeniería Geológica y Geotécnica de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Tacna, diciembre del 2004.
3. CARLOS LÓPEZ JIMENO, JUAN LUIS FARIÑAS DE ALBA, ROBERTO GÓMEZ PRIETO, CARMEN MATAIX GONZÁLEZ, PILAR GARCÍA BERMÚDEZ, GUILLERMO LLOPIS TRUJILLO Y PEDRO ALBERTO SERRANO PEDRAZA - "Manual de Estabilización y Revegetación de Taludes". Editor Carlos López Jimeno. Madrid, España 1999.
4. EMPRESA MINERA ANTAMINA - "Informe Sobre Trabajos de Forestación Realizados por la Empresa Antamina". Cajamarca 2004.
5. GRAY, D.H. & SOTIR R.B. - "Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization" Editorial John Wiley & Sons. INC, Primera Edición. New York, EEUU 1996.
6. JAIME SUÁREZ DÍAZ - "Deslizamiento y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales". Editorial Escuela de Ingeniería Civil. Bucaramanga, Colombia 1998.
7. MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE LA OROYA - "Estudio de Suelos con Fines de Cimentación – Edificación Sede Universitaria". Junín, La Oroya 2005.
8. PATRICIO GARCÍA FAYOS – "Interacciones entre la Vegetación y la Erosión Hídrica". Editorial Nuevo Mundo, Colombia 1998.
9. PETER L. BERRY & DAVID REID - "Mecánica de Suelos". Editorial McGraw Hill. Colombia 1993.
10. PLUSPETROL & INMAC - "Informe de Inspección sobre Efectividad de las Medidas de Control de Erosión y Sedimentación Lote 88 – Área Las Malvinas". Lima 2004.

11. PROYECTO JALDA - "Control de la Formación de Cárcavas - Boletín Informativo", Bolivia 2001.
12. R. P. C. MORGAN - "Erosión y Conservación del Suelo" traducción Dr. P. Urbano Terrón. Editorial Mundi Prensa, México 1996.
13. RICO Y DEL CASTILLO - "La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas". Editorial Limusa, México 1982.
14. ROY WHITLOW - "Fundamentos de Mecánica de Suelos". Compañía Editorial Continental, Segunda Edición en inglés (Primera Edición en Español).. México 1994.
15. ROBERT M. KOERNER - "Diseño con Geosintéticos". Editorial Prentice Hall Cuarta Edición (Traducida para la Sociedad Internacional de Geosintéticos). EEUU 2002.
16. TDM - Boletín Informativo: "Mantas para el Control de Erosión". Publicado por Tecnología de Materiales. Lima, Perú 2004.
17. USACE - "Guidelines for Landscape Planting and Vegetation Management at Floodwalls, Levees and Embankment Dams". Editora USACE. EEUU 2000.
18. VEN TE CHOW - "Hidráulica de los Canales Abiertos". Editorial Diana, México 1982.
19. Información obtenida de internet:
  - "Especies andinas del Perú Usos y cualidades". [www.monografias.com/trabajos15/especiesandinas.html](http://www.monografias.com/trabajos15/especiesandinas.html)
  - "Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica". [www.goecities.com/geotecnia/bioingenieria.htm](http://www.goecities.com/geotecnia/bioingenieria.htm)
  - "La Ciencia Ecológica: La Erosión de Suelos": [www.iespana.es/natureduca/cienc\\_suelo\\_erosion.htm](http://www.iespana.es/natureduca/cienc_suelo_erosion.htm).
  - "Limitaciones de la Restauración de La Cubierta Vegetal". [www.goecities.es/ecosistema\\_publicacion.html](http://www.goecities.es/ecosistema_publicacion.html) "Vegetación y bioingeniería": [www.iespana.es/geotecnia.html](http://www.iespana.es/geotecnia.html)
  - "Sistemas Agroforestales para el Manejo de Cuencas Andinas" – ALNICOLSA Productos Industriales. [www.alnicolsa.com](http://www.alnicolsa.com)
  - [www.nagreen.com](http://www.nagreen.com)
  - [www.tdm.com.pe](http://www.tdm.com.pe)
  - [www.vetiver.org](http://www.vetiver.org)

# **ANEXOS**



**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**  
**PAVIMENTOS Y MATERIALES:**  
 Av. Próceres N° 146 Chilca Telf. 213813 Cel. 9672241 - Huancayo

## PERFIL ESTRATIGRAFICO

PROYECTO : ESCALINATAS - MURO DE CONTENSION Y FORESTACION EN ACCESO - LA OROYA

UBICACIÓN : LA OROYA

SOLICITA : MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE YAULI - LA OROYA

CALICATA : C-1

TIPO DE EXCV. A cielo abierto

N.F. No

FECHA Nov-05

MTS	GRUPO	DESCRIPCION	SIMBOLO	SUCS
1.50		Material de arenas limosas, con mezclas de arena y limo, en estado semi compacto, con humedad optima.  <b>CAPACIDAD PORTANTE</b> <b>0.54 Kg/cm<sup>2</sup></b>		SM

OSCAR ABRAHAM ORTIZ JAHN  
 Esp. de Mecánica de Suelos  
 y Pavimento

HECTOR AVILEZ PEÑA  
 ARQUITE



**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS  
PAVIMENTOS Y MATERIALES:**  
Av. Próceres N° 146 Chilca Telf. 213813 Cel. 9672241 - Huancayo

## PERFIL ESTRATIGRAFICO

**PROYECTO :** ESCALINATAS - MURO DE CONTENION Y FORESTACION EN ACCESO - LA OROYA  
**UBICACIÓN :** LA OROYA **TIPO DE EXCV.** A cielo abierto  
**SOLICITA :** MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE YAULI - LA OROYA **N.F.** No  
**CALICATA :** C-2 **FECHA** Nov-05

MTS	GRUPO	DESCRIPCION	SIMBOLO	SUCS
		Material de arenas limosas, con mezclas de arena y limo, en estado compacto, con humedad óptima de color marrón.		SM

OSCAR ABRAHAM ORTIZ JAHN  
 Exp. de Mecánica de Suelos  
 8647

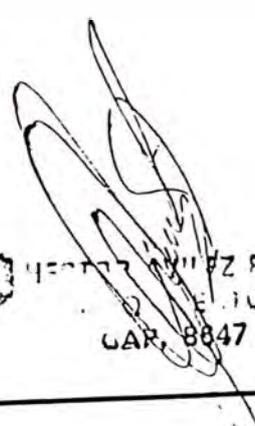
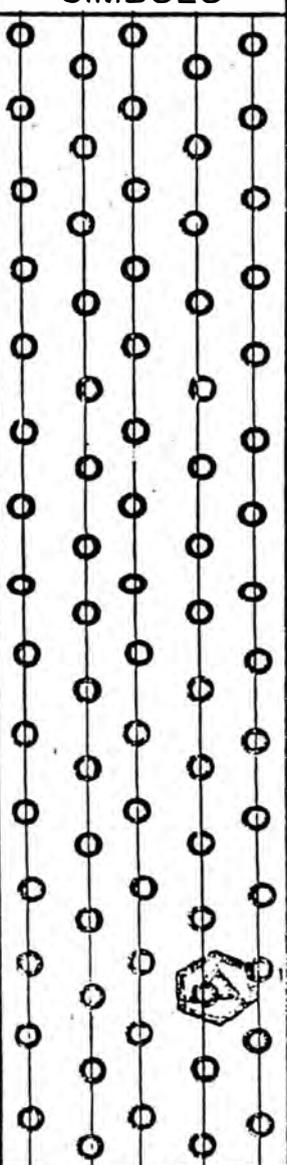
**OSCAR ABRAHAM ORTIZ JAHN**  
 Exp. de Mecánica de Suelos



**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS  
PAVIMENTOS Y MATERIALES:**  
Av. Próceres N° 146 Chilca Telf. 213813 Cel. 9672241 - Huancayo

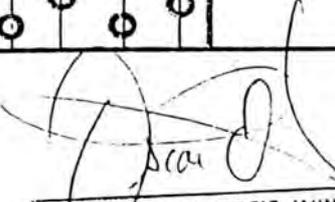
## PERFIL ESTRATIGRAFICO

**OBJETO :** ESCALINATAS - MURO DE CONTENSION Y FORESTACION EN ACCESO - LA OROYA  
**UBICACIÓN :** LA OROYA **TIPO DE EXCV. :** A cielo abierto  
**MUNICIPALIDAD :** MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE YAULI - LA OROYA **N.F. :** No  
**CATEGORIA :** C-3 **FECHA :** Nov-05

MTS	GRUPO	DESCRIPCION	SIMBOLO	SUCS
1.50		<p>Material de arenas limosas, con mezclas de arena y limo, en estado compacto, con humedad óptima de color marrón.</p> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;">   <b>HECTOR VILLAZ PEÑA</b>  <small>INGENIERO CIVIL</small>  <small>CAR. 8847</small> </div>		SM

**Ing. FERRIÑA y Rada**  
 Evaluador de Proyectos  
 R.C.M. 10 0010  
 C.I.P. No 66127



  
**OSCAR ABRAHAM ORTIZ JAHN**  
 Esp. de Mecánica de Suelos  
 y Pavimento

# UNIVERSIDAD PERUANA LOS ANDES

## LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

Nº 04379

ESCALINATAS-MURO DE CONTENSION Y  
FORESTACION EN ACCESO - LA OROYA

Solicita:

ra: C.I.N.1 Km. 1.50m.prof.  
a: \_\_\_\_\_ Certificado: \_\_\_\_\_  
YO. 24-11-05 Muestra de: Calicata

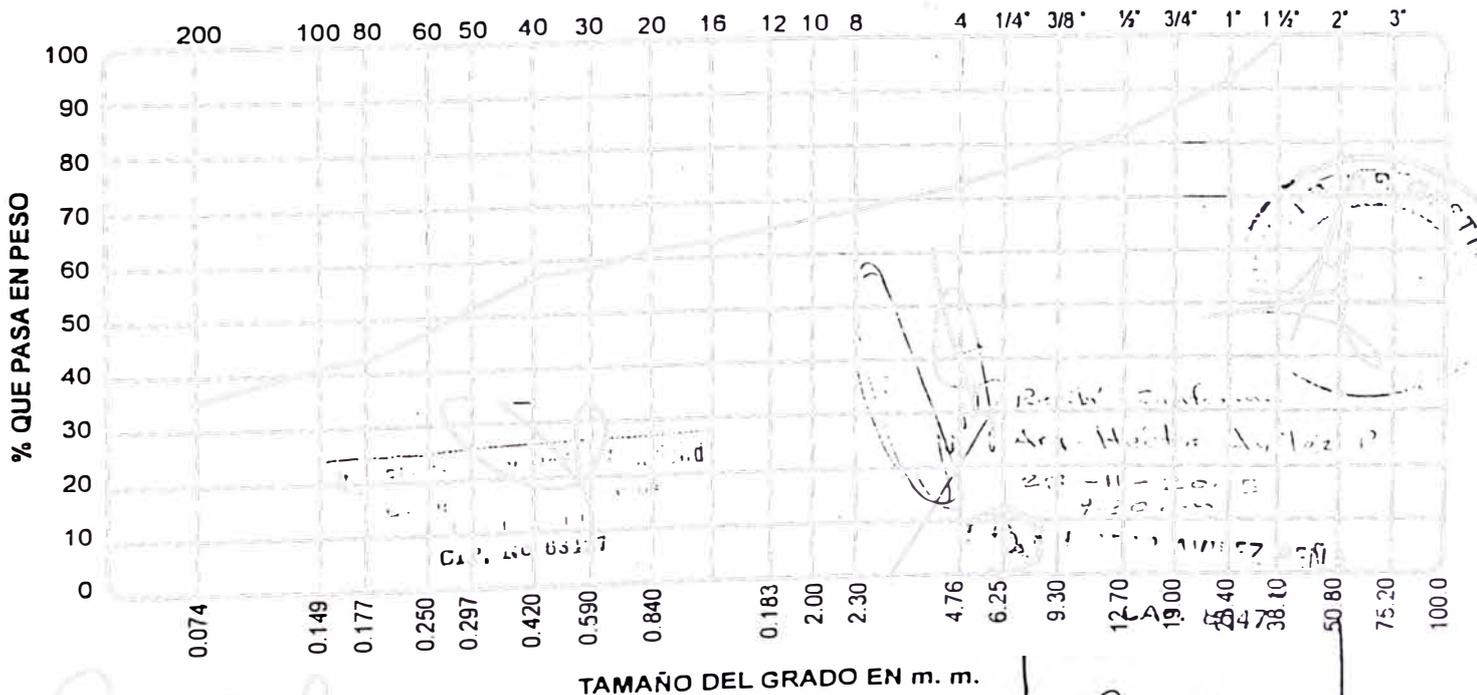
Contratista: MUNICIP. PROV. YAULI-  
Sector: LA OROYA  
Operador: R. Orat F.  
Procedencia: YAULI-LA OROYA

### CLASIFICACION E IDENTIFICACION DE SUELOS

ES	Peso Retenido	% Retenido Peso	% Retenido Acumular	% Que Pasa	Especificaciones	Tamaño Máximo
						DESCRIPCIONES DE LA MUESTRA
					SUGS: SM	
				100		ARENA LIMOSA MEZCLA MAL GRADA DE ARENA Y LIMO.
	156	7.8	7.8	92.2		
	108	5.4	13.2	86.8		
	74	3.7	16.9	83.1		
	87	4.3	21.2	78.8		LL. 17.0
1	119	6.0	27.2	72.8		LP. N.P.
3	106	5.3	32.5	67.5		IP. N.P.
0	21	1.0	33.5	66.5		II. R. C. CLASIFIC. SUGS
6	63	3.1	36.6	63.4		IG.
0	37	1.8	38.4	61.6		OBSERVACIONES
0	49	2.5	40.9	59.1		HUMEDAD NATURAL: 8.2%
0	52	2.6	43.5	56.5		PESO ESPECIFICO: 2.50
0	100	5.0	48.5	51.5		P.U. HUME. SUELTO: 1638 K/m <sup>3</sup>
0	174	8.7	57.2	42.8		PROP. Y CARACT. FISICAS:
00	33	1.7	58.9	41.1		PERMEABILIDAD: Baja
00	101	5.1	64.0	36.0		CAPILARIDAD: Mediana
00	720	36.0	100			ELASTICIDAD: Nula
AL	1280					XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
INC.	2000					XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

estra proporcionada por el interesado.

#### TAMAÑO DE LAS MALLAS U.S. STANDARD



UNIVERSIDAD PERUANA LOS ANDES  
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

ING. NICO ORATISTA  
REG. PROF. Nº 12345

ING. SUPERVISOR

047

UNIVERSIDAD PERUANA LOS ANDES  
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

LÍMITES DE ATTERBERG

82 05711

Objeto: ESCALINATAS-MURCS DE CONDENSACION Y FORESTACION ACCESO LA OROYA  
C.l M.1 Muestra: 1.50m.prof. Fecha: HYO. 24-11-05  
 Lugar: YAUJI LA OROYA Certificado: \_\_\_\_\_ Hecho por: R. Oré F.

DE PLÁSTICO

N°			
plante + Suelo Húmedo en gr.			
plante + Suelo Seco en gr.			
Agua en gr.			
Recipiente en gr.			
Suelo Seco en gr.		N.P.	
Indice de Humedad en gr.			

HUMEDAD NATURAL

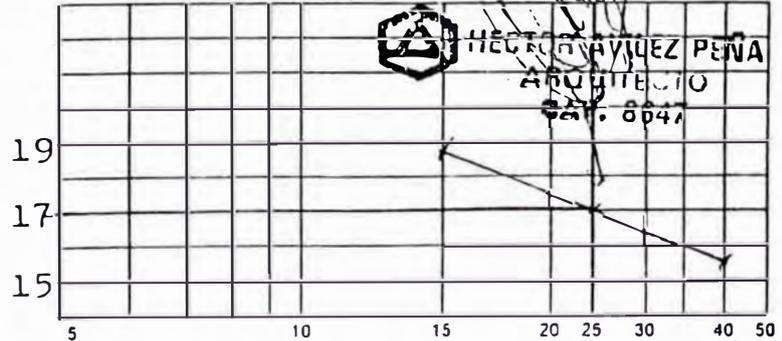
16		
61.2		
57.4		
3.8		
11.2		
46.2		
8.2		8.2%

LÍQUIDO

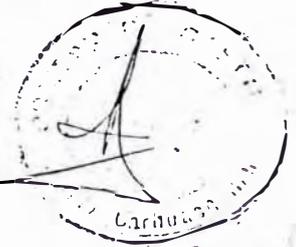
Plante	40	15		
N°	9	6		
plante + Suelo Húmedo en gr.	50.5	51.1		
plante + Suelo Seco en gr.	45.2	44.8		
Agua en gr.	5.3	6.3		
Recipiente en gr.	11.0	11.1		
Suelo Seco en gr.	34.2	33.7		
Indice de Humedad en gr.	15.5	18.7		

DE CONTRACCIÓN

N°	
Inalterada o Remoldeada	
la Pastilla de Suelo Seco en gr.	
Agua + HG en gr.	
Agua en gr.	
Agua en gr.	
Indice de la Pastilla de Suelo en gr.	
Indice de Contracción en %	



LÍMITE PLÁSTICO	HUMEDAD NATURAL	LÍMITE LÍQUIDO	INDICE PLASTICIDAD
N.P.	8.2	17.0	N.P.

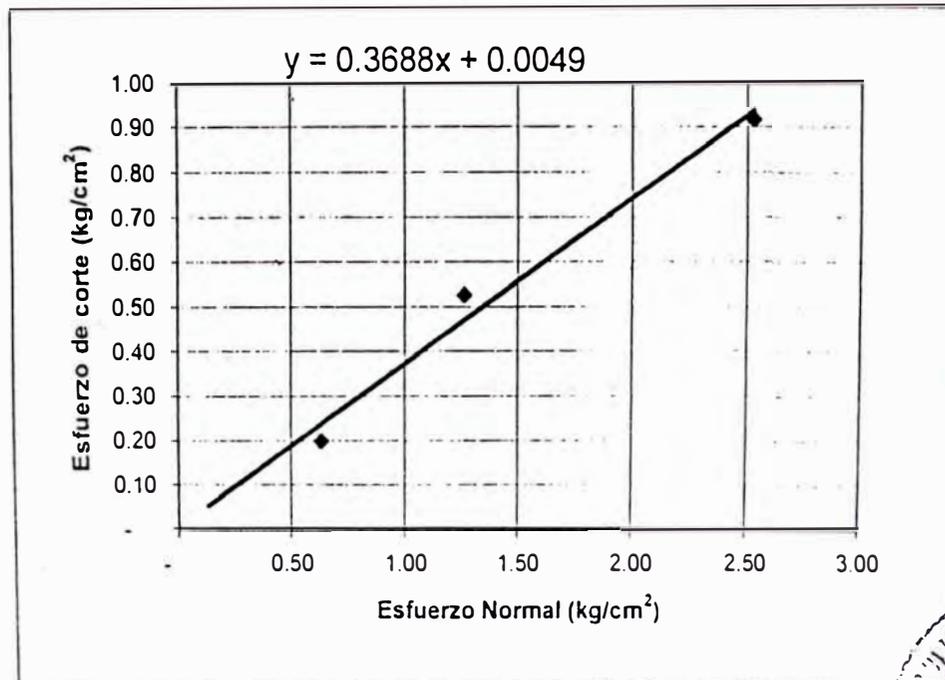
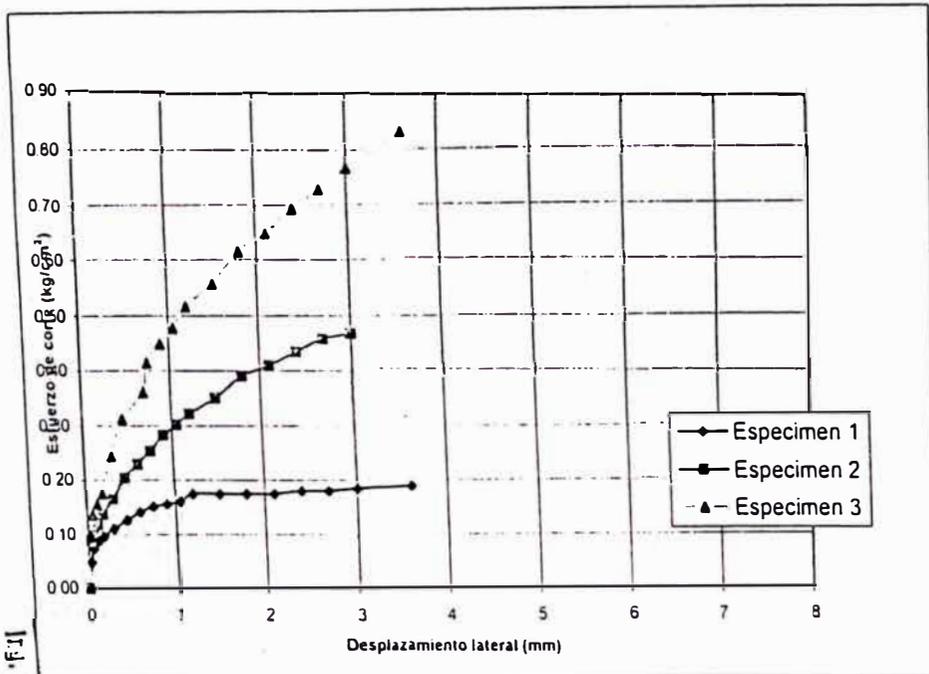


UNIVERSIDAD PERUANA  
LOS ANDES  
LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS  
TÉCNICO LABORATORISTA  
RICARDO FLORES  
LABORATORISTA



Ing. Florio...  
Evaluador de Proyectos  
PUNTO MIL  
CIP, No 65427

ING. ISO



**ENSAYO DE CORTE DIRECTO  
ASTM D3080**

**PROYECTO :** Escalinatas-muros de Contención-y Forestación Acce  
**SOLICITANTE :** Municip. Prov. Yauli-La Oroya  
**UBICACIÓN :** Yauli - La Oroya

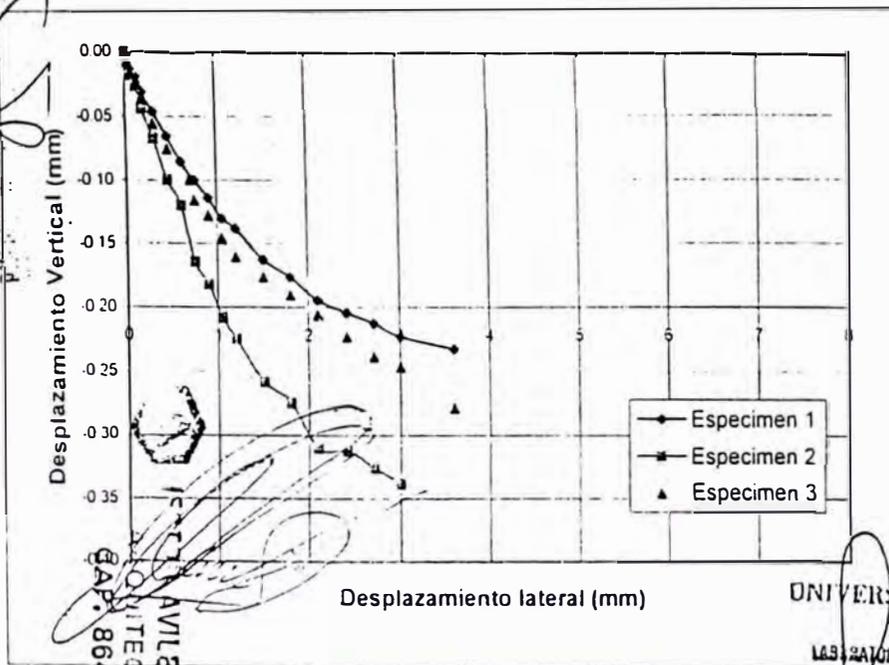
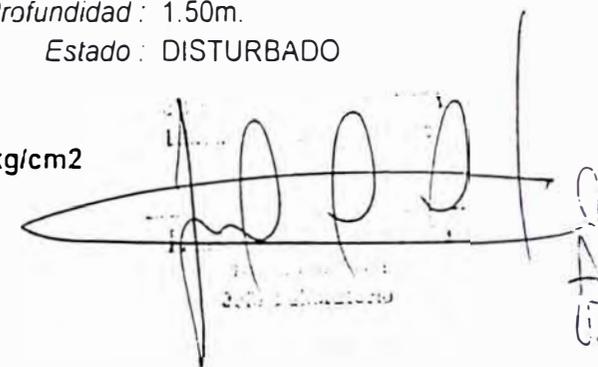
**FECHA :** 24 de Noviembre del 2005

Sondaje : C-1  
 Muestra : M-1

Profundidad : 1.50m.  
 Estado : DISTURBADO

Resultados:  
 Cohesión (c):  
 Ang. Fricción (φ):

0.005 kg/cm<sup>2</sup>  
 20 °



[F] Evaluación de riesgos  
 C.A.R. No 05117

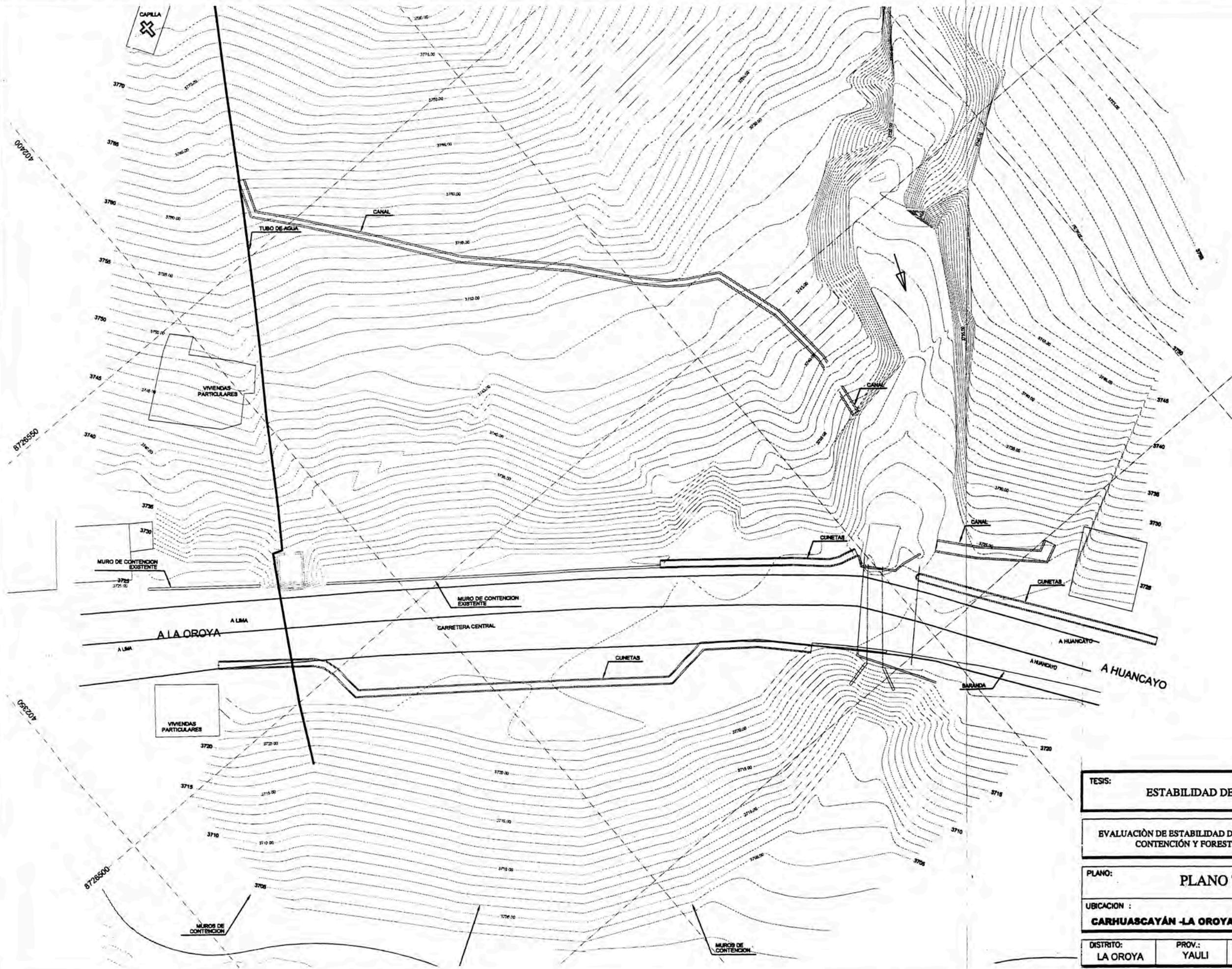
ESTEBAN AVILEZ PEÑA  
 INGENIERO  
 G.A.P. 8647

UNIVERSIDAD PERUANA  
 LOS ANDES  
 LABORATORIO MECANICA DE SUELOS  
 [Signature]  
 RICARDO ORTIZ  
 TECNICO LABORATORIO





CAPILLA



TESIS: ESTABILIDAD DE TALUDES CON REFORESTACIÓN

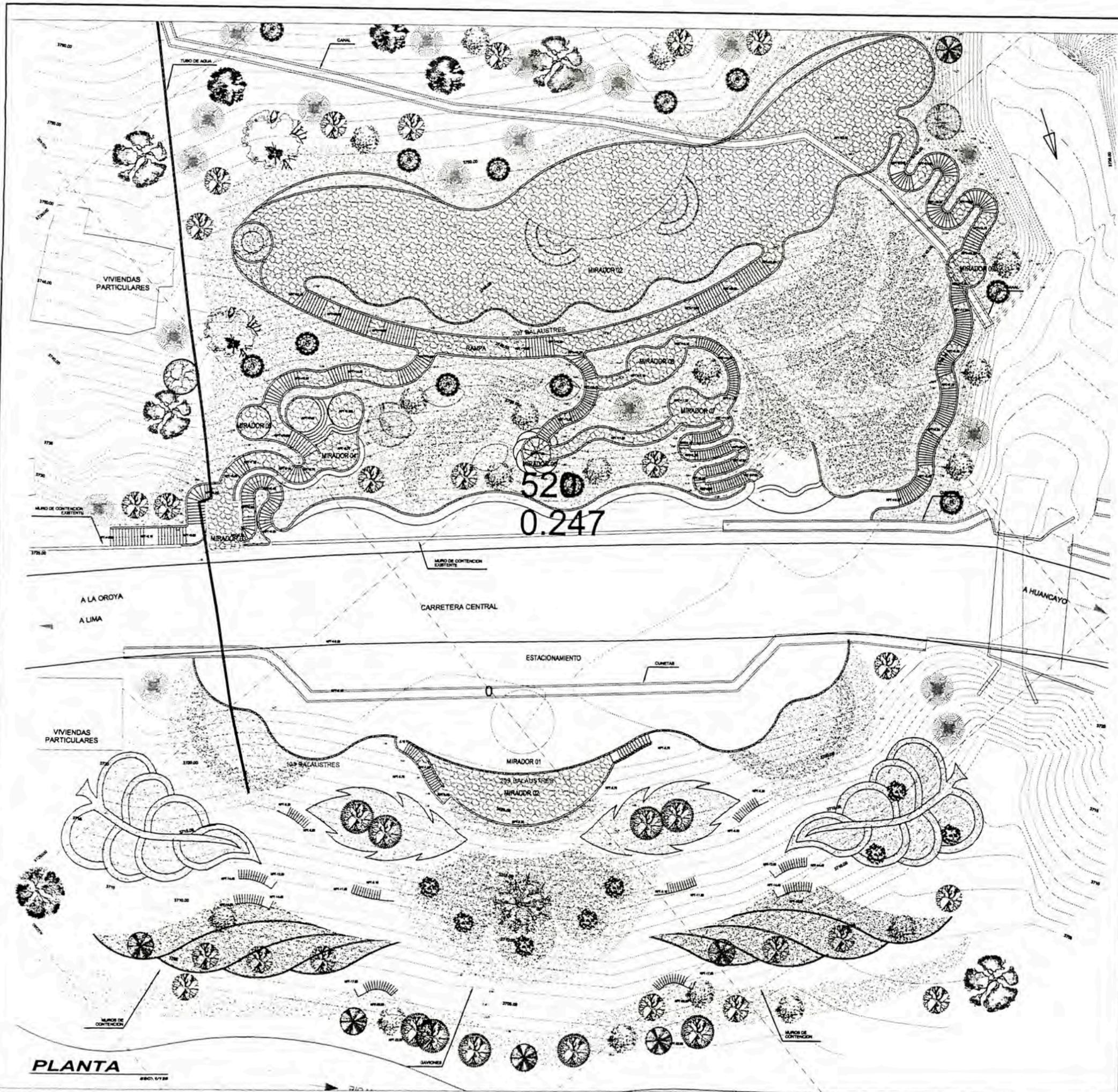
EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD DEL PROYECTO "ESCALINATAS, MUROS DE CONTENCIÓN Y FORESTACION EN ACCESO A LA OROYA"

PLANO: PLANO TOPOGRAFICO

UBICACION : CARHUASCAYÁN -LA OROYA

LAMINA: 01

DISTRITO: LA OROYA    PROV.: YAULI    ESCALA: 1/500



520  
0.247

PLANTA

TESIS: ESTABILIDAD DE TALUDES CON REFORESTACIÓN		
EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD DEL PROYECTO "ESCALINATAS, MUROS DE CONTENCION Y FORESTACION EN ACCESO A LA OROYA"		
PLANO: DISEÑO ARQUITECTONICO		
UBICACION : CARHUASCAYÁN -LA OROYA		
DISTRITO: LA OROYA	PROV.: YAULI	ESCALA: 1/400
		LAMINA: 02