



**TESINA DE SUSTENTACIÓN DE DIPLOMADO
TSD**

NOMBRE DEL DIPLOMADO

**DIPLOMADO DE GEOMECÁNICA SUBTERRÁNEA Y
SUPERFICIAL**

TITULO DE LA TESINA

**ESTABILIDAD DE TALUDES EN ZONAS TROPICALES:
ANTECEDENTES, MÉTODOS DE ANÁLISIS Y LA
APLICACIÓN DE LA BIO-INGENIERÍA PARA EL
CONTROL DE INESTABILIDADES**

ALUMNA: MAYGUALIDA MARISOL VOSS FREITES

ASESOR: ING. GUILLERMO RODRIGUEZ CAYLLAHUA

EL CALLAO, VENEZUELA, ENERO 2019

DECLARACIÓN DE LOS DERECHOS DE AUTOR

El trabajo contenido en esta tesina es de carácter de investigación documental (teórica), el cual se concentra exclusivamente en la recopilación de información y fragmentos de varios autores, informes técnicos de congresos internacionales, entre otros, los cuales, aun cuando las fuentes se han referenciado expresamente en el pie de página y algunas son de dominio público, muchos entes no pudieron ser contactados para pedir autorización de uso de sus referencias bibliográficas.

RESUMEN EJECUTIVO

El siguiente trabajo de investigación teórica sobre la estabilidad de taludes en zonas tropicales intenta de enfocar el tema en una manera resumida, desde los antecedentes y métodos de análisis conocidos hasta abordar de forma comprehensiva el uso de alternativas ecológicas para el control del movimiento de los taludes y prevenir fallas.

Para poder analizar los fenómenos del efecto de la vegetación sobre el suelo que confirma el talud, se requiere investigar las características específicas de la vegetación, en el ambiente natural que se esté estudiando. Hay factores importantes que se sugiere analizar como, por ejemplo, el tipo de clima, de vegetación y de erosión, tanto en el talud como en el área arriba del mismo, siendo unos parámetros a considerar para su estabilidad y durante la elaboración de la tesina, se intentará describir las teorías y mostrar los tipos de métodos conocidos.

Así pues, el conjunto de métodos para la estabilización de taludes que se realiza con el uso combinado de vegetación y elementos estructurales adicionales que trabajan de forma integrada, se le conoce como bioingeniería. A pesar de, y tal vez debido a, las diferencias en el enfoque y la filosofía entre la bioingeniería de suelos y otros métodos de ingeniería para abordar los problemas de estabilidad de taludes, las tecnologías de bioingeniería de suelos son especialmente apropiadas hoy en día cuando se tiene conciencia de la historia natural del proyecto, los factores ambientales (como por ejemplo las lluvias torrenciales), y la actividad productiva de conciencia ambientalmente sostenible y por supuesto la economía del sector.

Obviamente estos sistemas no pueden ser utilizados en todos los casos, especialmente en las mineras activas con voladuras diarias, pero puede resultar muy útil su uso en diques de colas, zonas abandonadas, o en minas en periodo de rehabilitación por cierre.

Palabras claves: Estabilidad de taludes, deslizamientos, suelos, meteorización, vegetación, regiones tropicales, clima, lluvias, humedad, absorción, permeabilidad, vegetación, raíces.

ABSTRACT

The following theoretical research work on The Slope Stability in Tropical Zones tries to approach the subject in a summarized way, from the historical background and known analysis methods, to comprehensively address the use of ecological alternatives for the control of the slopes movements and prevent failures.

In order to analyze the phenomena of the vegetation effect on the soil slope stability, it is necessary to investigate the specific characteristics of the vegetation, in the natural environment that is being studied. There are important factors that are suggested to analyze, such as the type of climate, vegetation and erosion, both in the slope and in the area above it, being some parameters to consider for its stability and during the preparation of the thesis, I will try to describe the theories and show the types of known methods.

Thus, the set of methods for stabilizing slopes that is made with the combined use of vegetation and additional structural elements that work in an integrated manner is known as bioengineering. Despite, and perhaps because of, the differences in approach and philosophy between soil bioengineering and other engineering methods to address slope stability problems, soil bioengineering technologies are especially appropriate today when we are aware of the project natural history, the environmental factors (such as torrential rains), and the productive activity of environmentally sustainable awareness and of course, the economy of the sector.

Obviously, these systems cannot be used in all cases, especially in active mining with daily blasting, but it can be very useful for use in tailings dams, abandoned areas, or in mines in rehabilitation period by closure.

Keywords: slope stability, landslides, soils, weathering, vegetation, tropical regions, climate, rainfall, humidity, absorption, permeability, vegetation, roots.

INDICE

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN..... | 17 |
| 2 | CAPITULO 2: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 19 |
| 2.1 | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 19 |
| 2.2 | OBJETIVOS..... | 20 |
| 2.2.1 | OBJETIVO GENERAL..... | 20 |
| 2.2.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 20 |
| 2.3 | JUSTIFICACIÓN..... | 20 |
| 2.3.1 | RELEVANCIA DEL ESTUDIO..... | 20 |
| 2.3.2 | ¿A QUIÉNES SERÍA DE UTILIDAD?..... | 21 |
| 2.3.3 | IMPACTO ACADÉMICO GRUPAL Y/O SOCIAL..... | 21 |
| 3 | CAPITULO 3: MARCO TEÓRICO..... | 22 |
| 3.1 | ANTECEDENTES..... | 22 |
| 3.1.1 | BREVE HISTORIA DE LA MECÁNICA DE ROCAS..... | 22 |
| 3.1.2 | ESTABILIDAD DE TALUDES Y CONTROL DE LA EROSIÓN: BREVE HISTORIA DE LA BIOINGENIERÍA..... | 38 |
| 3.2 | PARADIGMA. VISIÓN HOLÍSTICA – SISTEMA DE LA COMPRENSIÓN DE LA SITUACIÓN..... | 44 |
| 3.3 | INTRODUCCIÓN..... | 45 |
| 3.4 | LAS ZONAS TROPICALES..... | 46 |
| 3.4.1 | LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS TROPICALES..... | 46 |
| 3.4.2 | EL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE KÖPPEN-GEIGER PARA CLIMAS TROPICALES..... | 48 |
| 3.4.3 | HORIZONTES TROPICALES COMUNES..... | 54 |
| 3.5 | CARACTERIZACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS..... | 62 |
| 3.5.1 | NOMENCLATURA DE UN TALUD O LADERA..... | 63 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 3.5.2 | NOMENCLATURA DE LOS PROCESOS DE MOVIMIENTO | 64 |
| 3.5.3 | DIMENSIONES | 66 |
| 3.5.4 | ETAPAS EN EL PROCESO DE FALLA | 67 |
| 3.5.5 | PROCESOS EN LA ETAPA DE DETERIORO | 68 |
| 3.5.6 | CLASIFICACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA | 71 |
| 3.5.7 | CARACTERIZACIÓN DEL MOVIMIENTO | 77 |
| 3.5.8 | MOVIMIENTOS POST-FALLA | 81 |
| 3.5.9 | EVOLUCIÓN O PROCESO DE FALLA | 82 |
| 3.6 | TEORIA DEL PRINCIPIO DE LA INESTABILIDAD DE TALUDES | 85 |
| 3.6.1 | ESTABILIDAD DE TALUDES - ANTECEDENTES..... | 86 |
| 3.6.2 | METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES | 88 |
| 3.6.3 | MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES..... | 94 |
| 4 | CAPITULO 4: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN | 103 |
| 4.1 | REVISIÓN LITERARIA NECESARIA PARA LA CONSECUCCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN – AUTORES | 104 |
| 4.2 | INTRODUCCIÓN | 105 |
| 4.3 | METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN INTEGRAL DE LOS SUELOS RESIDUALES..... | 106 |
| 4.4 | EL PROCESO DE METEORIZACIÓN..... | 108 |
| 4.4.1 | ETAPAS DEL PROCESO DE METEORIZACIÓN..... | 109 |
| 4.4.2 | MINERALES RESULTANTES..... | 110 |
| 4.4.3 | EFECTO DEL CLIMA | 110 |
| 4.4.4 | OTROS FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE METEORIZACIÓN..... | 111 |
| 4.4.5 | MEDICIÓN DEL GRADO DE METEORIZACIÓN..... | 112 |
| 4.5 | MICROESTRUCTURA DE LOS SUELOS RESIDUALES | 114 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 4.6 | ESTRUCTURA DE LOS SUELOS RESIDUALES | 114 |
| 4.7 | PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SUELOS RESIDUALES..... | 116 |
| 4.7.1 | RESISTENCIA AL CORTANTE..... | 116 |
| 4.7.2 | VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTANTE..... | 117 |
| 4.7.3 | LA COHESIÓN | 119 |
| 4.7.4 | ÁNGULO DE FRICCIÓN | 119 |
| 4.7.5 | LA ENVOLVENTE DE FALLA | 119 |
| 4.7.6 | FACTORES QUE AFECTAN EL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN | 120 |
| 4.7.7 | PERMEABILIDAD Y FLUJO DE AGUA..... | 122 |
| 4.7.8 | COMPRESIBILIDAD | 124 |
| 4.7.9 | COMPACTACIÓN | 125 |
| 4.7.10 | ENSAYOS EN SUELOS RESIDUALES..... | 125 |
| 4.7.11 | DEPENDENCIA DEL FACTOR AGUA..... | 125 |
| 4.8 | CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS TROPICALES | 126 |
| 4.9 | CARACTERIZACIÓN DEL PERFIL DE SUELOS RESIDUALES | 126 |
| 4.10 | PERFILES DE METEORIZACIÓN Y DESLIZAMIENTOS DE LOS TALUDES EN ALGUNOS SUELOS RESIDUALES..... | 129 |
| 4.11 | ESTABILIZACIÓN DE TALUDES Y LOS SISTEMAS DE BIOINGENIERÍA..... | 135 |
| 4.11.1 | ANÁLISIS DE ESTABILIDAD | 136 |
| 4.11.2 | LA INFLUENCIA DE LA VEGETACIÓN EN LA ESTABILIDAD DEL SEGMENTO DE UN TALUD | 139 |
| 4.11.3 | MECANISMO DE ANCLAJE DE LA RAÍZ EN UN TALUD DE SUELO | 141 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 4.11.4 | EFFECTO DE LA VEGETACIÓN EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES A TRAVÉS DEL EFECTO EN LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO | 145 |
| 4.11.5 | SISTEMAS DE BIOINGENIERÍA DE SUELOS | 150 |
| 4.11.6 | ESTABILIDAD DE TALUDES USANDO VEGETACIÓN - TÉCNICAS Y APLICACIONES..... | 155 |
| 4.12 | LIMITACIONES DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN VEGETAL Y COSTOS..... | 171 |
| 4.12.1 | LIMITACIONES..... | 171 |
| 4.12.2 | COSTOS..... | 171 |
| 5 | CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 174 |
| 5.1 | CONCLUSIONES | 174 |
| 5.2 | RECOMENDACIONES..... | 175 |
| | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 176 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 176 |
| | GLOSARIO DE TÉRMINOS | 179 |
| | ANEXOS | 182 |

INDICE DE CUADROS

| | | |
|-----------|---|-----|
| Cuadro 1: | Métodos de prevención de deslizamientos (Fuente: UNI) | 95 |
| Cuadro 2: | Métodos de elusión de amenazas (Fuente: UNI) | 96 |
| Cuadro 3: | Métodos de control (Fuente: UNI) | 96 |
| Cuadro 4: | Sistemas para lograr un equilibrio de masas (Fuente: UNI) | 97 |
| Cuadro 5: | Sistemas de recubrimiento de superficie (Fuente: UNI) | 98 |
| Cuadro 6: | Sistemas que tienen a controlar el agua y sus efectos (Fuente: UNI) | 98 |
| Cuadro 7: | Estructuras de contención (Fuente: UNI) | 99 |
| Cuadro 8: | Métodos de mejoramiento del suelo (Fuente: UNI) | 100 |

| | |
|---|-----|
| Cuadro 9: Efectos de la vegetación en la estabilidad de taludes (Fuente: Morgan & Rickson, 1995)..... | 136 |
|---|-----|

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: a) Minería de cobre El Chino, México b) Minería de carbón, El Cerrejón, Colombia C) Cantera de áridos de Hanson, España D) Cantera de Mármol de Carrara, Italia (Fuente: ver Ítem) | 31 |
| Figura 2: Infraestructura básica requerida en una típica mina subterránea. (Fuente: Altas Copco) | 32 |
| Figura 3: a) Talud de acceso para autovías, España, (Fuente: ICEACSA Grupo). b) Excavación de túnel para vías, Colombia, (Fuente: ANI.gov.co.). c) Sostenimiento de un talud gutinado y anclado, (Fuente: Perybras). d) Represa cimentada en roca de Contreras, España, (Fuente: ver ítem abajo)..... | 34 |
| Figura 4: Esquema de ingeniería de petróleo. (Fuente: Ramírez y Monge)..... | 35 |
| Figura 5: Piscina subterránea en Finlandia (Fuente: Departamento de urbanismo, Helsinki). b) Túnel de almacén nuclear en Onkalo, Finlandia. (Fuente: Jussi Partanen) | 36 |
| Figura 6: China 28 a. C. Agrupando tallos vivos para uso en ribera y reparación de diques. (Fuente: Kevin Finney) | 39 |
| Figura 7: Europa a principios del siglo XX. Corte y recogida de tallos vivos para bioingeniería de suelos. (Fuente: Kevin Finney) | 40 |
| Figura 8: Instalación de fajinos vivos en los años 30. (Fuente: USDA) | 42 |
| Figura 9: Libro de Hugo Schiechtl. (Fuente: Amazon.com)..... | 43 |
| Figura 10: Cinco líneas de latitud dan la vuelta al mundo como se muestra aquí en una imagen de Apolo de la Tierra con una vista del hemisferio occidental (Fuente: NASA Goddard Space Flight Center), de fecha 9 de septiembre de 1997. Las alturas de las montañas y las profundidades de los valles fueron exageradas por 50 veces de sus niveles reales de modo que el relieve vertical sea visible. | 47 |
| Figura 11: Selva tropical, zona climática Af , en Surinam (Fuente: Voormeij, 2016)..... | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 12: Selva tropical, zona climática Af , en Surinam (Fuente: Voormeij, 2016) | 49 |
| Figura 13: Mapa de clasificación climática mundial de Köppen-Geiger para climas húmedos tropicales: Selva Tropical, Af (Fuente: Kottek et al (2006)) ... | 49 |
| Figura 14: Selva de monzón tropical, zona climática Am , en Filipinas (Fuente: Turner et al (2011)). | 50 |
| Figura 15: Mapa de clasificación climática mundial de Köppen-Geiger para climas húmedos tropicales: Selva Tropical, Am (Fuente: Kottek et al (2006)). | 51 |
| Figura 16: Zona climática Aw , suroeste de Uganda (Fuente: Voormeij, 2016). | 51 |
| Figura 17: Mapa de clasificación climática mundial de Köppen-Geiger para climas húmedos tropicales: Selva Tropical, Aw (Fuente: Kottek et al (2006)) .. | 52 |
| Figura 18: Distribución promedio de precipitación mensual (en mm totales) en una mina en Filipinas, en base a los datos recogidos en cinco estaciones separadas en más de dos años. La alta precipitación global de mayo se relaciona con una sola tormenta tropical, cuando 240 mm se vertieron en un solo día (Fuente: Voormeij, 2016). | 53 |
| Figura 19: Número de días secos en promedio por mes en una mina en Filipinas, que retrata mejor la estacionalidad que el trazado de las precipitaciones. Picos más altos presentan la estación seca, los picos bajos la estación húmeda (Fuente: Voormeij, 2016). | 53 |
| Figura 20: Distribución mundial de regolita profundamente meteorizada: en las áreas sombreadas, la meteorización profunda se presenta esporádicamente (Fuente: Smith et al 1997)..... | 54 |
| Figura 21: La tierra roja es un rasgo característico de los paisajes tropicales, Sureste de Liberia (Fuente: Voormeij, 2016)..... | 55 |
| Figura 22: Suelos superficiales marrón oscuro encima de laterita amarillo-marrón en este perfil en América Central. La zona roja en la base de la fosa es saprolita. (Fuente: Voormeij, 2016). | 56 |
| Figura 23: Perfiles de regolita estudiados en la literatura, que proporcionan espesores de las zonas (Fuente y compilación de: D. Voormeij)..... | 62 |
| Figura 24: Nomenclatura de taludes y laderas (Fuente: Suárez, 1998) | 63 |
| Figura 25: Nomenclatura de un deslizamiento. (Fuente: Suárez, 1998) | 64 |

| | |
|--|----|
| Figura 26: Dimensiones de los movimientos en masa de acuerdo a IAEG Commission on Landslides (1990). (Fuente: Suárez, 1998) | 66 |
| Figura 27: Procesos de deterioro en macizos rocosos (Fuente: Nicholson y Hencher ,1997). | 71 |
| Figura 28: Caídas (Fall, Rockfall) (Fuente: Jan Novotný, según Vernes 1978). | 73 |
| Figura 29: Volcamientos (Topples) (Fuente: Jan Novotný, según Vernes 1978). | 73 |
| Figura 30: Deslizamientos (Slides) a) Deslizamientos rotacionales, b) deslizamientos traslacionales, c) deslizamientos de bloques. (Fuente: Jan Novotný, según Vernes 1978)..... | 74 |
| Figura 31: Corrimiento lateral (lateral spreads) (Fuente: Jan Novotný, según Vernes 1978)..... | 75 |
| Figura 32: Flujo de escombros (Debris flow) (Fuente: Jan Novotný, según Vernes 1978)..... | 76 |
| Figura 33: a) Avalancha de escombros, b) flujos de tierra (Debris avalanche, earthflow) (Fuente: Jan Novotný, según Vernes 1978). | 76 |
| Figura 34: Arrastramiento (Creep) (Fuente: Jan Novotný, según Vernes 1978). | 77 |
| Figura 35: Inclinaciones sencillas y múltiples (Fuente: J. Suárez, de Cruden, Vernes 1996)..... | 80 |
| Figura 36: Falla progresiva o deformaciones con el tiempo, de un talud en arcilla al realizar un corte, analizada por elementos finitos (Fuente: J. Suárez desde Leroueil y otros 1996). | 84 |
| Figura 37: Evolución de un deslizamiento en roca fracturada al profundizarse un cauce por erosión permanente. (Fuente: Suárez, 1998)..... | 85 |
| Figura 38: Típica superficie de deslizamiento circular/rotacional (Fuente: Victor Yeung) | 86 |
| Figura 39: Fuerzas que actúan sobre una dovela en los métodos de dovelas (Fuente: Suárez, 1998) | 90 |
| Figura 40: Diagrama que muestra el tipo de modelo que se recomienda utilizar de acuerdo con la complejidad de los movimientos (Stead y otros, 2006)..... | 94 |

| | |
|--|-----|
| Figura 41: Tipos de deslizamiento en suelos residuales (Fuente: Deere y Patton 1971)..... | 106 |
| Figura 42: Etapas en la formación de torres (Tors) de granito bajo condiciones húmedas de meteorización en un medio tropical. (Fuente: Suárez, 1998) | 111 |
| Figura 43: Relaciones entre el grado de meteorización y el índice de rebote del martillo de Schmidt. (Fuente: Suárez, 1998)..... | 113 |
| Figura 44: Efecto de las discontinuidades en la falla de los taludes. (Fuente: Suárez, 1998)..... | 115 |
| Figura 45: Variación de cohesión y el ángulo de fricción dentro de una discontinuidad por el aumento de la humedad y de la presión de poros. (Fuente: Suárez, 1998)..... | 118 |
| Figura 46: Envolvente real de falla para suelos residuales de granitos en superficies someras (Brand, 1985) | 120 |
| Figura 47: Ascenso rápido del nivel de agua en una sola lluvia en los granitos descompuestos de Hong Kong (Brand 1985). | 123 |
| Figura 48: a) Avance del frente de humedad en suelos residuales. (Fuente: Suárez, 1998) b) Modelo de bloques del flujo de agua subterránea en la regolita laterita (Fuente: Voormeij, 2016)..... | 124 |
| Figura 49: Relación entre la relación de vacíos y la precipitación en un granito altamente meteorizado y lavado, en Suráfrica. (Bligth 1997)..... | 126 |
| Figura 50: Perfil de regolita idealizada de Uganda (Fuente: Voormeij, 2016) | 127 |
| Figura 51: Perfil de meteorización en materiales de origen Igneo-Metamórfico. (Fuente: Suárez, 1998) | 130 |
| Figura 52: Fallas en perfiles de granito meteorizado de diferente pendiente. (Fuente: Suárez, 1998) | 130 |
| Figura 53: Perfil general de meteorización en materiales de origen sedimentario (Fuente: Suárez, 1998) | 131 |
| Figura 54: Deslizamientos en intercalaciones de Areniscas y Lutitas (Fuente: Suárez, 1998)..... | 132 |
| Figura 55: Deslizamientos en suelos residuales de Calizas (Málaga-Colombia) (Fuente: Suárez, 1998) | 133 |
| Figura 56: Fallas en materiales de origen volcánico (Fuente: Suárez, 1998) | 134 |

| | |
|--|-----|
| Figura 57: Deslizamientos en taludes verticales de suelos aluviales (Fuente: Suárez, 1998)..... | 135 |
| Figura 58: Tipos de movimientos de masa (Skempton & Hutchinson, 1969) . | 138 |
| Figura 59: Plano de traslación de deslizamiento/falla (Barnes 2000)..... | 138 |
| Figura 60: Análisis de arco circular (Barnes, 2000)..... | 139 |
| Figura 61: Influencia hidromecánica en la estabilidad de taludes (Greenway 1987)..... | 140 |
| Figura 62: Modelos sencillos; a) equilibrio límite; b) refuerzo flexible; c) modelo de cable (Tobias 1995) | 143 |
| Figura 63: Envolvente de falla de Mohr-Coulomb extendido para suelos insaturados (Fredlund y Morgenstern 1978) | 147 |
| Figura 64: Línea de intercepciones a lo largo del plan de fallas en el τ versus el plano $(u_a - u_w)$ (Fredlund y Morgenstern 1978) | 148 |
| Figura 65: Proyección horizontal de las curvas de nivel de la envolvente de falla contra τ $(\sigma - u_a)$ (Fredlund y Morgenstern 1978) | 148 |
| Figura 66: Sistemas de bioingeniería de suelos: (a) fajina viva; (b) colchón; (c) pinceles; (d) embalaje de ramas; (e) gavión blando vivo. Las hojas y las raíces no son representativas de la condición en el momento de la instalación (Robbin B.Sotir & Assoc.) | 152 |
| Figura 67:Tipos de raíz (Fuente: Suárez, 1998)..... | 153 |
| Figura 68: Combinación de un muro de contención con vegetación para la estabilización de taludes, a = superficie de deslizamiento profundo; b = superficie de deslizamiento superficial. (Fuente: Morgan & Rickson) | 154 |
| Figura 69: Empaque de ramas (Branch packing) (Fuente: USDA, 2000) | 156 |
| Figura 70: Capas de cepillos (Brush layering) (Fuente: USDA, 2000) | 157 |
| Figura 71: Colchón de cepillos (Brush Mattress) (Fuente: USDA, 2000) | 159 |
| Figura 72: Rollo de fibra de coco (Coconut Fiber Roll) (Fuente: USDA, 2000) | 160 |
| Figura 73: Siembra conjunta (Joint Planting) (Fuente: USDA, 2000) | 161 |
| Figura 74: Muro de cuna vivo o Live Cribwall (Fuente: USDA, 2000) | 162 |
| Figura 75: Fajinas vivas o Live Fascines (Fuente: USDA, 2000) | 163 |
| Figura 76: Postes vivos o Live Posts (Fuente: USDA, 2000) | 164 |

| | |
|---|-----|
| Figura 77: Estacas vivas o Live Stakes (Fuente: Suárez, 1998) | 165 |
| Figura 78: Geomalla de vegetación o Vegetated Geogrid (Fuente: USDA, 2000) | 167 |
| Figura 79: Muros de gaviones blandos con vegetación (Fuente: NCHRP, 2012) | 168 |
| Figura 80: Muros de roca con vegetación (Fuente: Keller & Sherar 2003) | 169 |
| Figura 81: Perfiles de costos para el uso de bioingeniería y estructuras inertes para la estabilización de taludes (después de Coppin y Richards, 1990). | 172 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1: Clasificación de los movimientos de masa en taludes (Resumen desde Varnes, 1978, traducido 2019) | 72 |
| Tabla 2: Metodologías utilizadas en los análisis convencionales de estabilidad de taludes. (Fuente: ver Ítem ¹¹⁹) | 89 |
| Tabla 3: Factor de seguridad según el grado de estabilidad de taludes (Fuente: J. Ale Véliz) | 91 |
| Tabla 4: Métodos de análisis de estabilidad de taludes. (Fuente: ver Ítem)..... | 92 |
| Tabla 5: Resumen de los métodos de análisis de estabilidad de taludes para diferentes tipos de deslizamiento o falla. (Fuente: CGI)..... | 93 |
| Tabla 6: Factores seguridad recomendados por tipo de caso (Fuente: UNI) . | 100 |
| Tabla 7: Metodología para caracterización de un suelo residual (Fuente: Suárez, 1998)..... | 107 |
| Tabla 8: Tipos generales de minerales en los suelos residuales (Fuente: Suárez, 1998)..... | 108 |
| Tabla 9: Medición del grado de descomposición de feldespatos mediante el ensayo de arenosidad. (Fuente: Suárez, 1998) | 112 |
| Tabla 10: Permeabilidad de perfiles de meteorización en rocas ígneas y metamórficas (modificado de Deere y Patton, 1971) | 122 |
| Tabla 11: Sistema de clasificación del perfil de meteorización empleado en Hong Kong (Oficina de control geotécnico, 1979) | 128 |
| Tabla 12: Influencia hidromecánica en la estabilidad de taludes (Greenway, 1987)..... | 141 |

Tabla 13: Resumen de sistemas de bioingeniería (Fuente: Morgan & Rickson, 1995)..... 151

Tabla 14: Características de los grupos de plantas (Fuente: Morgan& Rickson, 1995)..... 154

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Landslide classification by Varnes (1978) and Cruden and Varnes (1996) based on the type of movement and material. (Fuente: Research Gate).
..... 182

Anexo 2: Velocidad de los movimientos (Adaptado de Cruden, Varnes 1996)
..... 183

Anexo 3: Deformaciones de pre-falla en el deslizamiento de “Les grandes murailles” en Francia (Leroueil y otros 1996)..... 183

Anexo 4: Métodos de análisis de estabilidad de taludes (Fuente: Suárez, 1998)
..... 184

Anexo 5: Programas de software y aplicaciones para análisis de estabilidad de taludes. (Fuente: S. Azimi 2016).
..... 185

Anexo 6: Resultados de un análisis modal micro-petrográfico (Irfan – 1988) 189

Anexo 7: Características de algunos de los suelos tropicales, clasificados de acuerdo a la FAO (Wesley, 1988) 189

Anexo 8: Sistema de clasificación de suelos residuales (Wesley, 1997) 190

Anexo 9: Valor experimental de ϕ^b (Fredlund and Morgenstern 1978) 191

Anexo 10: Empaque de ramas (Branch packing) (Fuente: USDA, 2000) 191

Anexo 11: Capas de cepillos con estacas vivas (Brush layering) (Fuente: Sotir para NCHRP, 2012) 192

Anexo 12: Colchón de cepillos (Brush Mattress) (Fuente: Sotir & Associates para USDA, 2000) 192

Anexo 13: Rollo de fibra de coco (Coconut Fiber Roll) (Fuente: Aussie Environmental, 2019) 193

Anexo 14: Siembra conjunta (Joint Planting) (Fuente: Sotir & Associates para USDA, 2000) 193

| | |
|---|-----|
| Anexo 15: Muro de cuna vivo o Live Cribwall (Fuente: Keller para NCHRP & USDA)..... | 194 |
| Anexo 16: Fajinas vivas o Live Fascines (Fuente: Keller para NCHRP, 2012) | 194 |
| Anexo 17: Arboles utilizados para cercas vivas y estabilización de taludes (CDMB 1989) (Fuente: Suárez, 1998) | 195 |
| Anexo 18: Estacas vivas o Live Stakes (Fuente: Sotir & Associates for USDA, 1992)..... | 195 |
| Anexo 19: Geomalla de vegetación o Vegetated Geogrid (Fuente: Naue Geosynthetics, 2019) | 196 |
| Anexo 20: Mantillo (Mulching) (Fuente: USDA, 2000)..... | 196 |
| Anexo 21: Distribución de semillas y fertilizante. (Fuente: USDA, 2000) | 197 |

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

Las actividades de excavaciones a cielo abierto como ejemplo la minería aurífera, se pueden encontrar en ciertas regiones situadas en la zona tropical. Estas regiones experimentan climas cálidos y húmedos, con pronunciados y predecibles cambios entre humedad y estaciones secas, con lo que se ha hecho necesario que se clasifiquen diferentes sistemas climáticos que se basan en la distribución de la vegetación, medias anuales de temperatura y precipitación, estacionalidad y sismicidad, cuyas influencias dejan a los terrenos muy susceptibles a sufrir problemas de inestabilidad. Si naturalmente un terreno en la zona tropical esta ya influenciado por la topografía, la meteorización y las lluvias, pudiendo derivar en deslizamientos naturales, hay que agregar el factor que luego de una excavación minera, que quita la cobertura vegetal, expone a más riesgo dichos terrenos al colapso, aumentado por el proceso de deterioro en consecuencia de la exposición a los factores ambientales comunes de estas zonas.

Las técnicas de excavación incontrolada y la aplicación de diseños "estándar" pueden dejar una serie de taludes inestables. Algunos de estos taludes representan un alto riesgo para las estructuras y la comunidad circundantes. Por lo tanto, se requiere investigación geológica y geotécnica para identificar los peligros y riesgos de la inestabilidad de los taludes y proponer medidas inmediatas si es necesario. Se requieren técnicas de investigación eficaces para adquirir información suficiente de los taludes críticos y clasificarlos en clases de riesgo apropiadas.¹ La clasificación adecuada de los taludes es crucial ya que permitirá priorizar los trabajos de remediación para los taludes más críticos.

La forma de evitar los deslizamientos masivos de taludes utilizando técnicas sostenibles y ecológicamente racionales se está convirtiendo rápidamente en un dominio científico, los denominados métodos de bioingeniería de terrenos, integran técnicas de ingeniería civil con materiales naturales para obtener métodos rápidos, efectivos y económicos de protección, restauración y mantenimiento de taludes.

¹ Tomado y traducido de: *Geomorphological Approach for Assessment of Slope Stability and Landslide Hazard Mapping* by Sim, Ong & Bachat.

El uso de la vegetación por parte de ingenieros civiles cuando se trata de taludes inestables se ha vuelto cada vez más popular en los últimos 20 años. La vegetación es una de las tecnologías alternativas en la prevención de la prevención de deslizamientos de tierra poco profundos que ocurre principalmente durante la temporada de lluvias. En particular, los árboles y los arbustos leñosos se han estudiado con respecto a las propiedades de refuerzo del suelo que sus sistemas de raíces transmiten a los taludes sujetos a problemas de erosión o deslizamiento.

Si las características del sistema de raíces, que gobiernan la estabilización del suelo, pudieran identificarse mejor, la selección de especies adecuadas para su uso en taludes inestables sería más eficiente. La vegetación ha sido reconocida como un factor útil para aumentar la resistencia al cizallamiento del suelo en un talud inestable.²

² Tomado y traducido de: "The Use of Vegetation to Improve Slope Stability". *International Conference*

CAPITULO 2: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En una zona tropical la estabilidad de taludes es especialmente complicada debido a que la mayoría de los suelos son residuales, el régimen hidrológico complejo, la humedad ambiental y la temperatura muy altas, la geología compleja, la topografía escarpada y los demás factores ambientales son desfavorables generalmente.

La mayor parte de las teorías y desarrollos en la geotécnica han tenido su origen en trabajos realizados sobre suelos en climas no tropicales, generalmente, en depósitos de suelos sedimentarios especialmente, arenas y arcillas y por lo tanto están condicionados al comportamiento de ese tipo de suelos. La aplicabilidad de las teorías y los criterios de diseño geotécnico que existen actualmente, podría no ser completamente válida en el caso de suelos residuales, debido a diferencias importantes que existen en la constitución y estructura de los suelos y de las formaciones residuales, y las de los suelos que sirvieron de modelo para el desarrollo de la mecánica de suelos tradicional. La caracterización de un suelo residual debido a su heterogeneidad, requiere de un análisis integral que tenga en cuenta todos los factores que afectan su comportamiento, lo cual incluye el grado y proceso de meteorización, su mineralogía, microestructura, discontinuidades, estado de esfuerzos, propiedades mecánicas, clasificación y caracterización del perfil.³

Entonces, considerando que el agua producto de las intensas lluvias tropicales es el factor determinante en la consecución de un deslizamiento en este tipo de terrenos, el mismo se ve aumentado en proporciones importantes ante la ausencia de la vegetación.

El estudio del efecto de la vegetación sobre la estabilidad de taludes lo considero de carácter crítico, dado que tiende a determinar el contenido de agua en la superficie y que, gracias a la consistencia del entramado de las raíces, mientras que necesitan el vital líquido para vivir, actúan como un secante del agua en el suelo, pudiendo reforzarlo y aumentar la resistencia al corte, además de otras

³ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

características de la aplicación de la Bioingeniería que quisiera investigar a fondo y exponerlas en el siguiente proyecto de Tesina.

2.2 OBJETIVOS

2.2.1 OBJETIVO GENERAL

Enfatizar la importancia del entendimiento de la interacción entre el tipo de zona climática donde se ubicaría un proyecto minero, el impacto humano de la excavación y como tratar los problemas específicos de estabilidad utilizando métodos alternativos ecológicos gracias al campo de la Bioingeniería.

2.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proveer información de investigación sobre la caracterización de las zonas tropicales, tipo de suelo y perfiles de meteorización, desde la nomenclatura básica hasta la evolución de un proceso de falla.
- Dar una mirada general de los métodos de análisis estabilidad de taludes.
- Investigar sobre el uso de la bioingeniería para prevenir inestabilidades en los taludes.

2.3 JUSTIFICACIÓN

2.3.1 RELEVANCIA DEL ESTUDIO

Todas las fases de investigación han de desarrollarse para obtener el mejor conocimiento posible de las características resistentes del terreno. A partir del conocimiento se pueden obtener una serie de datos que permiten deducir la respuesta del terreno a través del tiempo o ante una obra determinada.

La investigación ha de permitir la discretización del terreno en zonas homogéneas, determinando los valores de los parámetros característicos que rigen su comportamiento.⁴

Entonces proporcionar información necesaria haciendo una discreción por zona climática, en este caso las zonas tropicales, puede ayudar a prever el

⁴ Tomado de: "Geotecnia para el trópico andino", Escobar y Duque.

comportamiento de los terrenos a los factores ambientales a los cuales se está sujetos en estos lugares.

Se podría enfocar en hacer análisis de estabilidad de taludes naturales o artificiales, elaborar hipótesis de roturas de un talud, para adecuar el tipo de estabilización, pero sería un tema demasiado extenso o casi infinito para esta oportunidad, por lo que se enfocará en dar una idea general de dicho tema.

2.3.2 ¿A QUIÉNES SERÍA DE UTILIDAD?

Este proyecto de investigación podría resultar útil para todos los niveles de la ingeniería mecánica y geotécnica, para académicos, empresas de ingeniería civil, de carreteras, hidroeléctricas, minería, zonas rurales, etc.

2.3.3 IMPACTO ACADÉMICO GRUPAL Y/O SOCIAL

Esta herramienta de tesina que es de carácter académico, podría resultar de interés para mejorar los conocimientos de alternativas ecológicas, haciendo uso de los recursos existentes naturales, así como también promover la investigación científica en el ámbito de la bioingeniería, con diseños avanzados de sostenimiento, utilizando como base elementos biológicos, y quizás dar una luz sobre los trabajos de modificación genéticas, por ejemplo, de plantas más eficaces con raíces más largas y resistentes, que ya se están implementando a nivel mundial.

CAPITULO 3: MARCO TEÓRICO

3.1 ANTECEDENTES

3.1.1 BREVE HISTORIA DE LA MECÁNICA DE ROCAS

La humanidad ya extraía minerales hace 40.000 años. Los romanos eran capaces de mover millones de toneladas para extraer oro con leyes similares a las actuales, aunque sus escritos, como el “Lapidario” de Plinio el Viejo, iban más dirigidos a la identificación y clasificación de las sustancias que a su tratamiento y obtención.

Parece ser que el primer documento escrito de la Edad Moderna que tiene relación con la mecánica de rocas es el libro en latín de red metálica de George Agrícola (1556), que representa el espíritu del renacimiento aplicado al noble arte de la extracción de metales y donde ilustrando una figura sobre el sostenimiento con madera indica para evitar que una porción del cuerpo de la montaña caiga y por su tamaño impide el paso de personas que entren y salgan... (Hood y Brown, 1999).

La primera obra en castellano que trata de minería fue Artes de los Metales en que se enseña el verdadero beneficio de los de oro y plata por azogue y que data de 1640, y fue escrita por el licenciado Alonso de Barba. Aunque no trata específicamente el laboreo de minas y realiza algunas consideraciones sobre la dureza y variedad de las rocas y su tratamiento. Como por ejemplo tanto del enfoque técnico como de la prosa y espíritu de la época y su autor, se cita en el siguiente párrafo.

La minería fue pues donde nació y se desarrolló durante la edad moderna y contemporánea el estudio del comportamiento del terreno, El término en inglés “strata control” a veces traducido como control de estratos (propio de la minería de carbón), ya indica que se trataba no sólo de estudiar la roca intacta sino de algo de mayor tamaño. El término alemán “Erzgebirge” proviene de la palabra (montañas de mena o mineral) muy propio de las montañas del Harz, cuna de la minería moderna y de George Agrícola.⁵

⁵ Tomado de: “Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes”. Ramírez y Monge.

Así, durante los siglos XVI y XIX la mecánica de rocas estuvo indisolublemente unida al laboreo de minas, en el que la mayor parte de los textos clásicos incluyen un apartado de ademes de minas, lo que hoy conocemos por sostenimiento. Así se pueden encontrar algunos párrafos precursores de esta disciplina en el libro “Manual de Laboreo de Minas” de Francisco de P. Hermosa (1907).

Sin embargo, no fue hasta después del final de la Segunda Guerra Mundial, con una Europa en reconstrucción, con enormes necesidades de materias primas y con un aumento significativo en la construcción de infraestructuras cada vez más complicadas y grandes y una América con gran crecimiento económico, que se crea un caldo de cultivo adecuado para el nacimiento de la mecánica de rocas como que comienza a aparecer en los cincuenta a partir de sus bases científicas y se va convirtiendo en una disciplina a lo largo de los sesenta.

En minería, los primeros estudios rigurosos relacionados con la mecánica de rocas, denominada entonces control de estratos como aparecen principalmente con motivo de los problemas planteados por los movimientos producidos en la superficie y en todo el terreno por las exploraciones subterráneas de carbón en Europa, el congreso dedicado a este tema que se celebró en Lieja Bélgica en 1951 se puede considerar como el primero de lo que hoy conocemos propiamente como mecánica de rocas.

Probablemente el origen lingüístico de nuestra disciplina se ha debido al ingeniero francés J. Talobre, quien trabajó para la empresa eléctrica “Electricité de France” en la construcción de túneles para el transporte de agua a presión, siendo su libro “La mécanique des roches” 1956, la primera aparición pública del término posteriormente traducido como mecánica de rocas.

Al desarrollo de la mecánica de rocas contribuyó no poco la nueva definición del concepto de mineral de la escuela de Minas de Colorado en los años 50, (sustancia cuya explotación origina un beneficio) y que fue paulatinamente llevando a enormes explotaciones mineras muy mecanizadas, y que querían por tanto grandes inversiones iniciales. Lógicamente los grandes capitales que se invertían necesitaban que se asegurara para que la explotación era viable técnicamente.⁶

⁶ Tomado de: “Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes”. Ramírez y Monge.

En esta situación la mecánica de rocas como tanto en sus aplicaciones mineras como en ingeniería civil, comenzó a florecer en los años sesenta. Así en 1963 nació la sociedad internacional de mecánica de rocas, localizada en el laboratorio Nacional de Ingeniería Civil en Lisboa y organizada por Manuel Rocha, experto en cimentaciones de presas. En estos años el énfasis se puso en el comportamiento de la roca intacta y no pocos adelantos fueron producidos por el equipo del profesor Fairhurst, del departamento de ingeniería civil de la Universidad de Mineápolis. Estos y otros avances llevaron a la publicación de uno de los primeros libros generales de esta disciplina “Fundamental of Rock Mechanics” en 1969 escrito por J.C. Jagger (matemático e ingeniero) & N.G.W Cook (sismólogo ingeniero de minas) que para muchos es el libro seminal de la mecánica de rocas nacido de la simbiosis entre la capacidad teórica del primero de los autores y el conocimiento de la realidad práctica en la muy profunda minería de oro sudafricana del segundo.

En los años setenta el énfasis se puso en el papel de las discontinuidades y de la estructura del macizo rocoso y en su aplicación práctica en la ingeniería de taludes, con el liderazgo tecnológico de la Royal School of Mines en el Imperial College de Londres, donde coincidieron en esas fechas E. Hoek, E.T. Brown y J.W. Bray entre otros. Fruto de este énfasis como se publica en 1974 Rock slope engineering escrito por Hoek y Bray como primer libro que abordó como desde una perspectiva técnica y general el diseño de taludes de roca. También en estos años se desarrollaron las primeras clasificaciones geomecánicas (RMR de Bieniawski y la Q de Barton, a mediados de los setenta), que supusieron un salto cualitativo que ha simplificado el diseño de excavaciones subterráneas y que aún ahora sigue siendo la base del diseño del 80% de las excavaciones que se realizan en el mundo.⁷

En los años 80 el énfasis se centró de los macizos rocosos, y los primeros años vieron nacer tal vez el último de los libros primordiales de esta disciplina “Underground Excavations in Rock” (1980) de Hoek y Brown. También en el año 1985, los profesores Brady y Brown publicaron “Rock Mechanics for Underground Mining”, el libro por excelencia de la mecánica de rocas aplicada a

⁷ Tomado de: “Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes”. Ramírez y Monge.

la minería subterránea, sin duda el mejor documento sobre el tema jamás escrito y que por el momento se va actualizando apareciendo en noviembre de 2004 la tercera edición corregida y ampliada.

También en los años 80 comenzó el desarrollo de los métodos numéricos cuya “explosión” se produjo en los noventa. En lo que concierne a este ámbito cabe destacar la influencia del ingeniero eléctrico Peter Cundall que ha programado algunos de los códigos enfocados a la mecánica de rocas más populares como FLAC, UDEC (Itasca 2000 y 2001 y sus versiones tridimensionales).

En los noventas y este primer decenio del siglo XXI, el índice parece distribuirse en distintas direcciones que incluyen el desarrollo de los métodos numéricos, la determinación de las propiedades de los materiales, los experimentos a escala real y la profundización en el concepto de efecto de escala, y la mejora la implementación técnica de las bases científicas de la mecánica de rocas. Los noventas también vieron nacer el documento más largo jamás escrito sobre esta disciplina, que es la enciclopedia de 5 tomos “Comprehensive Rock Engineering” (1993) editada por el profesor Hudson discípulo de Fairhurst y profesor del Imperial College. Esta enciclopedia pretendió y probablemente consiguió, recopilar la mayor parte de los conocimientos existentes hasta la fecha sobre mecánica de rocas.

Una versión sintética y actualizada de mecánica de rocas de gran interés se presentan los libros “Engineering Rock Mechanics: An introduction to the principles” y “Engineering Rock Mechanics. Part II: Illustrative worked examples” del propio profesor Hudson y su colega Harrison.

También conviene destacar entre las publicaciones recomendables, el reciente manual de mecánica de rocas de dos tomos realizado por el Comité Francés de Mecánica de Rocas (Manuel de Mécanique des Roches: Tome 1-Fondements (2000, coordinado por Homand y Duffaut) y Tome 2-Les Applications (2004, coordinado por Duffaut). Este libro aporta una versión más del gusto francés, (más racionalista) esto es con una muy fuerte base teórica, menos empírica que la de los textos ingleses (más de la línea de Hume y Bacon) y, sin embargo, con importantes logros a nivel práctico.⁸

⁸ Tomado de: “Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes”. Ramírez y Monge.

En lo que respecta a la investigación existen principalmente dos revistas en las que se publican investigaciones en esta materia:

1) “International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences” editada por J. Hudson y R. Zimmerman y publicada por Elsevier desde 1964, donde se publican investigaciones originales como nuevos desarrollos y casos prácticos de mecánica de rocas en sus aplicaciones mineras y civiles.

2) “Rock Mechanics and Rock engineering” editada K. Kovari y H.H. Einstein y publicada por Springer-Verlag desde 1968, que contiene investigaciones sobre aspectos experimentales y teóricos de mecánica de rocas, que incluyen técnicas de ensayos de laboratorio e in situ, métodos computacionales y observacionales sobre el comportamiento de excavaciones subterráneas y a cielo abierto.⁹

Ni esta disciplina, tal y como la entienden los autores de los libros, ni esta investigación serían posibles sin los textos citados en este apartado, dicho sea, sin ánimos de desmerecer a muchos otros que no caben en este compendio.

3.1.1.1 EL DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE LA MECÁNICA DE ROCAS

Tendemos a pensar en la ingeniería de rocas como una disciplina moderna y, sin embargo, ya en 1773, Coulomb incluyó los resultados de las pruebas de Burdeos en un artículo leído por la Academia Francesa en París (Coulomb, 1776, Heyman, 1972). Los ingenieros franceses comenzaron la construcción del Canal de Panamá en 1884 y esta tarea fue asumida por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU en 1908.¹⁰ En el medio siglo entre 1910 y 1964, se registraron 60 deslizamientos en cortes a lo largo del canal y, aunque estas fallas no fueron analizadas en términos de mecánica de rocas, un trabajo reciente del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (Lutton et al, 1979) muestra que estos deslizamientos estaban controlados predominantemente por discontinuidades estructurales y que los conceptos de la mecánica de rocas modernas son totalmente aplicables al análisis de estas fallas. Al discutir los deslizamientos del Canal de Panamá en su Discurso Presidencial a la primera conferencia internacional sobre Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones en 1936, Karl Terzaghi (Terzaghi, 1936, Terzaghi y Voight, 1979)

⁹ Tomado de: “Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes”. Ramírez y Monge.

¹⁰ Tomado y traducido de: “Practical Rock Engineering”, Hoek.

dijo: "El catastrófico descenso de las laderas más profundas" el Canal de Panamá emitió una advertencia de que estábamos sobrepasando los límites de nuestra capacidad para predecir las consecuencias de nuestras acciones...

En 1920, Josef Stini comenzó a enseñar "Geología técnica" en la Universidad Técnica de Viena y antes de morir en 1958, había publicado 333 artículos y libros (Müller, 1979). Fundó la revista *Geologie und Bauwesen*, el precursor de la revista *Rock Mechanics* de hoy, y fue probablemente el primero en destacar la importancia de las discontinuidades estructurales en el comportamiento de la ingeniería de las masas rocosas.

Otros científicos e ingenieros notables de una variedad de disciplinas hicieron un trabajo interesante sobre el comportamiento de la roca durante la primera parte de este siglo. Von Karman (1911), King (1912), Griggs (1936), Ide (1936) y Terzaghi (1945) trabajaron en la falla de los materiales rocosos. En 1921, Griffith propuso su teoría de la falla de material frágil y, en 1931, Bucky comenzó a usar una centrifugadora para estudiar la falla de los modelos de minas bajo una carga de gravedad simulada.

Ninguna de estas personas se habría clasificado como ingenieros de roca o ingenieros de mecánica de rocas (el título no se había inventado en ese momento), pero todas hicieron contribuciones significativas a la base fundamental del tema tal como lo conocemos hoy. No he intentado proporcionar una lista exhaustiva de artículos relacionados con la mecánica de las rocas que se publicaron antes de 1960, pero las referencias que se dan más arriba mostrarán que importantes desarrollos en el tema tuvieron lugar mucho antes de esa fecha.

Los comienzos de la década de 1960 fueron muy importantes en el desarrollo general de la ingeniería de rocas en todo el mundo porque se produjeron una serie de fallas catastróficas que demostraron claramente que, tanto en la roca como en el suelo, "estábamos sobrepasando los límites de nuestra capacidad para predecir las consecuencias de nuestras acciones (Terzaghi y Voight, 1979).¹¹

¹¹ Tomado y traducido de: "Practical Rock Engineering", Hoek.

En 1962, la Mecánica de Rocas, bajo la insistencia de la Escuela Austriaca, con Stini y Müller al frente, se desvincula de la Sociedad Internacional de Mecánica del Suelo, con la pública oposición del fundador de la ciencia geotécnica, Karl Terzaghi.

Justo en esta época se producen dos hechos desafortunados:

- **Primero:** En diciembre de 1959, falla la cimentación de la presa bóveda de Malpasset, en Francia, provocando 450 muertos. El reconocimiento de campo posterior mostró que la presa había fallado por el deslizamiento de una cuña sobre una falla (no detectada antes), en la cimentación del estribo izquierdo, en un terreno formado por gneises foliados muy fracturados pero impermeables bajo el efecto de las subpresiones.
- **Segundo:** En octubre de 1963, un deslizamiento en la presa de Vajont (Italia) provoca la total destrucción, aguas abajo, de la población de Longarone, con un saldo aproximado de 2.000 muertos. Tras unos días de fuertes lluvias la auscultación indicaba la posibilidad de movimientos en la ladera izquierda, por lo que se decidió rebajar la cota de embalse. Problemas en las compuertas retrasaron la operación, momento en el que se produjo el movimiento sísmico que desencadenó la caída de una masa aproximada de 300 millones de m³ de tierras a un embalse que acumulaba en aquellos momentos 150 millones de m³ de agua.

Los estudios realizados desde entonces sugieren que la caída vino gobernada por parámetros residuales bajo cargas dinámicas (algo que no se tenía en cuenta en aquellas fechas) y fenómenos de tipo termodinámico (el rozamiento en la caída provocó temperaturas de hasta 120 °C) que ni siquiera hoy se tienen en cuenta. Pasados los años el mecanismo del deslizamiento aún no ha sido explicado satisfactoriamente.¹²

Siguiendo con la historia, hay que decir que la actitud de los expertos en mecánica de rocas de aquella primera época seguía siendo dogmática incluso después de los accidentes, con métodos basados en principios de la mecánica de medios continuos bajo consideraciones estáticas, opiniones personales y subjetivos coeficientes correctores.

¹² Tomado de: <https://www.scribd.com/document/133323773/HISTORIA-DE-LA-MECANICA-DE-ROCAS-docx>

Entre 1973 y 1989, Bieniawski utiliza cinco parámetros básicos (resistencia a compresión simple, RQD, estado de las juntas, frecuencia de las juntas y presencia de agua) para desarrollar el RMR (Rock Mass Rating) como sistema de caracterización del terreno, presentando las primeras correlaciones entre el RMR y el módulo de deformación, permitiendo así hacer cálculos basados en teorías elásticas.

En 1980, Hoek y Brown enuncian un criterio de rotura a partir de ensayos de laboratorio sobre muestras de la matriz rocosa y correcciones en función del RMR obtenidas mediante estadísticas (a partir de seis tipos de calidad del macizo -desde roca intacta a roca de mala calidad y cinco tipos de composición de la roca desde metamórficas hasta carbonatadas).

También estudian la variación de las propiedades del macizo con la orientación de las juntas y el número de familias, lo que permite introducir en el criterio macizos rocosos estratificados.

Se trata de un criterio cuadrático, pero para un cierto rango de tensiones puede asimilarse a la formulación lineal de Mohr-Coulomb, lo que populariza su uso al permitir aplicar las fórmulas clásicas de la mecánica de suelos.

Entre 1994 y 1997, Hoek introduce un nuevo parámetro, el GSI (Geological Strength Index), para poder tener en cuenta otros factores, como la foliación, los rellenos, la forma de los bloques y el contenido en finos, entre otros, lo que permite incluir en el criterio macizos rocosos de mala calidad, con un comportamiento intermedio entre suelo duro y roca blanda, no contemplados en el criterio inicial de Hoek y Brown.

Hoy en día, no hay ningún método analítico en mecánica de rocas que no incluya el RMR, el GSI o el criterio de Hoek y Brown. Conviene tenerlo en cuenta porque, dado su origen, son métodos que se hallan en constante revisión (Hoek modifica su criterio periódicamente) que no deben ser utilizados fuera del rango de valores en el que fueron obtenidos.¹³

El planteamiento que se sigue habitualmente a la hora de pre dimensionar un macizo rocoso parte de un reconocimiento de campo, una recopilación de datos geomecánicos y la realización de clasificaciones geomecánicas, dejando

¹³ Tomado de: <https://www.scribd.com/document/133323773/HISTORIA-DE-LA-MECANICA-DE-ROCAS-docx>

formulaciones más exactas, mediante elementos finitos (PLAXIS) o diferencias finitas (FLAC), para proyectos “grandes” o instrumentación.


Para la práctica de mecánica de rocas, debemos señalar tres caminos de conocimientos: empírico, observacional, y analítico.¹⁴

3.1.1.2 APLICACIONES DE LA MECÁNICA DE ROCAS

Cómo se ha señalado, la mecánica de rocas se considera una disciplina única con unos principios únicos de aplicación universal y, eso sí con diferentes aplicaciones. Lógicamente, las aplicaciones principales son la minería y la ingeniería civil. Mientras que la primera muchas ocasiones los huecos se diseñan para que sean estables durante periodos de tiempo relativamente corto (unas horas, por ejemplo, para el caso de un frente de tajo largo), en la segunda la estabilidad a largo plazo (túneles carreteros y ferroviarios) es prioritaria. Además, y como quiera que la minería ha ido tradicionalmente ligada a la inversión privada y las obras civiles a la iniciativa estatal o pública, el énfasis de las aplicaciones mineras de la mecánica de rocas ha sido tradicionalmente ligado a la economía y menospreciar la seguridad, mientras que en ingeniería civil las obras deben ser fundamentalmente seguras sin dejar por ello de ser económicas.

Como quiera que el enfoque de esta investigación es más propio de las aplicaciones mineras, se presentan en primer lugar las aplicaciones de la mecánica de rocas en minería y posteriormente el resto. A parte de las aplicaciones en ingeniería minera y civil, no se pueden dejar de mencionar las cada vez más importantes aplicaciones en el ámbito de la ingeniería del petróleo, del espacio subterráneo urbano, del almacenamiento de residuos y la planificación del territorio.¹⁵

a) En minería a cielo abierto:

La minería a cielo abierto exige la realización una excavación superficial con el hueco minero, que contendrá las infraestructuras de servicios, las labores de preparación y las operaciones de arranque propiamente dichas. En este tipo de minería el objetivo primordial de la mecánica de rocas era asegurar la estabilidad de los diversos taludes  en fracturas de la cantera, corta o descubierta, tanto

¹⁴ Tomado de: <https://www.scribd.com/document/133323773/HISTORIA-DE-LA-MECANICA-DE-ROCAS-docx>

¹⁵ Tomado de: “Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes”. Ramírez y Monge.

a nivel general como a nivel local. También en este caso y en función de la geometría del yacimiento, de los requerimientos técnicos-económicos, etc., se puede distinguir entre taludes estables sin sostenimiento y aquellos que lo necesitan.

Entre las operaciones que contribuyen a la estabilidad de taludes destacan las técnicas tendientes a disminuir el nivel freático del talud (realización de canales de salvaguarda, túneles de drenaje, sondeos horizontales y pozos verticales de drenaje) y la colocación de elementos de sostenimientos propiamente dichos (pernos de anclaje, cables, contrafuertes de escollera, muros de contención).

Dentro de la minería a cielo abierto se suele distinguir entre minas metálicas y de carbón, explotaciones de rocas industriales como áridos, caliza para cementos y canteras de rocas ornamentales como granito, pizarra ornamental o mármol. (Figura 1).¹⁶



Figura 1: a) Minería de cobre El Chino, México b) Minería de carbón, El Cerrejón, Colombia C) Cantera de áridos de Hanson, España D) Cantera de Mármol de Carrara, Italia (Fuente: ver Ítem¹⁷)

¹⁶ Tomado de: "Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes". Ramírez y Monge.

¹⁷ Tomado y traducido de: Marshman at the English Wikipedia, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=89766>

b) En minería subterránea:

Una mina subterránea en operación presenta diversas excavaciones o huecos que cumplen con diferentes tareas. Así el pozo principal, la rampa, las galerías de nivel y de transporte, los cargaderos de mineral y los pozos de ventilación constituyen la estructura de acceso y servicios de la explotación (Figura 2). Su vida operativa será la de la propia mina y se suelen excavar en estéril.¹⁸

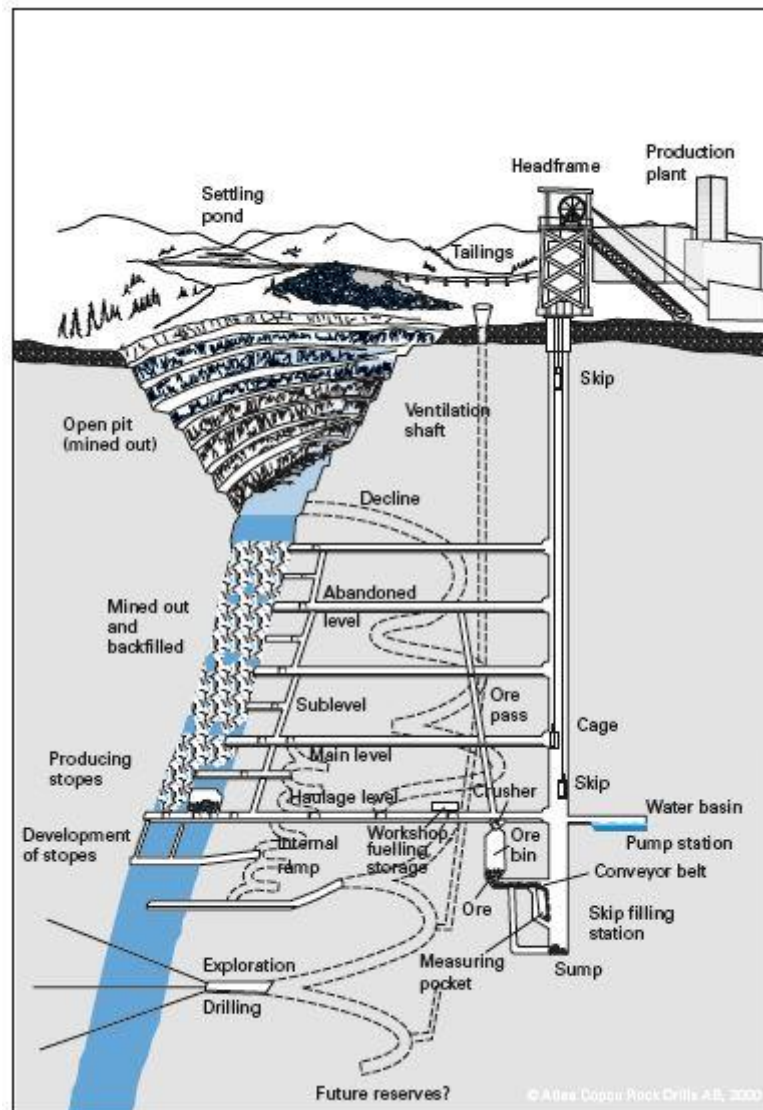


Figura 2: Infraestructura básica requerida en una típica mina subterránea. (Fuente: Atlas Copco)

Existen además huecos mineros de servicio y operación directamente relacionados con la extracción de mineral como son los transversales de acceso y de reconocimiento, Galerías de avances, piqueras o chimeneas de paso de

¹⁸ Tomado de: "Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes". Ramírez y Monge.

mineral y en general cualquier cavidad realizada en las labores de preparación. Desde o en estos huecos, excavados en el propio mineral o en la roca caja, se realizan diversas operaciones de producción de mineral, por lo que su vida operativa queda limitada a la duración de las labores mineras en su entorno desapareciendo algunos de ellos una vez realizada la explotación en la zona.¹⁹ El tercer tipo de excavación es la fuente de mineral, en las cavidades donde se realizan las labores de arranque. Puede tratarse de frentes, con geometría definida y axiales estables que delimitan la geometría del hueco que va aumentando de tamaño a medida que avanza el laboreo. también puede ser un hueco relleno de mineral más o menos dividido, con límite inferior y laterales bien delimitados, produciéndose el avance mediante arranque en la corona de la excavación. La vida de estos huecos viene marcada por la duración de la extracción del mineral propiamente dicha. Así pues, la mecánica de rocas debe ser capaz de analizar la estabilidad y diseñar cada una de estas excavaciones atendiendo sus requerimientos operativos.²⁰

El método apropiado para un determinado yacimiento se determina a partir de factores como su tamaño, disposición geométrica, distribución y ley del mineral, aspectos geotécnicos, que incluyen las propiedades geomecánicas del mineral y de la roca caja, la estructura geológica del macizo rocoso, el campo tensión al natural y la presencia distribución de agua subterránea. Desde un punto de vista geotécnico las diferencias vendrán marcadas por los desplazamientos inducidos en la roca y la redistribución de energía plástica y potencial subsiguiente a la explotación.

c) En ingeniería civil:

Las principales aplicaciones de la mecánica de rocas en la ingeniería civil son básicamente el diseño y análisis de estabilidad de taludes, el diseño y ejecución de túneles carreteros y ferroviarios y cavernas con distintos usos (hidroeléctricos, conducción de aguas, alcantarillado...) y el diseño de cimentaciones en roca para grandes obras civiles como presas, viaductos, puentes y edificios. ([Figura 3](#)).²¹

¹⁹ Tomado de: "Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes". Ramírez y Monge.

²⁰ Tomado de: "Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes". Ramírez y Monge.

²¹ Tomado de: "Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes". Ramírez y Monge.



Figura 3: a) Talud de acceso para autovías, España, (Fuente: ICEACSA Grupo). b) Excavación de túnel para vías, Colombia, (Fuente: ANI.gov.co.). c) Sostenimiento de un talud gutinado y anclado, (Fuente: Perybras). d) Represa cimentada en roca de Contreras, España, (Fuente: ver ítem abajo²²)

d) En ingeniería del petróleo:

La disminución progresiva de las reservas de petróleo, junto con la evolución de diversas variables geopolíticas que producen aumentos de precio, pero que afectan de manera importante a la economía mundial está obligando cada día más a la industria del petróleo a incrementar su rentabilidad en procesos de producción y recuperación secundaria. Los pozos de petróleo se utilizan para acceder a este y para transportarlo a la superficie. Así los criterios de diseño de esto se asemejan a los que se dan en el ámbito minero y dependen de la estrategia conjunta de recuperación y vida útil del campo en el que se encuentran y del uso que se le da a un pozo en particular (extracción, inyección, ambas).²³

²² https://es.wikipedia.org/wiki/Embalse_de_Contreras.

²³ Tomado de: "Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes". Ramírez y Monge.

Se utiliza la mecánica de rocas para analizar y resolver problemas como la estabilidad del pozo tanto la fase de perforación como en la fase de operación ([Figura 4, 1](#)), la recuperación terciaria del crudo mediante la inyección de agua fría, la respuesta del macizo rocoso reservorio o yacimiento durante la producción en las zonas próximas y más alejadas del pozo ([Figura 4, 2](#) Yacimiento) a la producción de hidrocarburos y los posibles hundimientos o fenómenos de subsidencia que origina la extracción ([Figura 4, 2 Recubrimiento](#)). (Maury, 1994).²⁴

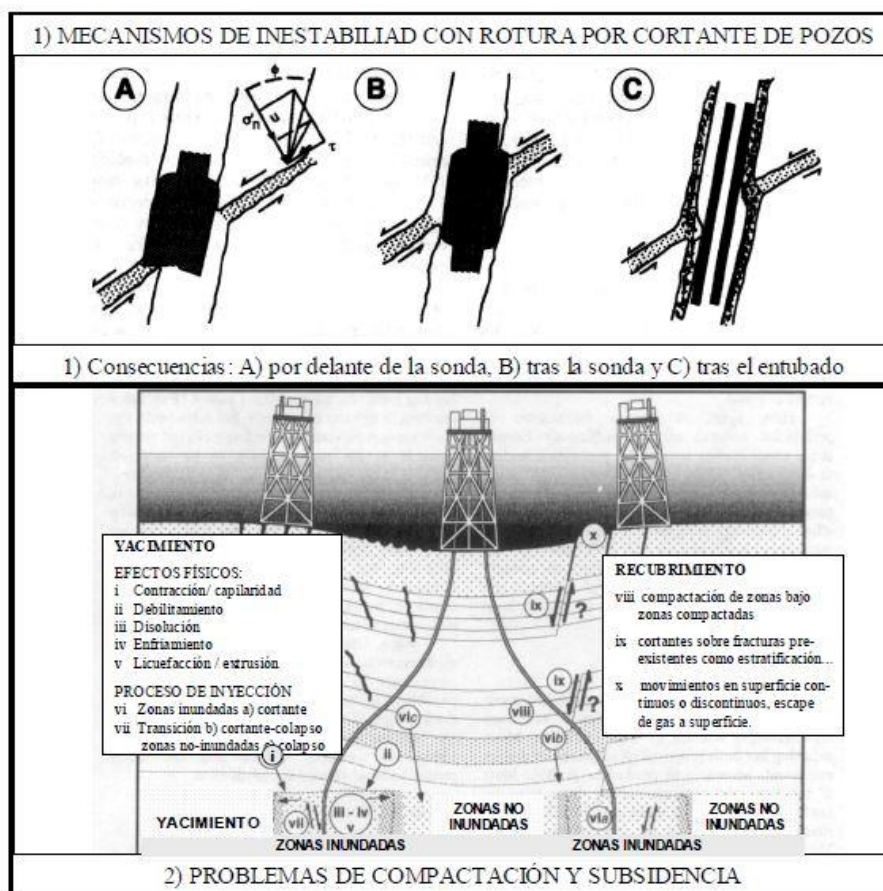


Figura 4: Esquema de ingeniería de petróleo. (Fuente: Ramírez y Monge)

e) En ingeniería de almacenamiento de residuos:

La creciente concientización ambiental de la sociedad ha sido asociada a una generación, por parte de la misma, de un volumen cada vez más grande de residuos, algunos de los cuales necesitan tratamientos muy especiales como los residuos sólidos urbanos, los residuos tóxicos y peligrosos, entre los que se

²⁴ Tomado de: "Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes". Ramírez y Monge.

encuentran las pilas, baterías y aceites de coche, y los residuos nucleares de baja, media y alta actividad. (Figura 5).



Figura 5: Piscina subterránea en Finlandia (Fuente: Departamento de urbanismo, Helsinki). b) Túnel de almacén nuclear en Onkalo, Finlandia. (Fuente: Jussi Partanen)

Esto ha llevado a la aplicación de la mecánica de roca a la selección del emplazamiento y diseño de repositorios o almacenes de residuos que aseguren unas determinadas condiciones, para evitar la peligrosidad de los mismos. En particular la búsqueda, selección y estudio de los posibles almacenes de residuos nucleares de alta actividad ha llevado a grandes inversiones de los países más avanzados gestionadas por empresas públicas o agencias estatales, que ha permitido que se produjeran no pocos avances en mecánica de rocas.²⁵

f) En ingeniería del espacio subterráneo urbano:

La carencia de espacio en determinadas ciudades, junto con otras ventajas de construir edificios infraestructura subterránea (temperatura, ahorro de espacio en superficie, etc.,) ha hecho que cada día sea más natural acudir a soluciones constructivas subterráneas, desarrolladas en muchas ocasiones en macizos rocosos. De esta forma, actualmente no resulta sorprendente encontrar centros comerciales subterráneos, polideportivos subterráneos, almacenes de hidrocarburo y gas... junto con construcciones más tradicionales como centrales hidroeléctricas, ferrocarriles metropolitanos, bodegas, instalaciones militares, etc.²⁶

²⁵ Tomado de: "Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes". Ramírez y Monge.

²⁶ Tomado de: "Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes". Ramírez y Monge.

g) Geotermia:

Se denomina geotermia a la explotación de calor de la tierra, por ejemplo, como los balnearios y termas, además de eso se pueden distinguir dos categorías a saber, de baja energía: solo utilizables para producir calorías a temperatura moderada, como por ejemplo para calefacción urbana; y de alta energía (asociadas a granitos jóvenes o rocas volcánicas), susceptibles de producir energía eléctrica.

El problema suele ser que la circulación normal de agua afecta a un porcentaje muy pequeño de la roca, de forma que la mayor parte del macizo rocoso no interviene en la circulación natural, son las rocas calientes secas. Desde los años 70 se ha propuesto forzar la circulación del agua en estas rocas para extraer su calor. Este tipo de problema es el que necesita de la mecánica de roca para ser resuelto, aunque requiere de complicados modelos termo-hidro-mecánicos, en fase de desarrollo, que tengan en cuenta las influencias de la temperatura sobre las tensiones y de ésta sobre la permeabilidad de la roca y, por tanto, del volumen afectado por la transferencia de calor.²⁷

h) Desarrollo sostenible, tecnología del medio ambiente y planificación territorial:

La consecución del desarrollo sostenible, mediante la solución de diversos problemas medioambientales y de gestión del territorio, pasan también por la adecuada utilización de macizos rocosos. tras las conferencias de Río de Janeiro (1997) y Kyoto (1997), opinión pública y los políticos están comenzando a concientizar sea la necesidad de una mayor protección y una verdadera gestión patrimonial del medio ambiente. la protección ambiental, tradicionalmente asimilada a la salvaguarda de especies en vía de extinción y sus ecosistemas, pasa a día de hoy por la defensa de los medios naturales frágiles (eliminando toda suerte de contaminación y mediante la gestión ambientalmente segura de todo tipo de residuos) y por la protección de asentamientos urbanos vulnerables (poblaciones de montaña, litorales, islas...) de las agresiones de las catástrofes naturales que a veces se llevan consigo vidas humanas.²⁸

²⁷ Tomado de: "Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes". Ramírez y Monge.

²⁸ Tomado de: "Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes". Ramírez y Monge.

A partir de aquí y luego de haber coincidido con la lectura de textos de varios autores, me surgió la idea de investigar y desarrollar el tema de uso de la bioingeniería para resolver los problemas de estabilidad, esencialmente para el tema que concierne al curso en el área de la minería a cielo abierto o cualquier obra de excavación en superficie.

3.1.2 ESTABILIDAD DE TALUDES Y CONTROL DE LA EROSIÓN: BREVE HISTORIA DE LA BIOINGENIERÍA

La inestabilidad de taludes y la erosión del suelo por el agua y el viento son peligros ambientales importantes. Aunque son el resultado de procesos geomorfológicos naturales, se ven afectados y tienen consecuencias para la actividad humana, a menudo incurriendo en daños económicos y sociales. En la naturaleza, la vegetación es un factor que mantiene el equilibrio en el paisaje entre las fuerzas destructivas y las fuerzas constructivas o regenerativas de la estabilidad. El riesgo de fallas en los taludes y erosión aumenta cuando se elimina la cubierta vegetal. La pregunta es si la situación se puede reparar si se restaura la cubierta vegetal.²⁹

El uso de vegetación para la estabilización de taludes y el control de la erosión se puede denominar bioingeniería. La bioingeniería y la ingeniería biotecnológica son términos que se encuentran comúnmente en la literatura, pero hay mucha confusión en cuanto a sus definiciones precisas. En esta investigación teórica, la bioingeniería se refiere al uso de cualquier forma de vegetación, ya sea una sola planta o una colección de plantas, como material de ingeniería (es decir, una que tiene características y comportamiento cuantificables). La ingeniería biotecnológica se refiere a las técnicas en las que la vegetación se combina con estructuras inertes como las paredes de las cunas, combinando los beneficios estructurales de los componentes vegetativos y no vegetativos del esquema.³⁰ Para descubrir cómo nació el uso de la bioingeniería en el control de estabilizaciones, será necesario resumir un poco de historia.

²⁹ Tomado y traducido de: "Slope stabilization and erosion control"... Morgan & Rickson.

³⁰ Tomado y traducido de: "Slope stabilization and erosion control"... Morgan & Rickson.

El siguiente texto es un extracto de un documento presentado por Kevin Finney, Arquitecto Paisajista, en la Undécima Conferencia Anual de la Federación de Restauración de Salmónidos de California en Eureka, California, 20 de marzo de 1993.³¹

El sistema de tecnologías, que hoy llamamos bioingeniería de suelos, se puede rastrear a los pueblos antiguos de Asia y Europa. Los historiadores chinos, por ejemplo, registraron el uso de técnicas de bioingeniería para la reparación de diques desde el 28 a.C. ([Figura 6](#)). Los primeros visitantes occidentales a China hablaron de bancos de río y diques estabilizados con grandes canastas tejidas de sauce, cáñamo o bambú y llenas de rocas. En Europa, los aldeanos celtas e ilirios desarrollaron técnicas para tejer ramas de sauces para crear cercas y muros. Más tarde, los romanos utilizaron fascines, haces de postes de sauce, para la hidro-construcción.³²

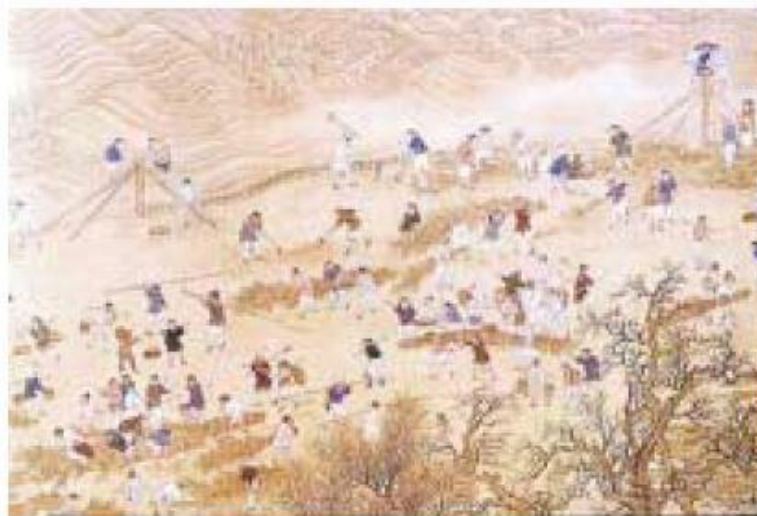


Figura 6: China 28 a. C. Agrupando tallos vivos para uso en ribera y reparación de diques. (Fuente: Kevin Finney)

Para el siglo XVI, las técnicas de bioingeniería de suelos se utilizaban y codificaban en toda Europa desde los Alpes hasta el Mar Báltico y desde el oeste hasta las Islas Británicas. Uno de los primeros relatos escritos sobre el uso de técnicas de bioingeniería del suelo, una publicación de Woltmann de 1791, ilustró el uso de estacas vivas para bancos de arroyos vegetativos y estabilizadores (Stiles, 1991, p.ii). Casi al mismo tiempo, otros bioingenieros de suelos que

³¹ Tomado y traducido de: "Soil Bioengineering: An Alternative for roadside Management", Lisa Lewis.

³² Tomado y traducido de: "Soil Bioengineering: An Alternative for roadside Management", Lisa Lewis.

trabajaban en Austria estaban desarrollando técnicas de construcción de sedimentación en vivo, plantando hileras de esquejes en canales para atrapar sedimentos y remodelar canales.³³



Figura 7: Europa a principios del siglo XX. Corte y recogida de tallos vivos para bioingeniería de suelos. (Fuente: Kevin Finney)

Gran parte del desarrollo y la documentación de las técnicas de bioingeniería de suelos, desde la Revolución Industrial, se ha realizado en las zonas montañosas de Austria y el sur de Alemania. La tala extensiva de los bosques en la región resultó en un aumento de los problemas ambientales, como lo vemos hoy en los Estados Unidos. Problemas tales como la erosión extrema de laderas, los frecuentes deslizamientos de tierra y las avalanchas y la grave degradación de las orillas de los ríos requerían reparaciones. A principios de siglo, los bioingenieros de suelos europeos habían comenzado a encontrar nuevas aplicaciones para las tecnologías populares antiguas, usándolas para desarrollar métodos para enfrentar los nuevos problemas ambientales. Estos primeros bioingenieros del suelo, en su mayoría silvicultores e ingenieros capacitados, comenzaron a estudiar técnicas tradicionales ya publicar su trabajo. Este compilado cuerpo de conocimiento es donde la profesión de bioingeniería de suelos se desarrollaría en las siguientes décadas.³⁴

El mayor impulso al desarrollo de nuevas técnicas de bioingeniería de suelos en Europa se debió a los desarrollos políticos durante la década de 1930. Las

³³ Tomado y traducido de: "Soil Bioengineering: An Alternative for roadside Management", Lisa Lewis.

³⁴ Tomado y traducido de: "Soil Bioengineering: An Alternative for roadside Management", Lisa Lewis.

restricciones financieras de los años anteriores a la guerra en Alemania y Austria favorecieron el uso de materiales locales, de bajo costo y métodos de construcción tradicionales para proyectos de obras públicas. La construcción del sistema alemán Autobahn, durante este tiempo, involucró extensas aplicaciones de tecnologías de bioingeniería de suelos. El uso de materiales indígenas y métodos tradicionales también fue consistente con la difusión de la ideología nacionalista. En 1936, Hitler estableció un instituto de investigación en Munich encargado del desarrollo de técnicas de bioingeniería de suelos para la construcción de carreteras (Stiles, 1988, p.59). Aunque este trabajo de desarrollo se perdió, un ingeniero de Livonia llamado Arthur von Kruedener, director del instituto, continuó trabajando en el campo y es conocido en Europa central como el padre de la bioingeniería de suelos.³⁵

Al mismo tiempo que los alemanes estaban estableciendo su instituto de investigación, algunos de los trabajos más importantes de bioingeniería de suelos en los Estados Unidos se estaban realizando en California. Charles Kraebel, que trabajaba para el Servicio Forestal del USDA, estaba desarrollando sus técnicas de “trazo de contornos” para estabilizar los cortes en las carreteras. Kraebel utilizó una combinación de técnicas de bioingeniería que incluyen estacas vivas, fajinas vivas y trasplantes vegetativos para estabilizar pendientes degradantes en los Bosques Nacionales del centro y sur de California. Su uso del término “zarzo” para describir sus sistemas fajinos en vivo, se ha mantenido con nosotros y continúa usándose hoy en día. El trabajo de Kraebel estaba bien documentado en la Circular No. 380 del USDA, publicada en 1936. Dos años más tarde, el Servicio de Conservación de Suelos, ahora conocido como Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS), comenzó un estudio de técnicas de estabilización de faroles a lo largo de las orillas del Lago Michigan. El trabajo de esa agencia, que incluía el uso de fascines en vivo, presas de arbustos y estacas en vivo, se publicó en 1938 (Gray y Leiser, 1982, p.188).³⁶

³⁵ Tomado y traducido de: “Soil Bioengineering: An Alternative for roadside Management”, Lisa Lewis.

³⁶ Tomado y traducido de: “Soil Bioengineering: An Alternative for roadside Management”, Lisa Lewis.



Figura 8: Instalación de fajinos vivos en los años 30. (Fuente: USDA³⁷)

Durante el período de posguerra, los bioingenieros de suelos europeos volvieron a estudiar, desarrollar y evaluar nuevas técnicas. En 1950, se formó un comité de bioingeniería de suelos de Alemania, Austria y Suiza para estandarizar las tecnologías emergentes que se convirtieron en parte del Sistema Nacional Alemán de Especificaciones de Construcción, la DIN (Robbin B. Sotir & Associates, Inc. n.d.).³⁸

El libro de Arthur von Kruedener, *Ingenieurbiologie*, (biología de la ingeniería), se publicó en 1951 y fue la mala traducción del título alemán lo que nos dio el término en inglés que usamos hoy. El uso del término bioingeniería ha causado cierta confusión y ha demostrado ser problemático para los investigadores que encuentran, en este país, el término que más a menudo se refiere a un área de investigación médica. NRCS ahora se refiere a este trabajo oficialmente como "bioingeniería de suelos", un término que enfatiza el componente de suelo del sistema.³⁹

Los bioingenieros de suelo alemanes y austriacos continuaron perfeccionando sus técnicas y publicando su trabajo durante los años 50 y 60. Este fue un paso importante en el lanzamiento de un enfoque más estructural, sentando las bases

³⁷ United States Department of Agriculture.

³⁸ Tomado y traducido de: "Soil Bioengineering: An Alternative for roadside Management", Lisa Lewis.

³⁹ Tomado y traducido de: "Soil Bioengineering: An Alternative for roadside Management", Lisa Lewis.

para el desarrollo del campo profesional de la bioingeniería de suelos. En USA, dos proyectos importantes se llevaron a cabo en los años 70 y 80. Estas incluyen las Pruebas de técnicas de bioingeniería de suelos en la cuenca del lago Tahoe diseñadas por Leiser y otros (1974), y el trabajo de Revegetación en el Parque Nacional Redwood (Reed y Hektner, 1981, Weaver, et al., 1987). Ambos estudios han sido bien documentados y proporcionan información importante sobre la aplicación de técnicas de bioingeniería de suelos en el oeste de USA.⁴⁰ En 1980, se publicó en Canadá la bioingeniería de Hugo Schiechl para la recuperación y conservación de tierras ([Figura 9](#)). Presenta, por primera vez en inglés, el trabajo de muchos importantes bioingenieros de suelos europeos, incluidos Lorenz, Hassenteufel, Hoffman, Courtorier y el propio Schiechl. El libro hizo tecnologías, e historia de su desarrollo y aplicaciones, accesible al mundo de habla inglesa. En 1997, se publicó otro libro Schiechl, Técnicas de bioingeniería de suelos para la protección de taludes y el control de la erosión. Hasta la fecha, sus escritos siguen siendo el trabajo más importante sobre bioingeniería de suelos en idioma inglés.⁴¹

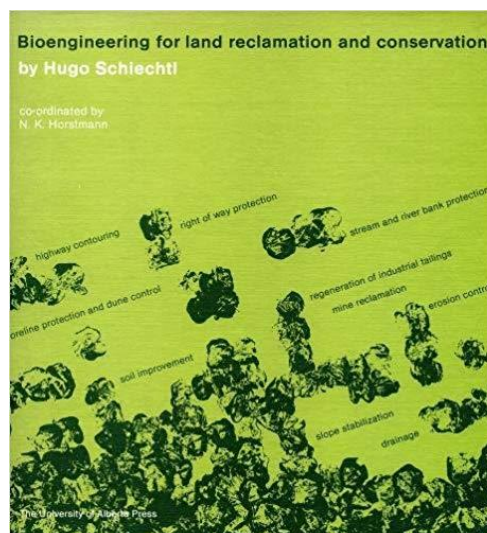


Figura 9: Libro de Hugo Schiechl. (Fuente: Amazon.com)

Publicaciones subsiguientes, entre ellas la Protección biotecnológica y el control de la erosión de Grey y Leiser y la Bioingeniería de suelos de Sotir y Grey para la protección de taludes y la erosión de tierras altas en USA, la Biotecnología de

⁴⁰ Tomado y traducido de: "Soil Bioengineering: An Alternative for roadside Management", Lisa Lewis.

⁴¹ Tomado y traducido de: "Soil Bioengineering: An Alternative for roadside Management", Lisa Lewis.

Bioteología y suelos de las tierras altas de Gray and Sotir en 1996 e Investigación e información sobre la industria de la construcción británica. El uso de la Asociación de la vegetación en la ingeniería civil ha hecho que las tecnologías de bioingeniería sean más conocidas en la profesión de ingeniería. Sin embargo, todavía hay resistencia a las técnicas en muchos países.⁴²

3.2 PARADIGMA. VISIÓN HOLÍSTICA – SISTEMA DE LA COMPRENSIÓN DE LA SITUACIÓN

Los deslizamientos son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daño en las propiedades por valor de decenas de billones de dólares cada año (Brabb-1989); sin embargo, muy pocas personas son conscientes de su importancia. El 90% de las pérdidas por deslizamientos son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se toman medidas de prevención o control.⁴³

Los elementos teóricos y metodológicos subyacentes en los mecanismos ecológicos que gobiernan o condicionan los suelos, dependen de cada región, e igualmente las amenazas que pueden afectarlos.

Para esto la geotecnia que aplica métodos científicos de los principios de ingeniería que contribuye a la generación, interpretación y utilización del conocimiento de los materiales y procesos que ocurren en la corteza terrestre para la solución de problemas de ingeniería. Para su cabal desarrollo requiere la aplicación de diferentes campos del conocimiento, entre ellos, la mecánica de suelos, la mecánica de rocas, la geología, la geofísica, la hidrología, la hidrogeología y las ciencias relacionadas.⁴⁴

Sin embargo, cuando se habla de inestabilidad de taludes y la erosión del terreno por agua y viento, se observa que son los mayores desastres ambientales que pudieran ocurrir. Aunque ellos son producto de procesos geomorfológicos naturales, ambos están afectados y tienen consecuencias sobre las actividades humanas, regularmente incurriendo en daños sociales y económicos, como, por ejemplo, la falla de un dique que contiene cianuro en una mina, o diques de

⁴² Tomado y traducido de: "Soil Bioengineering: An Alternative for roadside Management", Lisa Lewis.

⁴³ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

⁴⁴ Tomado de: "Geotecnia del trópico andino", Escobar y Duque.

contención de aguas o residuos aledaños a zonas pobladas. En la naturaleza la vegetación original es la que mantiene el equilibrio del terreno evitando que las fuerzas destructivas causen inestabilidad.

La pregunta es: ¿cuándo cualesquiera de estas situaciones pudieran ocurrir, se podrían resolver restaurando la cobertura vegetal?

Entonces, a continuación, debería profundizar los mecanismos en el cual la vegetación podría jugar un papel protector posterior en la recuperación o protección de taludes, y para esto me estaré refiriendo al término de ingeniería biotecnológica o Bioingeniería, la cual se refiere a las técnicas en las que la vegetación se combina con estructuras inertes como las paredes de retención, combinando los beneficios estructurales de los componentes vegetativos y no vegetativos del esquema. La bioingeniería es un ejemplo clásico de dónde existe una brecha significativa entre el "arte" (o la aplicación de las técnicas propuestas) y la "ciencia" (o la cuantificación científica y, por lo tanto, la justificación objetiva de las prácticas).⁴⁵

Este tema sería una especie de "tema multidisciplinario" y requeriría de profundizar desde las raíces de un problema conocido planteado, hasta las soluciones objetivas, que podrían interesar a la comunidad científica, como ya ha sido demostrado por varios autores, así como también, generar conflictos de ideas para grupos de investigadores que no aceptan las teorías de la bioingeniería, como por ejemplo, en minas activas donde el uso de la vegetación puede ser relativamente ineficaz ante la presencia de constantes modificaciones de los taludes, y ambientes susceptibles en los que se podrían desencadenar efectos de especies vegetales invasivas que destruirían los pocos ecosistemas ya presentes, pero esta es una discusión que no compete al objetivo de esta investigación.

3.3 INTRODUCCIÓN

El deslizamiento de la tierra es un evento geotécnico que incluye una amplia gama de movimientos en el suelo, como desprendimientos de rocas, fallas

⁴⁵ Tomado y traducido de: "Slope Stabilization and erosion control", Morgan & Rickson.

profundas en taludes y flujos de escombros poco profundos, y puede causar varios problemas en diversos campos civiles, como carreteras, presas y minas.⁴⁶ Las zonas montañosas tropicales son muy susceptibles a sufrir problemas de deslizamientos de tierra debido a que generalmente, se reúnen cuatro de los elementos más importantes para su ocurrencia tales como son la topografía, sismicidad, meteorización y lluvias intensas.⁴⁷

Dado que la mayoría de los métodos convencionales de estabilización de taludes no son económicos ni aplicables en todas partes, hoy en día se ha prestado atención a la bioingeniería del suelo utilizando la vegetación como el método amigable con el medio ambiente para la estabilización de taludes. La bioingeniería de suelos o el uso de vegetación en el diseño de ingeniería civil se aplica principalmente a proyectos de estabilización en pendientes poco profundas, caracterizados por taludes inestables con movimiento de superficie. La vegetación tiene un efecto silencioso en la mejora del suelo para predecir el deslizamiento de tierra y un papel mecánico para aumentar el esfuerzo de cizallamiento y extracción en el suelo.⁴⁸

El presente trabajo de investigación intenta presentar una visión general de análisis de deslizamientos de tierra en zonas tropicales y el diseño de sistemas de estabilización utilizando la bioingeniería, aun cuando es un tema extenso, y diversos autores han realizado extensas investigaciones sobre el tema, seguramente quedaran muchas preguntas por responder, pero que podrían ser desarrolladas por nuevos alumnos en el futuro del curso.

3.4 LAS ZONAS TROPICALES

3.4.1 LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS TROPICALES

Hay cinco medidas en grados mayores o líneas de latitud que rodean el mundo, y estos son el círculo polar ártico, Trópico de Cáncer, el Ecuador, Trópico de Capricornio y el Círculo Polar Antártico. El Ecuador se encuentra en latitud cero y divide la Tierra en los hemisferios norte y sur. La Tierra se abomba ligeramente

⁴⁶ Tomado y traducido de: "Contribution of the Root to Slope Stability", Osman et al.

⁴⁷ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

⁴⁸ Tomado y traducido de: "Contribution of the Root to Slope Stability", Osman et al.

en el Ecuador donde tiene un diámetro promedio de 12.750 kilómetros. El Ecuador mide 40.075 kilómetros de largo y se extiende a través de Indonesia, Ecuador, Colombia, el norte de Brasil, Gabón, la República Democrática del Congo, Uganda, Kenia y Somalia.⁴⁹

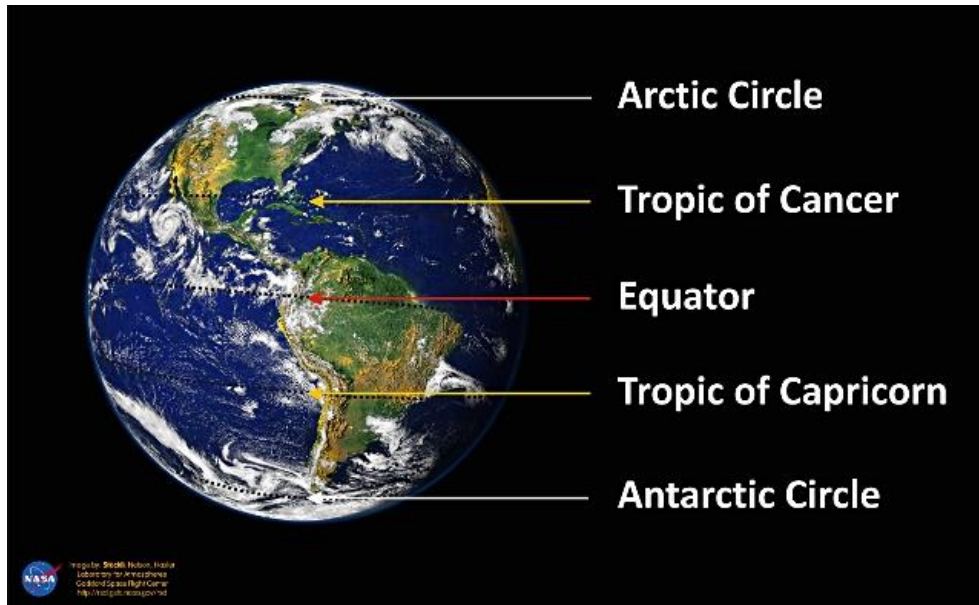


Figura 10: Cinco líneas de latitud dan la vuelta al mundo como se muestra aquí en una imagen de Apolo de la Tierra con una vista del hemisferio occidental (Fuente: NASA Goddard Space Flight Center), de fecha 9 de septiembre de 1997. Las alturas de las montañas y las profundidades de los valles fueron exageradas por 50 veces de sus niveles reales de modo que el relieve vertical sea visible.

El trópico es la región que está centrada en el Ecuador y limitada por dos círculos de latitud que se denominan trópicos: el Trópico de Cáncer se encuentra al norte de la línea ecuatorial y el Trópico de Capricornio se encuentra al sur de la línea ecuatorial. Estar en el trópico, literalmente, significa que usted está situado en la región vinculada por estos dos círculos tropicales.⁵⁰

Tropikos es una palabra griega derivada del tropo, que significa vuelta o revolución. La posición de los dos trópicos no es fija, sino que está dictada por la inclinación del eje de la Tierra con respecto al plano de la órbita terrestre. La inclinación del eje varía en $2,4^\circ$ y es periódica, teniendo aproximadamente 41.000 años para cambiar entre una inclinación de $22,1^\circ$ y $24,5^\circ$ y viceversa. Cuando la inclinación del eje es el más grande, el área de los trópicos

⁴⁹ Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

⁵⁰ Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

se expande y las temperaturas en las regiones polares son moderados, lo que resulta en la fusión parcial de las capas de hielo polares.

Las nuevas fronteras geológicas están situadas en la zona tropical; en el ecuador y ligados al Trópico de Cáncer al norte 23 ° 26 '16 "N y al Trópico de Capricornio en el sur 23 ° 26' 16" S.⁵¹

3.4.2 EL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE KÖPPEN-GEIGER PARA CLIMAS TROPICALES

La clasificación climática de Köppen-Geiger es el sistema de clasificación climática más ampliamente utilizado. Los límites de la zona climática se seleccionan basándose en la distribución de la vegetación e incorporación de las medias anuales y mensuales de temperatura y precipitación, y la estacionalidad de la precipitación. El sistema de clasificación utiliza seis cartas para dividir al mundo en seis grandes regiones climáticas:⁵²

- A. Clima húmedo tropical
- B. Climas secos
- C. Climas húmedos de latitudes medias con inviernos suaves
- D. Climas húmedos de las latitudes medias con inviernos fríos
- E. Climas polares con inviernos extremadamente fríos
- F. Climas de las tierras altas

Para el propósito de esta investigación me centraré en definir únicamente el grupo A, los climas húmedos tropicales. Köppen define tres tipos menores de clima:

- la Selva Tropical **Af**,
- el Monzón Tropical **Am**, y
- la Sabana Tropical **Aw**.

Clima de Selva Tropical (Af): Las características climáticas incluyen:

- precipitación durante todo el año: la precipitación total anual es superior a 1.800 mm

⁵¹ Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

⁵² Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

- densos bosques con árboles altos que dan sombra a la superficie del suelo
- poca o ninguna maleza,
- sistemas de raíces poco profundas en un suelo permanentemente húmedo.⁵³



Figura 11: Selva tropical, zona climática **Af**, en Surinam (Fuente: Voormeij, 2016).



Figura 12: Selva tropical, zona climática **Af**, en Surinam (Fuente: Voormeij, 2016)

Las áreas representativas del **Af** incluyen: la Cuenca del Amazonas; Cuenca del Congo, y partes de la zona Indo-Malayo en Asia. ([Figura 13](#))

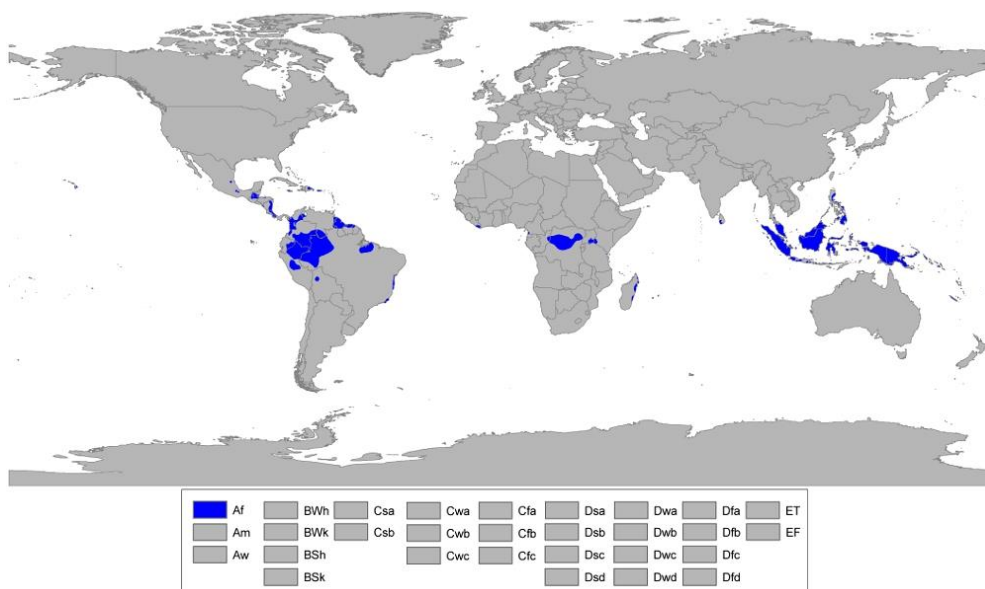


Figura 13: Mapa de clasificación climática mundial de Köppen-Geiger para climas húmedos tropicales: Selva Tropical, **Af** (Fuente: Kottek et al (2006))

⁵³ Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

Clima Tropical Monzón (Am): cuentan con climas:

- precipitación durante los 7-9 meses más calurosos, con una precipitación total anual en torno a 2.200 a 2.800 mm;
- bosques con un dosel menos denso que **Af** y cobertura del suelo más pesado; y
- en las regiones más secas de **Am**, variedades de bosques de hoja caduca (frondosa, al descubierto durante la estación seca) o espina (por lo general sin hierba).⁵⁴



Figura 14: Selva de monzón tropical, zona climática **Am**, en Filipinas (Fuente: Turner et al (2011)).

Las áreas representativas del **Am** incluyen: el sureste de Asia, noreste de Brasil, norte de Colombia y Venezuela, el caribe, oeste de México, el centro entre de África, entre otros. ([Figura 15](#))

⁵⁴ Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

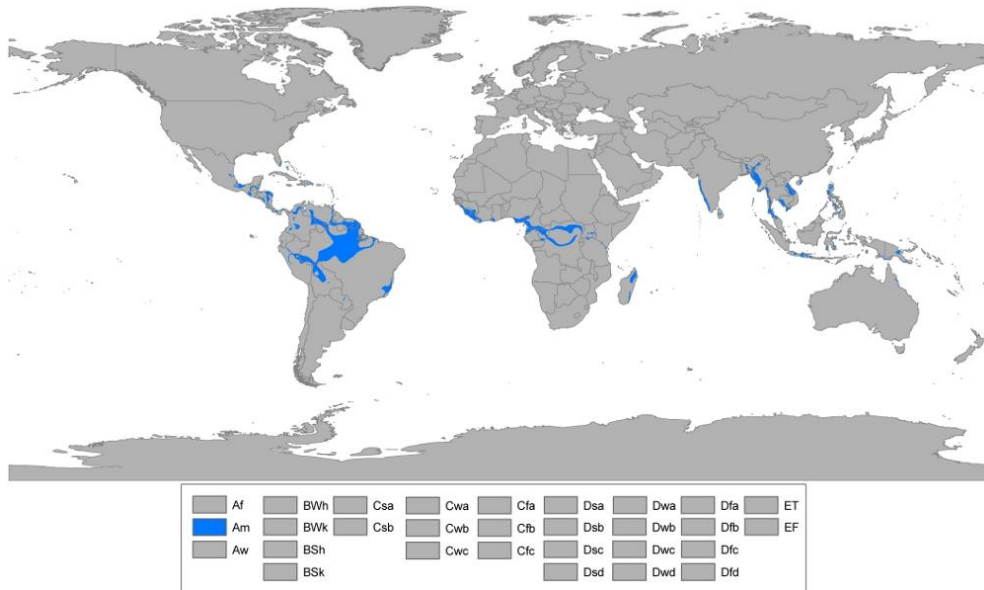


Figura 15: Mapa de clasificación climática mundial de Köppen-Geiger para climas húmedos tropicales: Selva Tropical, **Am** (Fuente: Kottek et al (2006))

Clima de Sabana Tropical (Aw): se caracterizan por:

- tienen la menor precipitación de los tres tipos de clima tropical húmedo, que van desde 600 a 1.000 mm de precipitación total por año;
- tienen una estación seca pronunciada durante el invierno; y
- los bosques cuentan con toldos abiertos y pastos dominantes con sistemas de raíces densos.⁵⁵



Figura 16: Zona climática **Aw**, suroeste de Uganda (Fuente: Voormeij, 2016).

⁵⁵ Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

Las sabanas tropicales se encuentran más comúnmente en América Central y América del Sur, Australia y el norte de África subsahariana. (Figura 17).⁵⁶

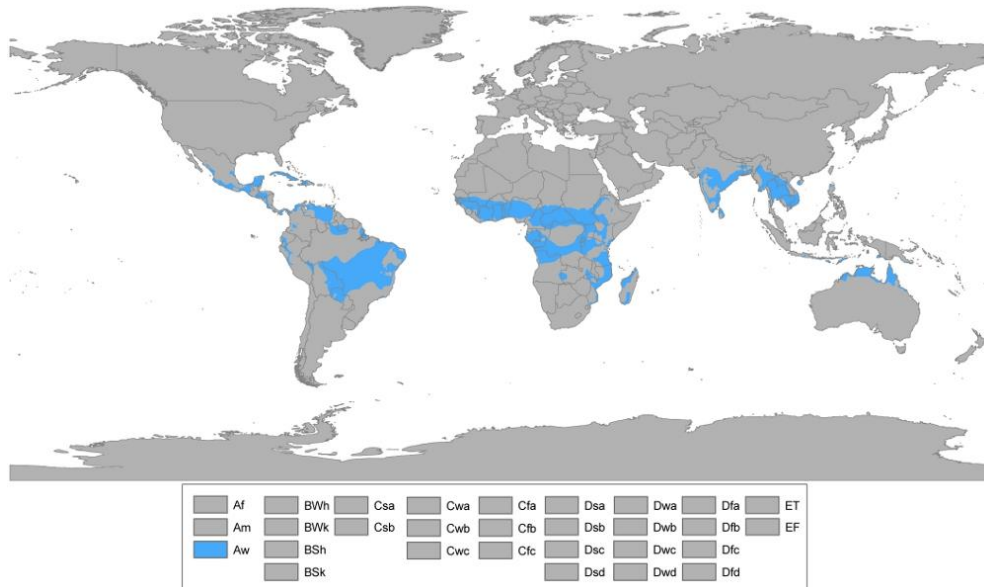


Figura 17: Mapa de clasificación climática mundial de Köppen-Geiger para climas húmedos tropicales: Selva Tropical, **Aw** (Fuente: Kottek et al (2006))

3.4.2.1 ZONACIÓN VERTICAL CLIMÁTICA

La zonación vertical del clima, zonación de suelos y vegetación existen en zonas de sierras aisladas, crestas empinadas y mesetas que se elevan bruscamente por encima del suelo del bosque en las zonas tropicales. Incrementos en altitud traen en consecuencia temperaturas más bajas y cambios en las precipitaciones. Los bosques de coníferas tropicales se producen por encima de la elevación de 1.000 m en lugares alrededor del mundo. Dominado por pinos, estos bosques cuentan con suelos ácidos y arenosos.⁵⁷

3.4.2.2 EL TRAZADO DE LLUVIA PARA DETERMINAR EL TIPO DE CLIMA Y LA ESTACIONALIDAD

Los datos de referencia climáticos a partir de cualquiera de las estaciones meteorológicas simples o sólidas son útiles en la preparación de estudios de impacto ambiental.

⁵⁶ Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

⁵⁷ Tomado traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

Con el uso de una estación meteorológica, se puede realizar el trazado de la precipitación total anual que indicará bajo qué tipo de zona de clima tropical esta el área del proyecto. La representación gráfica de la cantidad promedio de lluvia por cada mes mostrará la estacionalidad. Trazando el número de días secos al mes en un gráfico, puede ayudar a definir las estaciones secas y húmedas. (Figura 18 y Figura 19).⁵⁸

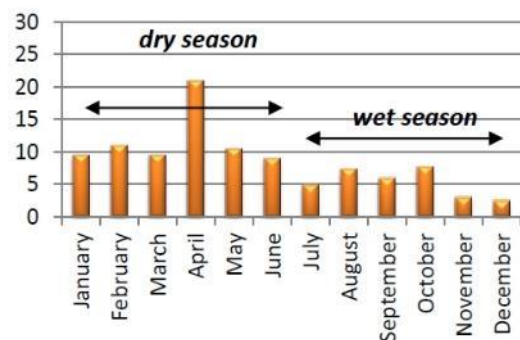
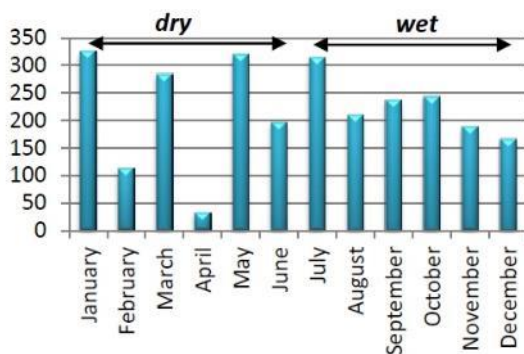



Figura 18: Distribución promedio de precipitación mensual (en mm totales) en una mina en Filipinas, en base a los datos recogidos en cinco estaciones separadas en más de dos años. La alta precipitación global de mayo se relaciona con una sola tormenta tropical, cuando 240 mm se vertieron en un solo día (Fuente: Voormeij, 2016).

Figura 19: Número de días secos en promedio por mes en una mina en Filipinas, que retrata mejor la estacionalidad que el trazado de las precipitaciones. Picos más altos presentan la estación seca, los picos bajos la estación húmeda (Fuente: Voormeij, 2016).

3.4.2.3 IMPORTANCIA DE LA DETECCIÓN DE TIPO DE ZONA CLIMÁTICA

El perfil de meteorización lateríticos característico de los paisajes tropicales está determinado en gran medida por factores climáticos; por ejemplo, una estación seca pronunciada es necesaria para una regolita meteorizada profunda. Saber con qué tipo de clima se está trabajando le dará una mano al reconocimiento de qué tipo perfil meteorizado de regolita esperar.

Los informes técnicos sobre proyectos mineros que son compatibles con las normas NI 43-101  incluirán información sobre las tendencias medias diarias y anuales de temperatura y precipitaciones, así como el calendario de las estaciones secas de la zona del proyecto.

Ser capaz de predecir cuándo la próxima estación seca llega ayudará en la planificación en la construcción de campamentos, el trabajo del acceso por carretera y reparación de puentes, determinar cuándo serán las mejores

⁵⁸ Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

ventanas para los estudios de campo. Entonces es útil por muchas razones logísticas.⁵⁹

3.4.3 HORIZONTES TROPICALES COMUNES

Las regiones tropicales experimentan climas cálidos y húmedos, con cambios pronunciados y predecibles entre humedad y estaciones secas. Con el tiempo geológico (decenas de millones de años), la meteorización de la roca madre expuesta al trópico produce el desarrollo de una corteza externa llamada regolita 📖. Espesores de esta regolita pueden alcanzar hasta 100 metros o más en los trópicos. La mayor parte de los paisajes tropicales actuales no han sido expuestos a la erosión glacial o glaciaciones y asociados de la superficie. Como resultado, esto es sobre todo regolita conservada y está directamente relacionada con el lecho de roca subyacente y cualquier mineralización contenido en el mismo.

La regolita laterítica 📖 típica de los paisajes tropicales se estima que cubre un tercio de la superficie terrestre del planeta (Figura 20). Compañías de todo tipo que involucre la modificación del terreno, se beneficiarán enormemente de la comprensión de esta regolita, ya que es este conjunto de suelos tiene un comportamiento particular gracias a su composición y al efecto de los factores ambientales.⁶⁰

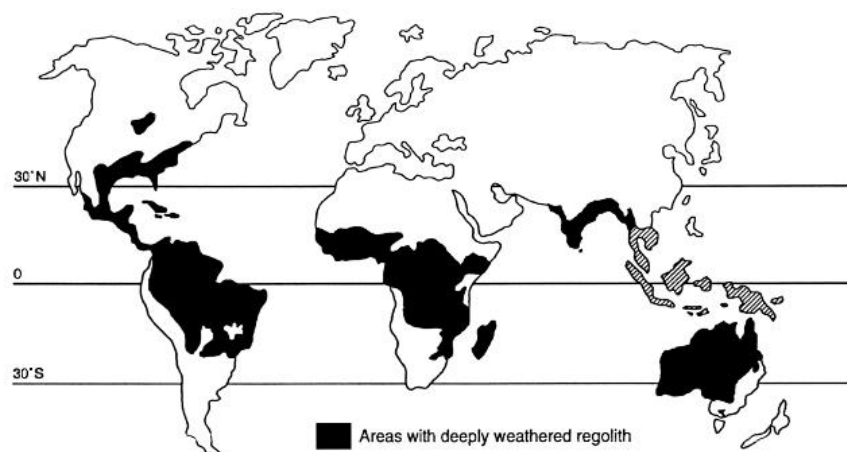


Figura 20: Distribución mundial de regolita profundamente meteorizada: en las áreas sombreadas, la meteorización profunda se presenta esporádicamente (Fuente: Smith et al 1997)

⁵⁹ Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

⁶⁰ Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

Los términos residual y tropical se usan indistintamente, pero en los últimos años se está utilizando con mayor frecuencia el término residual. La definición de “suelo residual” varía de un país a otro pero una definición razonable podría ser la de un suelo derivado por la meteorización y descomposición de la roca in situ, el cual no ha sido transportado de su localización original (Blight, 1997).⁶¹

Nota: Dado que es un tema extenso, a continuación, presentaré un resumen de los aspectos más importantes del horizonte tropical.

3.4.3.1 METEORIZACIÓN TROPICAL DE LA ROCA CAJA, CONCEPTOS BÁSICOS

Las superficies expuestas de la roca madre que se encuentran en paisajes tropicales pueden estar meteorizadas desde varios metros a más de un centenar de metros en profundidad. La meteorización química profunda es ayudada por las altas temperaturas constantes, fuertes lluvias, y lo más importante: los períodos de sequía estacional. Esto hace que el material de roca madre se rompa, los minerales se meteoricen y oxiden, y la matriz de la roca colapse. Bajando gradualmente en la secuencia, la superficie meteorizada de la roca sigue teniendo una corteza **residual** (en su lugar), llamado laterita.⁶²



Figura 21: La tierra roja es un rasgo característico de los paisajes tropicales, Sureste de Liberia (Fuente: Voormeij, 2016).

⁶¹ Tomado de: “Deslizamientos y estabilidad de taludes” ... J. Suárez.

⁶² Tomado y traducido de: “Gold Exploration in Tropical Landscapes”, D. Voormeij.

Laterita: es la costra residua característica, de color marrón rojizo producto de la erosión tropical de la roca madre. Entre el lecho de roca inalterada, dura y fresca en la profundidad y la corteza laterítica de la superficie que está estratificada en roca suave meteorizada, se incluyen (de abajo a arriba):

- saprock,
- saprolita,
- zona pálida,
- zona moteada, y
- Línea de piedra.

Un perfil de laterita es el término para una vista en sección transversal de este manto de roca erosionada químicamente. Estos perfiles se obtienen mediante la asignación de características geológicas reveladas en pozos o trincheras de laterita.⁶³

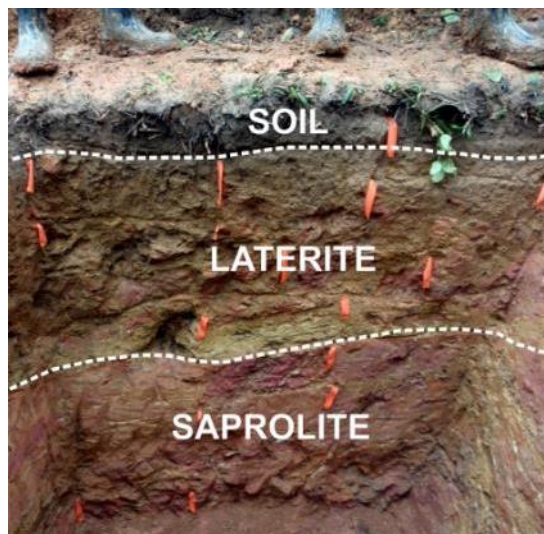


Figura 22: Suelos superficiales marrón oscuro encima de laterita amarillo-marrón en este perfil en América Central. La zona roja en la base de la fosa es saprolita. (Fuente: Voormeij, 2016).

Suelos tropicales: se forman en la parte superior de la corteza de laterita, e incluyen (en capas desde el tope/de la superficie hacia abajo/corteza laterítica):

- el horizonte **O**, que contiene los componentes orgánicos,
- el horizonte del suelo **A**, que es una zona de lixiviación; y
- el horizonte del suelo **B**, que es la zona de acumulación.⁶⁴

⁶³ Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

⁶⁴ Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

Los términos "suelos tropicales", "Latosoles", "laterita" y "suelos lateríticos" significan cosas muy diferentes para diferentes personas.

Los tres principales sistemas de clasificación de suelos tropicales en uso hoy en día son:

- Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) desde 1938, principalmente para América tropical, Hawái y Asia;
- ORSTROM francés enfocado en África occidental; y
- El sistema de Bélgica INEAC enfocada principalmente en el África congoleño.⁶⁵

Regolita: es el término para el lecho de roca erosionada, más el suelo que recubre, y cualquier arena transportada por el viento, o aluvial o coluvial, que descansa sobre ella. Una regolita laterítica completa consta (del lecho de roca a la superficie) de: saprock, saprolita, arcillas moteadas, residuo lateríticos incluyendo gravas nodulares y pisolíticas, líneas de piedra, y, en ocasiones, duricrust; y un barniz de suelos y espesor variable de material transportado.

Preservación de la regolita: cuando los procesos de meteorización son activos a una tasa que iguale o exceda la tasa de erosión, la regolita se mantiene intacta. Donde la erosión es superior a la tasa de meteorización tropical, zonas subyacentes están expuestas, creando un perfil de regolita truncada. Material depositado encima de un perfil truncado finalmente serán incorporados y los procesos de formación del suelo va a empezar de nuevo sobre la parte superior de los sedimentos depositados.

Lateritización: o el desarrollo de regolita laterita, es un proceso constante. La ruptura continua y el lavado de minerales en las rocas empuja hacia abajo el frente de meteorización en profundidad. Los minerales y las partículas resistentes a la descomposición se acumulan en el horizonte de laterita residual. La erosión física de la superficie blanda y quebradiza degradada con el tiempo hace que caiga el paisaje a un terreno suavemente ondulado.⁶⁶

Tasas de Intemperismo Tropicales: las tasas de formación de regolita laterita se pueden estimar por:

⁶⁵ Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

⁶⁶ Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

- conocimiento del régimen hidrológico, incluyendo la tabla de agua, la lluvia, y la porosidad; y
- pérdidas de elementos solubles por lixiviación.

Estos conjuntos de datos se introducen en los cálculos de balance de masa y el tiempo requerido para soportar un determinado espesor de roca se pueden determinar. Las tasas de roca a la intemperie para un número de litologías y climas van desde 5 a 50 metros/Millones de años. Debido a la disolución de minerales lateríticos y descenso, la tasa media de lateritización en rocas ultramáficas es de alrededor de 10 metros/Millones de años. Las tasas de erosión de las rocas se estiman en alrededor de dos a tres veces más rápido sobre rocas máficas y ultramáficas que sobre rocas graníticas.⁶⁷

3.4.3.2 ZONAS DE REGOLITA Y SUELOS

El proceso de meteorización lateríticos de la roca madre en climas tropicales resulta en la estratificación de la corteza exterior de la Tierra en numerosas de zonas. Estas zonas son lateralmente extensas y no todas las zonas enumeradas aquí están siempre presentes en la misma regolita. Las zonas se pueden repetir en un perfil o estar ausente por completo. Los contactos entre zonas pueden ser transitorios o agudos. Cada una de las zonas de la regolita pueden aflorar en superficie como resultado de la erosión de las unidades suprayacentes.⁶⁸

Desde la parte superior a la parte inferior, la regolita laterítica generalmente consiste en:

- depósitos superficiales,
- suelos,
- laterita,
- zona moteada
- saprolita, y
- saprock.

1. **Los depósitos superficiales (A)**: son materiales no consolidados a semi-consolidados y están compuestos por material transportado o arrastrado por

⁶⁷ Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

⁶⁸ Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

el viento, la cual constituye la cubierta residual que cubre la regolita laterítica. Estos están divididos en depósitos coluviales, volcado de material y depósitos aluviales/fluviales, descritos brevemente a continuación:

- **Depósitos coluviales:** son materiales degradados, pobremente clasificados transportados por gravedad, derivado de los deslizamientos de tierra, y por lo general se encuentran en la base de los taludes
- **El volcado del material** (dump material), tales como residuos de las actividades de la pequeña minería, la construcción de caminos de acceso y plataforma de perforación cubrirá localmente los horizontes superiores del suelo.
- **Depósitos aluviales/fluviales** son material transportado por quebradas, arroyos o ríos.⁶⁹

2. **Suelo:** es la zona más alta de la regolita, compuesto por:

- partículas minerales finas (aproximadamente 45%),
- aire (aprox. 25%),
- agua (aprox. 25%), y
- materia orgánica (aprox. 5%)

La formación de un suelo está influenciada por el clima, la topografía, la estabilidad tectónica, la vegetación, los organismos, material rocoso madre, y el tiempo. Los suelos varían con la topografía principalmente debido a la influencia de la humedad y la erosión. Suelos húmedos, mal drenados están ubicados en zonas bajas y depresiones del terreno. Los suelos en zonas inclinadas pueden ser más secos y bien drenado (Lawie (2007). La erosión puede quitar todo o parte del suelo, dejando los suelos poco desarrollados.⁷⁰

Los suelos pueden dividirse en horizontes superiores O y A, y un horizonte B inferior, con muchas más subdivisiones.

El horizonte O es superficial, orgánico, no-descompuesto y por lo general es sólo unos pocos centímetros de espesor.


El horizonte A se encuentra directamente debajo del horizonte O, y es delgada, marrón, arenoso y rocoso.

⁶⁹ Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

⁷⁰ Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

La parte superior del horizonte A todavía contiene mucha materia orgánica, pero en etapas de descomposición. La parte inferior del horizonte A tiene mucho menos materia orgánica y ha sufrido el máximo de lixiviación, que elimina elementos, tales como calcio y hierro, así como partículas de arcilla fina.

El horizonte B se encuentra debajo de los horizontes O y A, y es normalmente de color marrón oscuro a gris y se compone de arcilla y partículas de limo y humus, con una fina absorción de nutrientes a lo largo de las raicillas de las plantas. Es una zona de acumulación de material lixiviado.

El Spodosol (SP) es un horizonte A grueso y pálido, que ocurre donde los suelos son ácidos y donde las trazas de elementos o metales han sido fuertemente lixiviadas, dejando atrás una capa arenosa rica en cuarzo. Típica de los bosques de coníferas en los climas templados o fríos, el spodosol también se puede formar en las zonas tropicales en zonas de condiciones extremadamente ácidas. También se pueden formar encima de una saprolita expuesta en una regolita truncada. Estos son comúnmente Spodosoles blancos y se pueden formar grandes llanuras planas que se asemejan a los sedimentos fluviales, sin estructuras sedimentarias. El proceso de **podzolización**  se cree que ocurre a un ritmo agresivo.⁷¹

3. **Laterita (LAT)**: es la corteza residual exterior de la roca madre meteorizada que está expuesta a las condiciones climáticas tropicales. Laterita es:

- de color naranja a rojo intenso;
- heterogénea; y
- masiva, nodular, o de grava en la textura.

Mientras que la laterita no conserva la estructura de la roca madre, la litología matriz controla la composición y propiedades de la laterita.

4. **Línea de Piedra (SL)**: es un horizonte residual e illuvial compuesto de fragmentos de tamaño grava de material resistente, que flotan en la matriz de laterita masiva. Las líneas de piedra se pueden clasificar de acuerdo con el material dominante del que se derivan los fragmentos. El material que comprende una línea de piedra puede ser:⁷²

⁷¹ Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

⁷² Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

- restos de la erosión de laterita;
 - fragmentos de veta de cuarzo corroídos;
 - ocasionalmente cuarzo y otros cristales minerales resistentes a partir del material de veta;
 - Material detrítico/aluvial transportado por la erosión de las aguas torrenciales; o
 - artefactos dejados en la superficie por gente de los tiempos prehistóricos.⁷³
5. **La zona moteada (MZ)**: se compone de parches y/o franjas o rayas de color rojo (óxidos de hierro) en una matriz de arcilla caolín blanca y suave. La meteorización en el horizonte de zona moteada está marcada tanto por una reducción del volumen como por una fuerte reorganización de la textura. La acumulación de hierro se inicia en la zona moteada con el desarrollo de manchas ferruginosas que se vuelven más abundantes y más endurecidas hacia la parte superior de la zona.
6. **Saprolita (SAP)**: en el horizonte de saprolita, la meteorización es un proceso isovolumétrico; los minerales primarios son pseudo-morfológicamente reemplazados por productos de la meteorización, al tiempo que conserva la estructura de la roca madre. La saprolita es: suave, sedosa al tacto, y se rompen fácilmente o se amasa.
La saprolita a menudo se divide, según el grado de descomposición de minerales y porosidad, en una saprolita inferior (LSAP) y más rica en arena y una saprolita superior (USAP) más rica en arcilla.
7. **Saprock (SPRK)**: es roca ligeramente meteorizada que no se puede romper en la mano y retiene la matriz de la roca madre. Menos del 20% de los minerales primarios han sido alteradas hacia arcillas. El saprock se encuentra en la superficie de la roca fresca y no es típicamente una zona muy gruesa, graduando rápidamente a roca fresca.⁷⁴

En las siguientes figuras se pueden observar las representaciones de estos horizontes.

⁷³ Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

⁷⁴ Tomado y traducido de: "Gold Exploration in Tropical Landscapes", D. Voormeij.

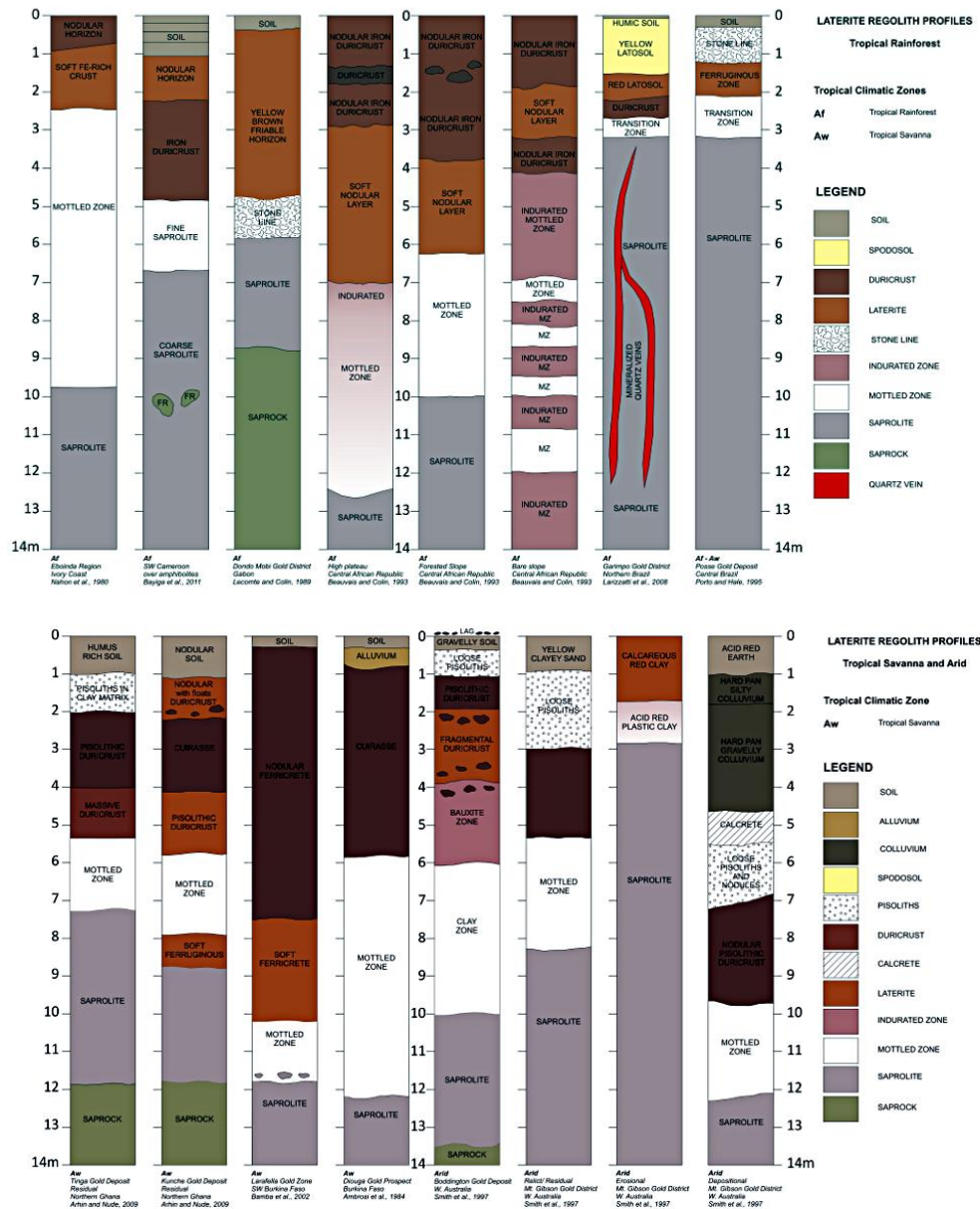


Figura 23: Perfiles de regolita estudiados en la literatura, que proporcionan espesores de las zonas (Fuente y compilación de: D. Voormeij).

3.5 CARACTERIZACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS

Previamente a la profundización en el estudio del comportamiento de los taludes en zonas tropicales, se requiere establecer una serie de pautas en lo referente a nomenclatura y clasificación. Para ello en la literatura se encuentran dos sistemas de clasificación propuestos por Hutchinson (1968) y por Varnes (1958 y 1978).⁷⁵ Este último sistema fue actualizado por Cruden y Varnes en el “Special

⁷⁵ Tomado de: “Deslizamientos y estabilidad de taludes” ... J. Suárez.

Report 247” del Transportation Research Board de los Estados Unidos (1996) y es el sistema que se utiliza en el presente texto; Sin embargo, a esta clasificación se agregaron algunos factores importantes, entre ellos la diferenciación entre los procesos de deterioro y los de deslizamiento, pero en términos generales se mantuvieron los principios básicos de la clasificación del Transportation Research Board.⁷⁶

3.5.1 NOMENCLATURA DE UN TALUD O LADERA

Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana, sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente (Figura 24).⁷⁷

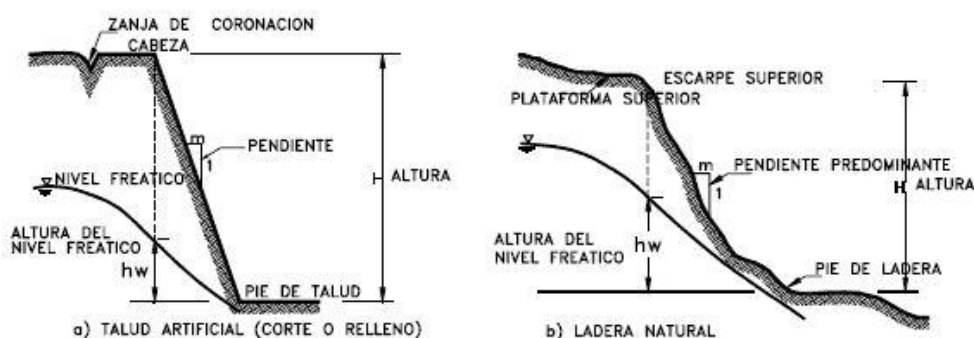


Figura 24: Nomenclatura de taludes y laderas (Fuente: Suárez, 1998)

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

1. **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.
2. **Pie:** corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
3. **Cabeza o escarpe:** se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.
4. **Altura de nivel freático:** distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.

⁷⁶ Tomado de: “Deslizamientos y estabilidad de taludes” ... J. Suárez.

⁷⁷ Tomado de: “Deslizamientos y estabilidad de taludes” ... J. Suárez.

5. 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. Ejemplo: Pendiente: 45o, 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.⁷⁸

3.5.2 NOMENCLATURA DE LOS PROCESOS DE MOVIMIENTO

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 otros se mueven hacia abajo.

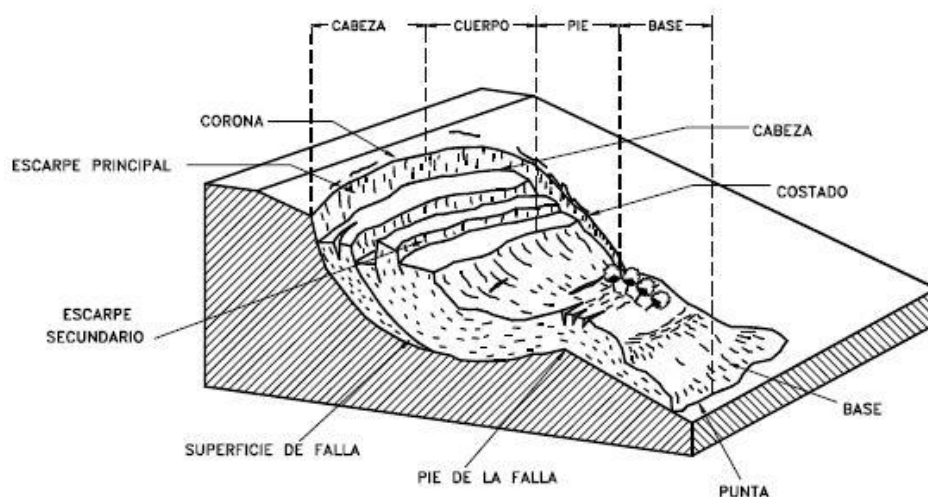


Figura 25: Nomenclatura de un deslizamiento. (Fuente: Suárez, 1998)

En la [Figura 25](#) se muestra un deslizamiento o movimiento en masa típico, con sus diversas partes cuya nomenclatura es la siguiente:⁷⁹

1. Escarpe principal: corresponde a una superficie muy inclinada a lo largo de la periferia del área en movimiento, causado por el desplazamiento del

⁷⁸ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

⁷⁹ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

material fuera del terreno original. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material forma la superficie de falla.

2. **Escarpe secundario:** es una superficie muy inclinada producida por desplazamientos diferenciales dentro de la masa que se mueve.
3. **Cabeza:** las partes superiores del material que se mueve a lo largo del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
4. **Cima:** el punto más alto del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
5. **Corona:** el material que se encuentra en el sitio, prácticamente inalterado y adyacente a la parte más alta del escarpe principal.
6. **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.
7. **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.
8. **Base:** el área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.
9. **Punta o uña:** el punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.
10. **Costado o flanco:** un lado (perfil lateral) del movimiento.
11. **Superficie original del terreno:** la superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.
12. **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.⁸⁰

⁸⁰ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

3.5.3 DIMENSIONES

Para definir las dimensiones de un movimiento se utiliza la terminología recomendada por el IAEG⁸¹ (Figura 26):⁸²

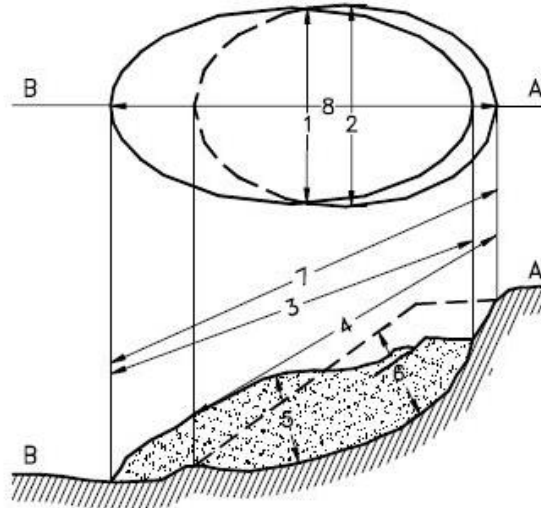


Figura 26: Dimensiones de los movimientos en masa de acuerdo a IAEG Commission on Landslides (1990). (Fuente: Suárez, 1998)

1. **Ancho de la masa desplazada W_d** : ancho máximo de la masa desplazada perpendicularmente a la longitud, L_d .
2. **Ancho de la superficie de falla W_r** : ancho máximo entre los flancos del deslizamiento perpendicularmente a la longitud L_r .
3. **Longitud de la masa deslizada L_d** : distancia mínima entre la punta y la cabeza.
4. **Longitud de la superficie de falla L_r** : distancia mínima desde el pie de la superficie de falla y la corona.
5. **Profundidad de la masa desplazada D_d** : máxima profundidad de la masa movida perpendicular al plano conformado por W_d y L_d
6. **Profundidad de la superficie de falla D_r** : máxima profundidad de la superficie de falla con respecto a la superficie original del terreno, medida perpendicularmente al plano conformado por W_r y L_r .
7. **Longitud total L** : distancia mínima desde la punta a la corona del deslizamiento.⁸³

⁸¹ IAEG: *International Association of Engineering Geology*.

⁸² Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

⁸³ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

8. Longitud de la línea central L_{cf} : distancia desde la punta o uña hasta la corona del deslizamiento a lo largo de puntos sobre la superficie original equidistantes de los bordes laterales o flancos.

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 éste 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%.⁸⁴

3.5.4 ETAPAS EN EL PROCESO DE FALLA

La clasificación de deslizamientos pretende describir e identificar los cuerpos que están en movimiento relativo. Las clasificaciones existentes son esencialmente geomorfológicas y solamente algunas de ellas introducen consideraciones mecánicas o propiamente geológicas.

Las caracterizaciones geotécnicas son necesarias y por esta razón, las clasificaciones eminentemente topográficas y morfológicas, como las propuestas por Varnes (1978), Hutchinson (1988), etc., deben adaptarse a las condiciones verdaderas de los movimientos.

En este orden de ideas se deben considerar cuatro etapas diferentes en la clasificación de los movimientos:

- a. Etapa de deterioro o antes de la falla donde el suelo es esencialmente intacto.
- b. Etapa de falla caracterizada por la formación de una superficie de falla o el movimiento de una masa importante de material.
- c. 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.
- d. La etapa de posible reactivación en la cual pueden ocurrir movimientos que pueden considerarse como una nueva falla, e incluye las tres etapas anteriores.⁸⁵

⁸⁴ Tomado de: “Deslizamientos y estabilidad de taludes” ... J. Suárez.

⁸⁵ Tomado de: “Deslizamientos y estabilidad de taludes” ... J. Suárez.

3.5.5 PROCESOS EN LA ETAPA DE DETERIORO

El deterioro, con el tiempo puede dar lugar a la necesidad de mantenimiento o construcción de obras de estabilización. Al deterioro, sin embargo, se le da muy poca atención en el momento del diseño y el énfasis se dirige a evitar las fallas profundas, más que a evitar los fenómenos anteriores a la falla.

Cuando un talud se corta, para la construcción de una vía o de una obra de infraestructura, ocurre una relajación de los esfuerzos de confinamiento y una exposición al medio ambiente, cambiándose la posición de equilibrio por una de deterioro acelerado.

El deterioro comprende la alteración física y química de los materiales y su subsecuente desprendimiento o remoción. Este incluye la alteración mineral, los efectos de relajación y la abrasión. La iniciación y propagación de fracturas es de significancia particular en la destrucción de la superficie que puede conducir a caídos de roca o colapso del talud.

La clasificación de los modos comunes de deterioro fue propuesta por Nicholson y Hencher (1997), pero en el presente texto se amplió con el objeto de incluir la mayoría de los procesos que ocurren previamente a la falla masiva.⁸⁶

1. **Caída de granos:** consiste en la caída de granos individuales de la masa de roca con desintegración. Depende de la resistencia de las uniones intergranulares y las microgrietas relacionadas con los granos.
2. **Descaramiento:** caída de cáscaras de material de la masa de roca. Las cáscaras tienen forma de láminas con una dimensión significativamente menor a las otras dos dimensiones. Puede reflejar la litología, fisilidad, o puede reflejar la penetración de la meteorización.
3. **Formación, inclinación y caída de rocas:** se forman prismas o pequeñas placas con dimensión mínima de 50 mm, pudiendo existir deslizamiento y rotación o pandeo. Generalmente, las fracturas a tensión paralelas a la superficie del talud son prerequisite para su ocurrencia, seguidas por la pérdida de soporte.
4. **Caídos de bloques:** pueden caer por gravedad, en forma ocasional bloques individuales de roca de cualquier dimensión, produciendo un deterioro en la

⁸⁶ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

estructura del talud. La amenaza es difícil de predecir debido al gran rango de tamaños que pueden caer y especialmente los bloques grandes pueden causar daño estructural. En ocasiones bajan saltando y rodando y pueden caminar grandes distancias. Estos caídos corresponden a los caídos de roca en la clasificación general de movimientos en taludes.

5. **Desmoronamiento del talud:** se produce por la caída de bloques de diversas dimensiones en forma semi-continua. Puede causar una amenaza significativa y crear grandes acumulaciones de detritos en el pie del talud.
6. **Caídos de roca:** la caída de muchos bloques de roca “en un solo evento” requiere que haya ocurrido un debilitamiento de la masa de roca, debido a la fragmentación y a la ausencia de soporte lateral. El volumen de la falla depende de los diversos planos de discontinuidad y puede cubrir en un solo momento varios planos (falla en escalera).⁸⁷
7. **Lavado superficial o erosión:** la erosión es el desprendimiento, transporte y deposición de partículas o masas pequeñas de suelo o roca, por acción de las fuerzas generadas por el movimiento del agua. El flujo puede concentrarse en canales produciendo surcos y cárcavas. Las gotas de lluvia pueden contribuir al desprendimiento de las partículas o granos. Puede producir sedimentación de materiales en el pie del talud. Pueden dividirse en: erosión laminar, erosión en surcos, erosión en cárcavas, erosión interna (piping), erosión por afloramiento de agua.
8. **Flujo de detritos:** el desprendimiento y transporte de partículas gruesas y finas en una matriz de agua y granos en forma de flujo seco o saturado. Los flujos de detritos son impredecibles, mueven grandes volúmenes de material y pueden crear una amenaza moderada a alta.
9. **Colapso:** Bloques independientes de gran tamaño colapsan debido a la falta de soporte vertical. El tamaño de los bloques es de más de 500 mm e incluyen los taludes negativos (overhangs). Representa una escala grande de amenaza, de acuerdo a su tamaño y potencial de colapso.⁸⁸

⁸⁷ Tomado de: “Deslizamientos y estabilidad de taludes” ... J. Suárez.

⁸⁸ Tomado de: “Deslizamientos y estabilidad de taludes” ... J. Suárez.

- 10. Disolución:** la disolución de materiales solubles en agua que puede ser acelerado por las condiciones locales, especialmente la presencia de aguas agresivas. Puede producir cavidades internas que podrían colapsar o formar cárcavas karsticas.
- 11. Expansión y contracción:** en los suelos arcillosos se producen cambios de volumen por cambios de humedad asociados con el potencial de succión del material. Estas expansiones y contracciones producen agrietamientos y cambios en la estructura del suelo generalmente, con pérdida de la resistencia al cortante.
- 12. Agrietamiento cosísmico:** los eventos sísmicos pueden producir agrietamientos especialmente en los materiales rígidos y frágiles. Los agrietamientos cosísmicos debilitan la masa de talud y generan superficies preferenciales de falla. El agrietamiento cosísmico es menor cuando existe buen refuerzo sub-superficial con raíces de la cobertura vegetal.
- 13. Deformaciones por concentración de esfuerzos y fatiga:** Los materiales al estar sometidos a esfuerzos de compresión o cortante sufren deformaciones, las cuales aumentan con el tiempo en una especie de fatiga de los materiales de suelo o roca.
- 14. Agrietamiento por tensión:** La mayoría de los suelos poseen muy baja resistencia a la tensión y la generación de esfuerzos relativamente pequeños, (especialmente arriba de la cabeza de los taludes y laderas), puede producir grietas de tensión, las cuales facilitan la infiltración de agua y debilitan la estructura de la masa de suelo permitiendo la formación de superficies de falla.⁸⁹

⁸⁹ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

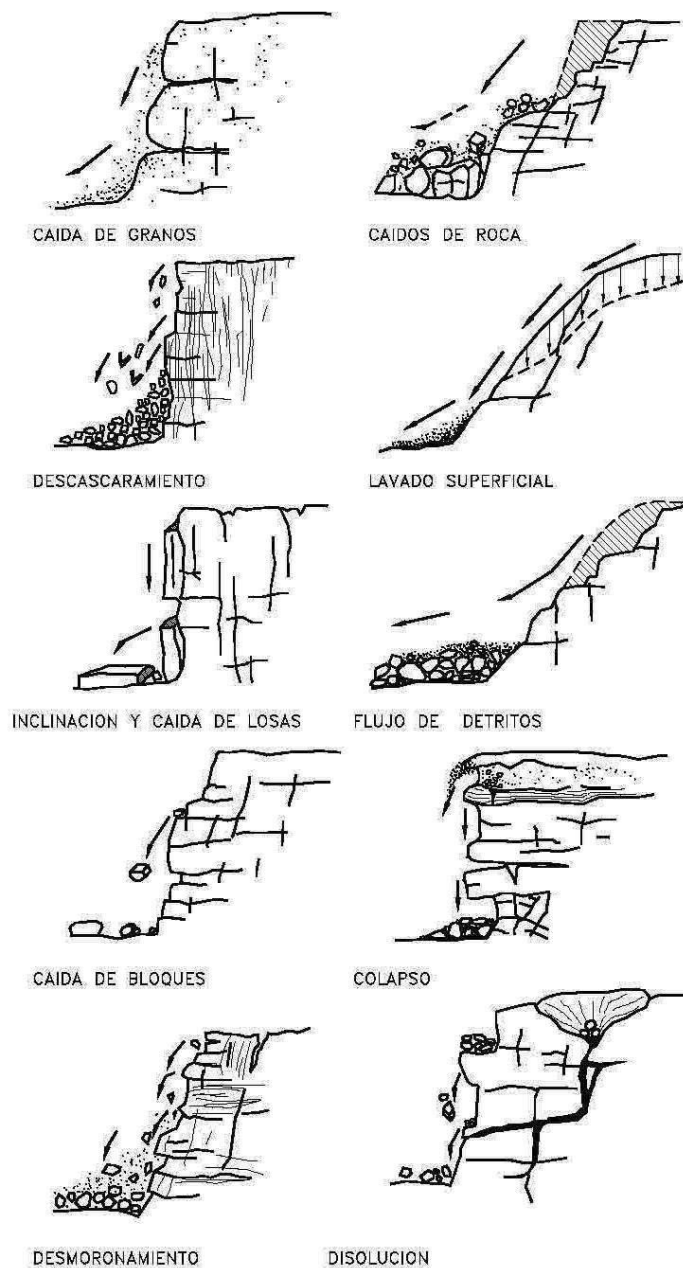


Figura 27: Procesos de deterioro en macizos rocosos (Fuente: Nicholson y Hencher ,1997).

3.5.6 CLASIFICACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA


Para la clasificación de los movimientos en masa se presenta el sistema propuesto originalmente por Varnes (1978), el cual tipifica los principales tipos de movimiento.⁹⁰ Algunos de estos movimientos están incluidos en la clasificación de los procesos de deterioro previos a un deslizamiento y es difícil

⁹⁰ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

identificar cuando son procesos de deterioro y cuando son componentes principales del movimiento del talud.⁹¹

La clasificación de los deslizamientos basados en Varnes 1978, tienen dos términos:

- El primero describe el tipo de material
- El segundo describe el tipo de movimiento

Los tipos de material usados para este esquema son: roca, tierra, suelo, lodo y escombros (debris) .

Los cinco tipos de movimiento cinemáticamente distintos se describen en la secuencia: caídas, volcamientos, deslizamientos, corrimiento lateral, flujos.⁹²

Combinando estos términos se pueden obtener las clasificaciones de la tabla siguiente:

Tabla 1: Clasificación de los movimientos de masa en taludes (Resumen desde Varnes, 1978, traducido 2019)

| TIPO DE MOVIMIENTO | | | TIPO DE MATERIAL | | | |
|---------------------------|--------------|-----------|---|------------------------------------|-----------------------------|--|
| | | | ROCA CAJA | SUELOS EN INGENIERÍA | | |
| | | | | Grueso predominante | Fino predominante | |
| CAÍDAS Y DESPRENDIMIENTOS | | | Caída de rocas | Desprendimientos de detritos | Desprendimientos de tierra | |
| VOLCAMIENTOS | | | Volcamiento de rocas | Volcamientos de detritos | Volcamientos de tierra | |
| DESLIZAMIENTOS | ROTACIONAL | PROFUNDOS | Roca deslizada en bloques | Detritos deslizados en bloques | Tierra deslizada en bloques | |
| | TRASLACIONAL | SOMEROS | Deslizamientos de roca | Deslizamientos de detritos | Deslizamientos de tierra | |
| CORRIMIENTO LATERAL | | | Corrimientos de roca | Corrimientos de detritos | Corrimiento de tierra | |
| FLUJOS | | | Flujos de roca (Deep creep) | Flujos de detritos (Soil creep) | Flujos de tierra | |
| COMPLEJOS | | | Combinación de dos o más tipos principales de movimientos | | | |

⁹¹ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

⁹² Tomado y traducido de: "Varnes Landslide Classification", J. Novotný.

1. **Caídas:** Son movimientos bruscos de masas de materiales geológicos, tales como rocas y cantos rodados, que se desprenden de pendientes empinadas o acantilados. La separación se produce a lo largo de las discontinuidades, como fracturas, articulaciones y planos de discontinuidad, y el movimiento se produce por caída libre, rebote y balanceo. Las caídas están fuertemente influenciadas por la gravedad, la intemperie mecánica y la presencia de agua intersticial.⁹³



Figura 28: Caídas (Fall, Rockfall) (Fuente: Jan Novotný, según Vernes 1978).

2. **Volcamientos:** Las fallas de vuelco se distinguen por la rotación hacia adelante de una unidad o unidades alrededor de algún punto de pivote, por debajo o por debajo de la unidad, bajo las acciones de la gravedad y las fuerzas ejercidas por unidades adyacentes o por fluidos en las grietas.

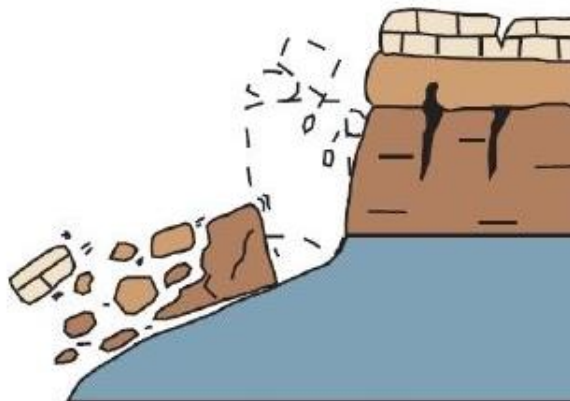


Figura 29: Volcamientos (Topples) (Fuente: Jan Novotný, según Vernes 1978).

⁹³ Tomado y traducido de: "Varnes Landslide Classification", J. Novotný.

3. **Deslizamientos:** Aunque muchos tipos de movimientos en masa están incluidos en el término general "deslizamiento de tierra", el uso más restrictivo del término se refiere solo a movimientos en masa, donde existe una zona de debilidad distinta que separa el material de deslizamiento del material subyacente más estable. Los dos tipos principales de deslizamientos son los de rotación y los de traslación.⁹⁴

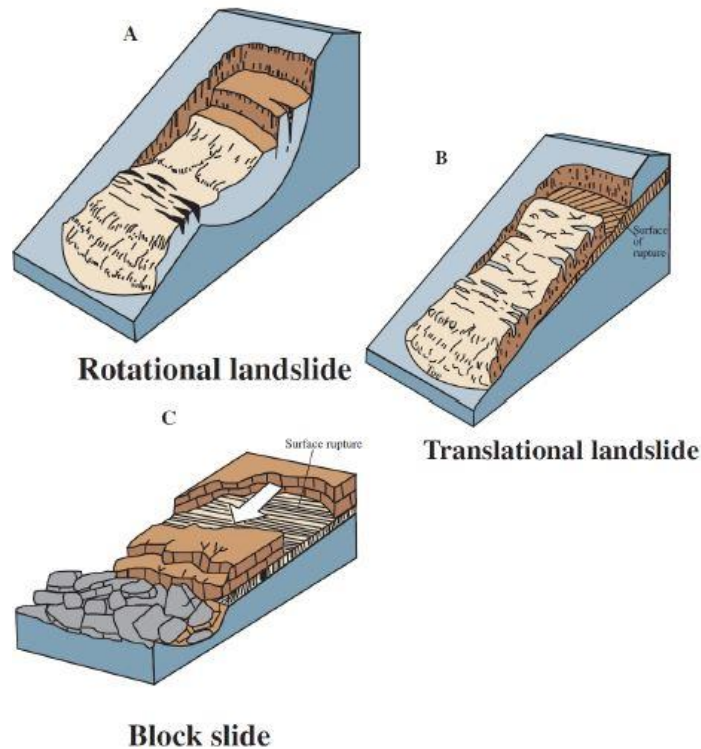


Figura 30: Deslizamientos (Slides) a) Deslizamientos rotacionales, b) deslizamientos traslacionales, c) deslizamientos de bloques. (Fuente: Jan Novotný, según Varnes 1978).

4. **Corrimiento lateral:** son distintivos porque generalmente ocurren en pendientes muy suaves o en terrenos planos. El modo de movimiento dominante es la extensión lateral acompañada de fracturas por cizallamiento o tracción. La falla es causada por la licuefacción, el proceso por el cual los sedimentos saturados, sueltos y sin cohesión (generalmente arenas y limos) se transforman de un estado sólido a un estado licuado. La falla generalmente se desencadena por un movimiento rápido del suelo, como el que se experimenta durante un terremoto, pero también puede ser inducido artificialmente. Cuando el material coherente, ya sea lecho de roca

⁹⁴ Tomado y traducido de: "Varnes Landslide Classification", J. Novotný.

o suelo, se apoya en materiales que se licuan, las unidades superiores pueden sufrir fracturas y extensiones y luego pueden disminuir, trasladarse, rotar, desintegrarse o licuarse y fluir. La propagación lateral en materiales de grano fino en pendientes poco profundas suele ser progresiva. El fallo comienza repentinamente en un área pequeña y se propaga rápidamente. A menudo, el fallo inicial es un desplome, pero en algunos materiales el movimiento ocurre sin ninguna razón aparente.⁹⁵

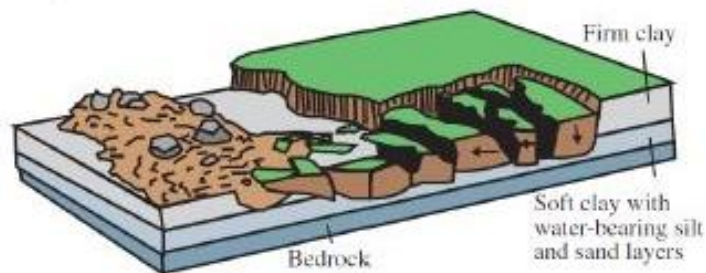


Figura 31: Corrimiento lateral (lateral spreads) (Fuente: Jan Novotný, según Varnes 1978).

5. Flujos: Hay cinco categorías básicas de flujos que difieren entre sí en aspectos fundamentales.

- a. **Flujo de escombros:** es una forma de movimiento masivo rápido en el que una combinación de tierra suelta, roca, materia orgánica, aire y agua se moviliza como una suspensión que fluye cuesta abajo. Los flujos de escombros incluyen <50% de finos. Generalmente son causados por un intenso flujo de agua superficial, debido a la fuerte precipitación o el rápido derretimiento de la nieve, que erosiona y moviliza suelo suelto o roca en pendientes pronunciadas.⁹⁶

⁹⁵ Tomado y traducido de: "Varnes Landslide Classification", J. Novotný.

⁹⁶ Tomado y traducido de: "Varnes Landslide Classification", J. Novotný.

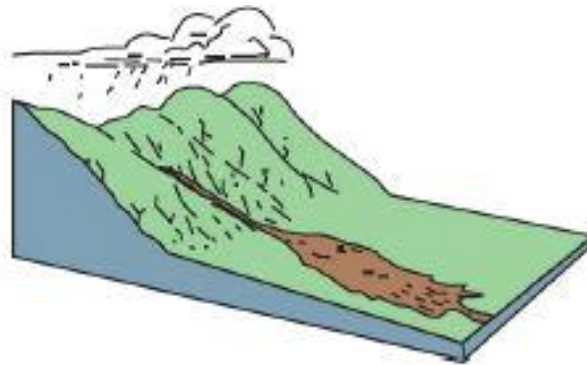


Figura 32: Flujo de escombros (Debris flow) (Fuente: Jan Novotný, según Vernes 1978).

- b. **Avalancha de escombros:** esta es una variedad de flujo de escombros muy rápido a extremadamente rápido.
- c. **Flujo de tierra:** tienen una forma característica de "reloj de arena". El material del talud se licua y fluye, formando un cuenco o depresión en la cabeza. El flujo en sí mismo es alargado y generalmente ocurre en materiales de grano fino o rocas portadoras de arcilla en pendientes moderadas y en condiciones saturadas. Sin embargo, también son posibles flujos secos de material granular.
- d. **Flujo de lodo:** es un flujo de tierra que consiste en un material que está lo suficientemente húmedo como para fluir rápidamente y que contiene al menos un 50 por ciento de partículas del tamaño de arena, limo y arcilla. En algunos casos, por ejemplo, en muchos informes de periódicos, los flujos de lodo y los flujos de escombros se denominan comúnmente "deslizamientos de lodo".⁹⁷

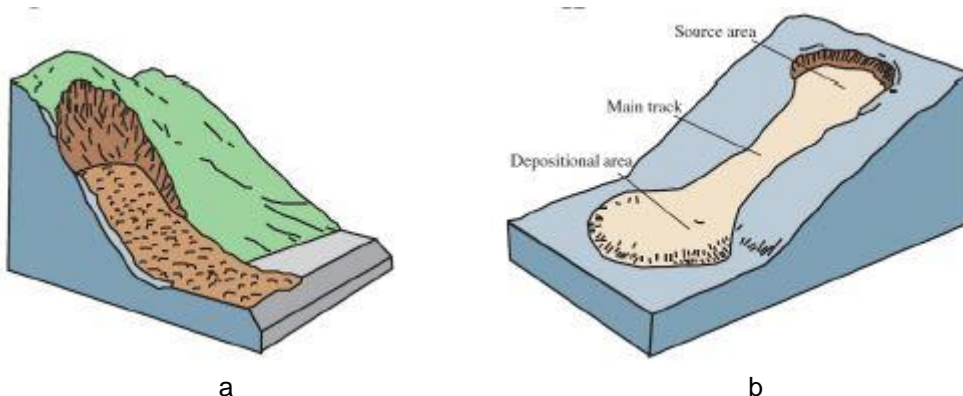


Figura 33: a) Avalancha de escombros, b) flujos de tierra (Debris avalanche, earthflow) (Fuente: Jan Novotný, según Vernes 1978).

⁹⁷ Tomado y traducido de: "Varnes Landslide Classification", J. Novotný.

e. **Arrastramiento:** es el movimiento imperceptiblemente lento, constante y descendente de la roca o el suelo en pendiente. El movimiento es causado por la tensión de corte suficiente para producir una deformación permanente, pero demasiado pequeña para producir una falla de corte. En general, hay tres tipos de fluencia: (1) estacional, donde el movimiento se encuentra dentro de la profundidad del suelo afectado por cambios estacionales en la humedad y la temperatura del suelo; (2) continua, donde la tensión de corte excede continuamente la resistencia del material; (3) progresiva, donde los taludes están llegando al punto de falla como otros tipos de movimientos de masa. La fluencia se indica mediante troncos de árboles curvados, cercas dobladas o muros de contención, postes inclinados o cercas y pequeñas ondulaciones o crestas del suelo.⁹⁸

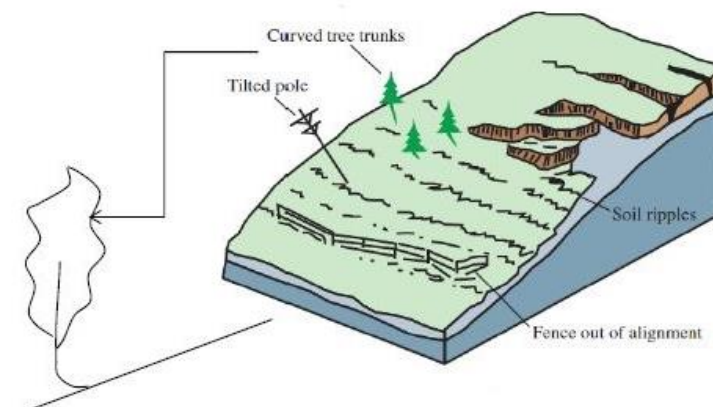


Figura 34: Arrastramiento (Creep) (Fuente: Jan Novotný, según Vernes 1978).

6. **Complejos:** La combinación de dos o más de los tipos anteriores se conoce como un derrumbe complejo. Ver Anexo 1.

3.5.7 CARACTERIZACIÓN DEL MOVIMIENTO

Adicionalmente al tipo de movimiento es importante definir las características que posee en cuanto a secuencia, estado de actividad, estilo, velocidad, humedad y material.⁹⁹

⁹⁸ Tomado y traducido de: "Varnes Landslide Classification", J. Novotný.

⁹⁹ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

1. Tipo de material

Los términos siguientes han sido adoptados como descripción de los materiales que componen un determinado movimiento del talud.

- a. **Roca:** se denomina “Roca” a la roca dura y firme que estaba intacta en su lugar antes de la iniciación del movimiento.
- b. **Residuos:** se denomina con el nombre de Residuos o “Detritos” al suelo que contiene una significativa proporción de material grueso. Se considera que, si más del 20% del material en peso es mayor de 2 milímetros de diámetro equivalente, debe llamarse como Residuos. Por lo general, deben existir partículas mucho mayores de 2 milímetros para que pueda considerarse de este modo.
- c. **Tierra:** se denomina tierra, al material de un deslizamiento que contiene más del 80% de las partículas menores de 2 milímetros. Se incluyen los materiales desde arenas a arcillas muy plásticas.¹⁰⁰

2. Humedad

Se proponen cuatro términos para definir las condiciones de humedad así:

- a. **Seco:** no contiene humedad “visible”.
- b. **Húmedo:** contiene algo de agua, pero no posee agua (corriente) libre y puede comportarse como un sólido plástico, pero no como un líquido.
- c. **Mojado:** contiene suficiente agua para comportarse en parte como un líquido y posee cantidades visibles de agua que pueden salir del material.
- d. **Muy mojado:** contiene agua suficiente para fluir como líquido, aún en pendientes bajas.

3. Secuencia de repetición

La secuencia se refiere a movimientos que inician en un área local y progresan o se repiten en una determinada dirección. Varnes (1978) recomienda utilizar la siguiente terminología:¹⁰¹

- a. **Progresivo:** la superficie de falla se extiende en la misma dirección del movimiento.

¹⁰⁰ Tomado de: “Deslizamientos y estabilidad de taludes” ... J. Suárez.

¹⁰¹ Tomado de: “Deslizamientos y estabilidad de taludes” ... J. Suárez.

- b. **Retrogresivo:** la superficie de falla se extiende en dirección opuesta al movimiento.
- c. **Ampliándose:** la superficie de falla se extiende hacia una u otra de las márgenes laterales.
- d. **Alargándose:** la superficie de falla se alarga agregando continuamente volumen de material desplazado. La superficie de falla puede alargarse en una o más direcciones. El término alargándose puede utilizarse indistintamente con el término progresivo.
- e. **Confinado:** se refiere a movimientos que tienen un escarpe visible pero no tienen superficie de falla visible en el pie de la masa desplazada.
- f. **Disminuyendo:** el volumen de material siendo desplazado, disminuye con el tiempo.¹⁰²

4. Velocidad del movimiento

En el Anexo 2 se indica la escala de velocidades de movimientos propuestas por el Transportation Research Board de USA, la cual se puede considerar como escala única de rata de movimiento. En algunos casos, ocurren velocidades diferentes de los diversos modos de movimiento y se requiere definir cada uno de ellos. La velocidad del movimiento tiene gran influencia sobre el poder destructivo de un deslizamiento. Generalmente, los deslizamientos extremadamente rápidos corresponden a catástrofes de gran violencia, ocasionalmente con muchos muertos y cuyo escape es poco probable.

Por otro lado, los movimientos extremadamente lentos son imperceptibles sin instrumentos y representan, en general un riesgo muy bajo de pérdida de vidas humanas.¹⁰³

5. Estilo

Varnes estableció una nomenclatura de actividad de deslizamiento cuando aparecen conjuntamente diferentes tipos de movimiento:

- a. **Complejo:** es aquel que tiene al menos dos tipos de movimiento, por ejemplo, inclinación y deslizamiento.

¹⁰² Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

¹⁰³ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

- b. **Compuesto:** corresponde al caso en el cual ocurren simultáneamente varios tipos de movimiento en diferentes áreas de la masa desplazada.
- c. **Múltiple:** se denomina como múltiple un deslizamiento que muestra movimientos repetidos del mismo tipo ([Figura 35](#)), generalmente, ampliando la superficie de falla. Un movimiento sucesivo corresponde a movimientos repetidos pero que no comparten la misma superficie de falla.
- d. **Sencillo:** corresponde a un solo tipo de movimiento.¹⁰⁴

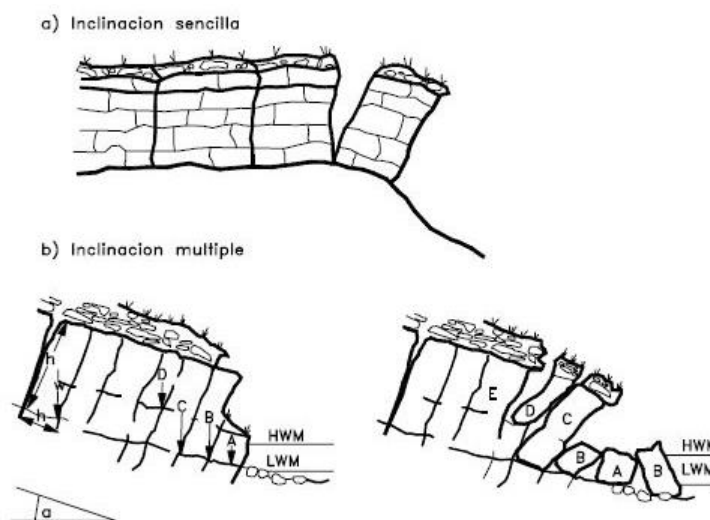


Figura 35: Inclinaciones sencillas y múltiples (Fuente: J. Suárez, de Cruden, Varnes 1996).

6. Estado de actividad

- a. **Activo:** deslizamiento que se está moviendo en los actuales momentos.
- b. **Reactivado:** movimiento que está nuevamente activo, después de haber estado inactivo. por ejemplo, deslizamientos reactivados sobre antiguas superficies de falla.
- c. **Suspendido:** deslizamientos que han estado activos durante los últimos ciclos estacionales pero que no se está moviendo en la actualidad.
- d. **Inactivo:** deslizamientos que llevan varios ciclos estacionales sin actividad.
- e. **Dormido:** deslizamiento inactivo pero que las causas del movimiento aparentemente permanecen.¹⁰⁵

¹⁰⁴ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

¹⁰⁵ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

- f. **Abandonado:** es el caso de un río que cambió de curso y que estaba produciendo un deslizamiento.
- g. **Estabilizado:** movimiento suspendido por obras remediales artificiales.
- h. **Relicto:** deslizamientos que ocurrieron posiblemente, hace varios miles de años se pueden llamar deslizamientos Relictos.¹⁰⁶

7. Estructura geológica

La formación geológica del sitio del movimiento es un factor determinante en el mecanismo de falla y en el comportamiento de un movimiento en un talud, especialmente en ambientes tropicales de montaña donde la textura y estructura geológica definen por lo general, la ocurrencia de fallas en los taludes.¹⁰⁷

3.5.8 MOVIMIENTOS POST-FALLA

Los movimientos post-falla son movimientos en los cuales la energía inicial es máxima y va disminuyendo progresivamente. La energía del movimiento se disipa con el rompimiento, remodelo o desaceleración por fricción del movimiento inicial. En el caso de un material perfectamente elastoplástico o dúctil, la energía potencial se disipa por fricción. La energía tiene tres componentes principales:

- a. **Energía Potencial:** la cual se determina por las características geométricas y de localización del talud en el momento de la falla. Es importante determinar el valor de la energía potencial al final de la falla y su evolución posterior para poder predecir el comportamiento del movimiento. Esta energía potencial se convierte en energía cinética a medida que se produce aceleración del movimiento y esta energía cinética se disipa a otros tipos de energía al disminuirse la velocidad.
- b. **Energía Friccionante:** depende del comportamiento esfuerzo-deformación del suelo. En la práctica la energía de fricción es difícil de evaluar debido a que se disipa no solamente a lo largo de una superficie de falla definida, sino a lo largo de esfuerzos de desplazamiento en una gran cantidad de superficies dentro de la masa deslizada.

¹⁰⁶ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

¹⁰⁷ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

- c. **Energía de Remoldeo o Desmoronamiento:** en suelos residuales no saturados y en rocas la energía de remoldeo disipa buena parte de la energía potencial o cinética; sin embargo, en la literatura existe muy poca documentación sobre el tema. Se conoce que los flujos de roca y detritos alcanzan distancias superiores cuando no se desmoronan y frenan rápidamente en el caso de desmoronamiento. En el caso de arcillas, la energía de remoldeo puede considerarse proporcional a la resistencia al corte no drenado y al índice de plasticidad de la arcilla. Entre menos resistente el material, la energía de remoldeo es menor y por lo tanto la disipación de energía cinética se produce a una rata menor aumentándose la longitud de recorrido del movimiento. En suelos no cohesivos la energía de remoldeo es muy pequeña pero la energía de fricción posee valores mucho más altos.¹⁰⁸

3.5.9 EVOLUCIÓN O PROCESO DE FALLA

La ocurrencia de una falla obedece a un proceso, el cual comprende una gran cantidad de factores que incluyen:

1. Condiciones originales del talud (Susceptibilidad a los deslizamientos)

La topografía, geología y características de los materiales y perfiles, condiciones ambientales generales, cobertura vegetal, etc. Estas condiciones determinan una susceptibilidad al deterioro, a la acción de los factores detonantes y al fallamiento.

2. Factores de deterioro (Modificación lenta de las condiciones originales)

El resultado es una disminución en la resistencia al cortante del material.

- a. Falla progresiva por expansión o fisuración, deformación al cortante, inclinación, desmoronamiento, etc.
- b. Descomposición por desecación, reducción de la cohesión, lavado y remoción de los cementantes, disolución, etc.
- c. Erosión interna o sifonamiento. Los factores de deterioro pueden producir movimientos en el talud, los cuales en ocasiones pueden ser detectados por medio de métodos geoacústicos o por inclinómetros.(Anexo 3).

¹⁰⁸ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

3. Factores detonantes (Activación del movimiento)

El resultado es un aumento en los esfuerzos de cortante. Estos esfuerzos aumentan a lo largo de la superficie de falla hasta que ocurre el movimiento. En el fenómeno de detonación actúan una serie compleja de procesos los cuales, en ocasiones, se traslapan con los factores de deterioro:

a. Procesos Geomorfológicos y físicos:

La tectónica y Neo-tectónica, la erosión, sedimentación, lluvias, inundaciones, sismos, erupciones volcánicas, la expansión del suelo, etc.

b. Procesos antrópicos:

Las excavaciones o cortes, las excavaciones subterráneas (túneles), los rellenos o depósitos de materiales sobre el talud, disposición de residuos, etc. La irrigación, las fugas de agua de las redes de servicios, el mantenimiento inadecuado de sistemas de drenaje y subdrenaje. La deforestación que produce cambios hidrológicos y afecta la resistencia del suelo, al eliminar el refuerzo de las raíces. Las vibraciones artificiales, tránsito de vehículos, vibraciones de maquinaria, detonaciones de explosivos, etc., La disminución repentina del nivel de agua como en el caso del desembalse de una presa.

4. Fallamiento

El proceso de fallamiento después de que interviene el factor detonante es un fenómeno generalmente físico, en el cual las condiciones de esfuerzo y deformación juegan un papel preponderante. Las fallas en la mayoría de los casos no ocurren en forma repentina, sino que toman un tiempo, el cual puede durar de minutos a años. (Figura 36).¹⁰⁹

Las deformaciones que se producen por la actuación de los esfuerzos generan a su vez disminuciones en la resistencia. Al inicio del movimiento, es muy posible que estas deformaciones progresivas afecten volúmenes de talud, pero a medida que avanza el proceso de fallamiento las deformaciones principales se concentran en una superficie o banda de falla a lo largo de la cual se produce la rotura o falla del material.¹¹⁰

¹⁰⁹ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

¹¹⁰ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

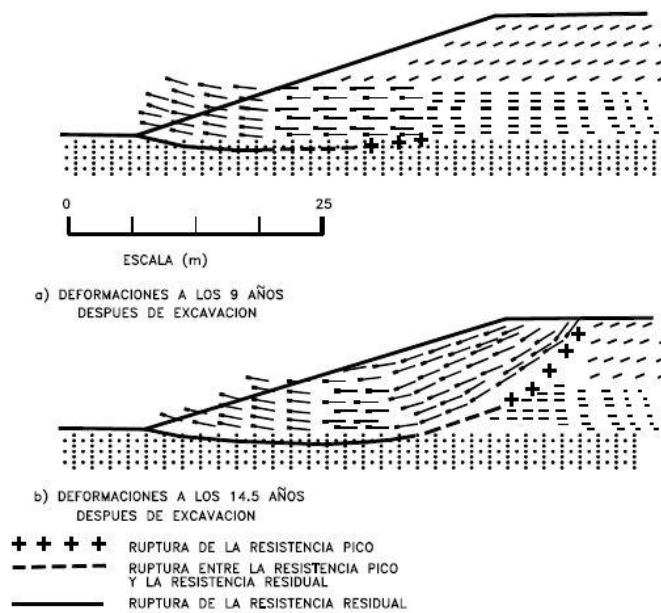


Figura 36: Falla progresiva o deformaciones con el tiempo, de un talud en arcilla al realizar un corte, analizada por elementos finitos (Fuente: J. Suárez desde Leroueil y otros 1996).

Es esencial para el análisis de un deslizamiento o para la determinación de niveles de amenaza y riesgo, que se tenga claridad sobre los procesos de evolución que generan un deslizamiento ([Figura 37](#)), la susceptibilidad, los procesos de deterioro y factores detonantes, así como el proceso de fallamiento propiamente dicho. Cada una de estas etapas involucra fenómenos mecánicos, leyes y parámetros que pueden ser muy diferentes y deben analizarse como un todo y también en forma separada.¹¹¹

¹¹¹ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

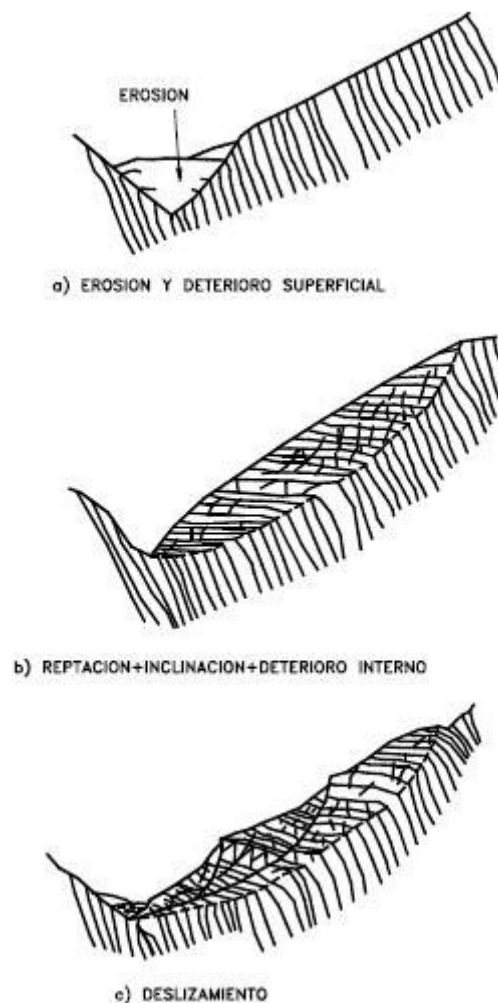


Figura 37: Evolución de un deslizamiento en roca fracturada al profundizarse un cauce por erosión permanente. (Fuente: Suárez, 1998)

3.6 TEORIA DEL PRINCIPIO DE LA INESTABILIDAD DE TALUDES

Cada año hay aproximadamente mil casos de fallas de taludes en todo el mundo. En promedio, un número de muertos de miles de personas, así como las pérdidas económicas astronómicas relacionadas con eventos de derrumbe son comunes. Por lo tanto, es evidente que existe una clara necesidad de investigar la causa de las fallas devastadoras en los taludes.¹¹²

La falla de un talud está relacionada con varias causas, entre ellas: el aumento del nivel freático, las propiedades del suelo y las características geológicas de los taludes. Estas causas de fallas a menudo están interrelacionadas y pueden

¹¹² Tomado y traducido de: "Application of Soil nailing for Slope Stability Purpose", Victor Yeung

influir unas sobre otras, deteriorando colectivamente la estabilidad. La combinación de estos modos de falla forma los elementos principales relacionados con la falla de un talud.

La falla de un talud es impulsada por la superficie de deslizamiento del talud, que es causada por la gravedad, y las fuerzas de infiltración que empujan la superficie de deslizamiento y causan inestabilidad (Ortigao, 2004). Según Abramson (2002), existen varios tipos de fallas del talud que son impulsadas por superficies de deslizamiento, a saber: deslizamiento circular/rotacional, deslizamiento no circular y deslizamiento compuesto.

El tipo más común de falla del talud es el deslizamiento circular/rotacional. Esto se describe como una superficie de deslizamiento de forma circular, que se moviliza a través de una condición homogénea e isotrópica del suelo; mientras que una superficie de deslizamiento no circular es movilización de una condición no homogénea (Ortigao, 2004). Por otro lado, según Ortigao (2004), se describió que la falla de un talud impulsada por la superficie de deslizamiento de traslación y compuesta se desarrolla debido a la presencia de una capa rígida (por ejemplo, una capa de lecho de roca), o la presencia de discontinuidades tales como fisuras y deslizamientos preexistentes.¹¹³

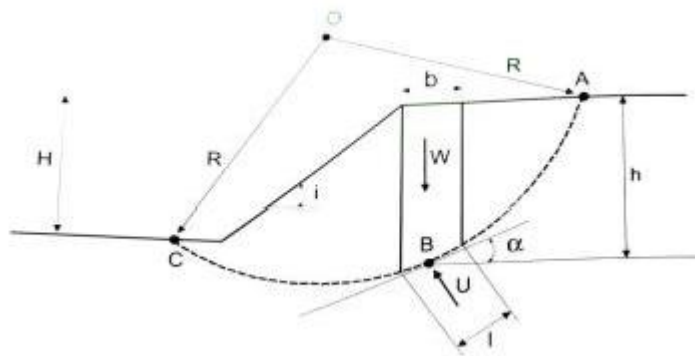


Figura 38: Típica superficie de deslizamiento circular/rotacional (Fuente: Victor Yeung)

3.6.1 ESTABILIDAD DE TALUDES - ANTECEDENTES

Los primeros pasos en el cálculo analítico de la estabilidad de taludes los dio Coulomb en el siglo XVIII, al desarrollar un método mediante cuñas, enfocado al estudio de la estabilidad de muros, pero también utilizable en taludes desnudos.

¹¹³ Tomado y traducido de: "Application of Soil nailing for Slope Stability Purpose", Victor Yeung

Ya en el siglo XIX, la construcción de líneas férreas obligó a realizar grandes movimientos de tierras, lo que trajo como consecuencia la aparición de importantes deslizamientos y, por tanto, la necesidad de un método de cálculo para prevenirlos.¹¹⁴

Sin embargo, no es hasta la primera mitad del siglo XX cuando puede hablarse de métodos analíticos que sirvieron de base a los actuales.

En 1910, Fellenius desarrolla un método de cuñas, y en 1916 se utiliza por primera vez el de rebanadas, pero solo para suelos no cohesivos, y no es hasta las dos décadas siguientes que se consigue unificar la metodología para suelos con cohesión y con rozamiento interno, a la vez que se introduce en el cálculo el Principio de las Presiones Efectivas, definido por Terzaghi en 1926.¹¹⁵

Sin embargo, los métodos considerados modernos se iniciaron en 1954 con el Método de Bishop, el cual considera superficies de falla circulares; y en 1956 con el de Janbú, para superficies de falla no circulares.¹¹⁶

En sus inicios, la realización de los cálculos al utilizar estos métodos era demasiado compleja; más aún después de la sofisticación de éstos, con lo cual se hizo casi utópica su aplicación práctica, hasta que, con la aparición de la computadora, metodologías consideradas antes casi imposibles, como la basada en los elementos finitos se convirtieron en una rutina. En la actualidad, existen en el mercado numerosos programas de cómputo, los cuales cubren las necesidades profesionales tanto para el análisis de equilibrio límite como para el análisis esfuerzo-deformación. No hay que dejar de mencionar que antes de la expansión de la computadora, se desarrollaron varios métodos simplificados, algunos de ellos basados en ábacos y en soluciones gráficas, que en su momento fueron de gran ayuda, hoy su empleo no es justificado, salvo como herramienta de estimación rápida y preliminar. Los programas de cómputo que se emplean habitualmente en la actualidad, suelen utilizar las metodologías de Bishop y Janbú, así como también algunos métodos conocidos como rigurosos o exactos; estos últimos principalmente son los métodos de Spencer, Morgenstern y Price, y Sarma, que probablemente son los más experimentados.

¹¹⁴ Tomado de "comentarios sobre el cálculo de taludes", Artemio Cuenca Payá.

¹¹⁵ Tomado de "comentarios sobre el cálculo de taludes", Artemio Cuenca Payá.

¹¹⁶ Tomado de: *Métodos de estabilización de taludes mediante...*, J. Ale Véliz.

Más abajo se presenta una breve descripción de varios métodos, aunque sin entrar en los casos más detallados.

En la actualidad, se está tratando de desarrollar métodos que pueden llegar a ser realmente exactos, siempre y cuando se lleguen a salvar las dificultades que hoy plantea el cálculo analítico de soluciones de modelos de falla complejos. Estos métodos son los basados en los teoremas de estados límites, de la Teoría del Sólido Plástico.¹¹⁷

3.6.2 METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES

Dentro de las metodologías disponibles, se encuentran los métodos de límite de equilibrio, los métodos numéricos y los métodos dinámicos para el análisis de caídos de roca y flujos, entre otros.¹¹⁸

Para el análisis de la estabilidad de taludes se dispone de varias herramientas útiles en el momento de modelar y diseñar:

- Tablas o ábacos.
- Análisis gráficos.
- Cálculos manuales.
- Hojas de cálculo.
- Uso de Software.

A continuación, se muestra un resumen de metodologías de análisis.

¹¹⁷ Tomado de: "Métodos de estabilización de taludes mediante...", J. Ale Véliz.

¹¹⁸ Tomado de: "Análisis retrospectivo del deslizamiento barrio La Sultana", Universidad de Caldas.

Tabla 2: Metodologías utilizadas en los análisis convencionales de estabilidad de taludes. (Fuente: ver Ítem¹¹⁹)

| Método | Parámetros utilizados | Ventajas | Limitaciones |
|--|--|--|--|
| Equilibrio límite | Topografía del talud, estratigrafía, ángulo de fricción, cohesión, peso unitario, niveles freáticos y cargas externas. | Existe gran cantidad de paquetes de software. Se obtiene un número de factor de seguridad. Analiza superficies curvas, rectas, cuñas, inclinaciones, etc. Análisis en 2 y 3 dimensiones con muchos materiales, refuerzos y condiciones de nivel de agua. | Genera un número único de factor de seguridad sin tener en cuenta el mecanismo de inestabilidad. El resultado difiere de acuerdo con el método que se utilice. No incluye análisis de las deformaciones. |
| Esfuerzo - deformación continuos | Geometría del talud, propiedades de los materiales, propiedades elásticas, elastoplásticas y de Creep. Niveles freáticos, resistencia. | Permite simular procesos de deformación. Permite determinar la deformación del talud y el proceso de falla. Existen programas para trabajar en 2 y 3 dimensiones. Se puede incluir análisis dinámico y análisis de Creep. | Es complejo y no lineal. Comúnmente no se tienen conocimientos de los valores reales a utilizar en la modelación. Se presentan varios grados de libertad. No permite modelar roca muy fracturada. |
| Discontinuos Esfuerzo - deformación elementos discretos | Geometría del talud, propiedades del material, rigidez, discontinuidades, resistencia y niveles freáticos. | Permite analizar la deformación y el movimiento relativo de bloques. | Existe poca información disponible sobre las propiedades de las juntas. Se presentan problemas de escala, especialmente en los taludes de roca. |
| Cinemáticos estereográficos para taludes en roca | Geometría y características de las discontinuidades. Resistencia a las discontinuidades | Es relativamente fácil de utilizar. Permite la identificación y análisis de bloques críticos, utilizando teoría de bloques. Pueden combinarse con técnicas estadísticas. | Útiles para el diseño preliminar. Se requiere criterio de ingeniería para determinar cuáles son las discontinuidades críticas. Evalúa las juntas. |
| Dinámica de caídos de roca | Geometría del talud, tamaño y forma de los bloques y coeficiente de restitución. | Permite analizar la dinámica de los bloques y existen programas en dos o tres dimensiones. | Existe muy poca experiencia de su uso en los países tropicales. |
| Dinámica de flujos | Relieve del terreno. Concentración de sedimentos, viscosidad y propiedades de la mezcla suelo-agua. | Se puede predecir el comportamiento, velocidades, distancia de recorrido y sedimentación de los flujos. | Se requiere calibrar los modelos para los materiales de cada región. Los resultados varían de acuerdo con el modelo utilizado. |

3.6.2.1 EQUILIBRIO LÍMITE Y EL FACTOR DE SEGURIDAD

El análisis de los movimientos de los taludes o laderas durante muchos años se ha realizado utilizando las técnicas del equilibrio límite. Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, y arroja como resultado un factor de seguridad al comparar las fuerzas o momentos resistentes en la masa del suelo con respecto a las fuerzas o momentos actuantes. Sin embargo, este método no requiere información sobre las propiedades esfuerzo-deformación del suelo, dado que no considera este tipo de análisis.¹¹⁹

¹¹⁹ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

El método de equilibrio límite supone que, en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla, lo cual es equivalente a un factor de seguridad de 1.0.

El análisis de equilibrio límite se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o rebanadas o dovelas (Figura 39). Cada día se han mejorado los sistemas de Dovelas desarrollados a inicios del siglo XX y existe Software muy fácil de utilizar. Generalmente, los métodos son de iteración y cada uno de los métodos posee un cierto grado de precisión.¹²⁰

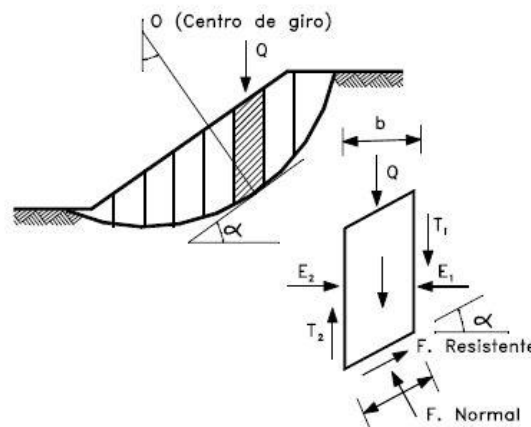


Figura 39: Fuerzas que actúan sobre una dovela en los métodos de dovelas (Fuente: Suárez, 1998)

El Factor de Seguridad es empleado por los Ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza de que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Fellenius (1927) presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla:

$$F.S. = \frac{\text{Resistencia al corte}}{\text{Esfuerzo al cortante}}$$

En las superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes:

¹²⁰ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

$$F.S.= \frac{\text{Momento resistente}}{\text{Momento actuante}}$$

Existen, además, otros sistemas para plantear el factor de seguridad, tales como la relación de altura crítica y altura real del talud y métodos probabilísticos.

La mayoría de los sistemas de análisis asumen un criterio de “equilibrio límite” donde el criterio de falla de Coulomb es satisfecho a lo largo de una determinada superficie ([Anexo 4](#)).

Se estudia un cuerpo libre en equilibrio, partiendo de las fuerzas actuantes y de las fuerzas resistentes que se requieren para producir el equilibrio. Calculada esta fuerza resistente, se compara con la disponible del suelo o roca y se obtiene una indicación del Factor de Seguridad.

Otro criterio es el de dividir la masa a estudiar en una serie de tajadas, dovelas o bloques y considerar el equilibrio de cada tajada por separado. Una vez realizado el análisis de cada tajada se analizan las condiciones de equilibrio de la sumatoria de fuerzas o de momentos.¹²¹

$$F.S.= \frac{\Sigma \text{ Resistencias al corte}}{\Sigma \text{ Esfuerzos al cortante}}$$

La siguiente tabla trata de ilustrar los grados de estabilidad aceptables de los taludes según el tipo de análisis. Estos factores de seguridad pueden variar de acuerdo con la normatividad existente para distintos tipos de talud y para la importancia que su falla tenga sobre los bienes y las personas.¹²²

Tabla 3: Factor de seguridad según el grado de estabilidad de taludes (Fuente: J. Ale Véliz)

| Factor de Seguridad | | Nivel o grado De Estabilidad |
|---------------------|----------------|------------------------------|
| Estático | Pseudoestático | |
| 1.0 a 1.2 | menor a 1.0 | Inestable |
| 1.2 a 2.0 | 1.0 a 1.2 | Estable |
| mayor a 2.0 | Mayor a 1.2 | Muy estable |

¹²¹ Tomado de: “Deslizamientos y estabilidad de taludes” ... J. Suárez.

¹²² Tomado de: Métodos de estabilización de taludes mediante..., J. Ale Véliz.

A continuación, se muestra un resumen de los métodos de equilibrio límite para el análisis de estabilidad de taludes:

Tabla 4: Métodos de análisis de estabilidad de taludes. (Fuente: ver Ítem¹²³)

| Método | Superficie de falla | Equilibrio | Características |
|---|-------------------------|--------------------|---|
| Talud infinito | Rectas | Fuerzas | Bloque delgado con nivel freático, falla paralela a la superficie. |
| Bloques o cuñas | Cuñas con tramos rectos | Fuerzas | Cuñas simples, dobles o triples, analizando las fuerzas que actúan sobre cada cuña. |
| Espiral logarítmica (Frohlich, 1953) | Espiral logarítmica | Fuerzas y momentos | Superficie de falla de la espiral varia con el ángulo de rotación. |
| Arco Circular, (Fellenius, 1922) | Circulares | Momentos | Circulo de falla, el cual es analizado como un solo bloque. Se requiere que el suelo sea cohesivo ($\phi = 0$) |
| Ordinario de Fellenius (Fellenius, 1927) | Circulares | Fuerzas | No tiene en cuenta las fuerzas entre dovelas. |
| Bishop simplificado (Bishop 1955) | Circulares | Momentos | Asume que todas las fuerzas de cortante, entre dovelas son cero. |
| Janbú Simplificado (Janbú, 1968) | Cualquier forma | Fuerzas | Asume que no hay fuerza de cortante entre las dovelas. |
| Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970) | Cualquier forma | Fuerzas | Las fuerzas entre dovelas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. |
| Lowe y Karafiath (1960) | Cualquier forma | Fuerzas | Las fuerzas entre dovelas están inclinada en un Angulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas. |
| Spencer (1967) | Cualquier forma | Momentos y Fuerzas | La inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada, pero son desconocidas. |
| Morgenstern y Price (1965) | Cualquier forma | Momentos y Fuerzas | Las fuerzas entre dovelas se asume que varían de acuerdo con una función arbitraria. |
| Sarma (1973) | Cualquier forma | Momentos y Fuerzas | Utiliza el método de las dovelas en el cálculo de la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla. |

Nota: Para más detalles sobre este tema y todos los métodos conocidos, por favor consultar las bibliográfica recomendada y las diapositivas de los cursos.

¹²³ Tomado de: "Análisis retrospectivo del deslizamiento barrio La Sultana", Universidad de Caldas.

En la Tabla 5 se resume para cada tipo de deslizamiento el método de análisis correspondiente, pero que no serán definidos en este reporte de investigación dado que ya fueron descritos de forma detallada en el informe del módulo 7: ITSCVO Estabilidad de Taludes - Maygualida_Marisol_VOSS_FREITES.

Tabla 5: Resumen de los métodos de análisis de estabilidad de taludes para diferentes tipos de deslizamiento o falla. (Fuente: CGI)

| DINÁMICA DEL PROCESO | GEOMETRÍA DE RUPTURA | MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDADES | |
|--|--|--|---------------------|
| | | NOMBRE | TIPO |
| NO CONDICIONADO POR ESTRUCTURAS REQUERIDAS | FALLAS CIRCULARES | <ul style="list-style-type: none"> •ESPIRAL LOGARÍTMICA •TAYLOR •FELLENIOUS •BISHOP •SPENCER •TRIDIMENSIONAL | EQUILÍBRIO LÍMITE |
| | FALLA NO CIRCULARES | <ul style="list-style-type: none"> •JAMBU •MORGESTERN Y PRICE | TENSIÓN DEFORMACIÓN |
| CONDICIONADO POR ESTRUCTURAS REQUERIDAS | 1 PLANO 2 PLANOS VÁRIOS PLANOS | <ul style="list-style-type: none"> •PLANAR •BIPLANAR, EN CUÑA •MULTIPLANAR | EQUILÍBRIO LÍMITE |
| | VUELCO/ DESPRENDIMIENTOS BLOQUES | TENSION-DEFORMACIÓN EQUILÍBRIO LÍMITE | |

3.6.2.2 ¿CUÁL MODELO UTILIZAR PARA CADA PROBLEMA?

Cada problema es diferente y es difícil establecer criterios generales sobre qué modelo se debe utilizar en cada caso. En algunas ocasiones, se pueden utilizar varios tipos de modelo y se debe escoger aquel con el cual se tenga mayor experiencia y familiaridad. En la [Figura 40](#) se muestra, en forma esquemática que los métodos de límite de equilibrio son muy útiles para el análisis sencillo de estabilidad de taludes.¹²⁴

Si los patrones de comportamiento del suelo son complejos, se requiere un modelo de elementos finitos o diferencias finitas y si los materiales se encuentran

¹²⁴ Tomado de: *Deslizamientos, Análisis Geotécnico*, J. Suárez.

fracturados, se recomienda utilizar un modelo de elementos discretos o de elementos de borde.¹²⁵

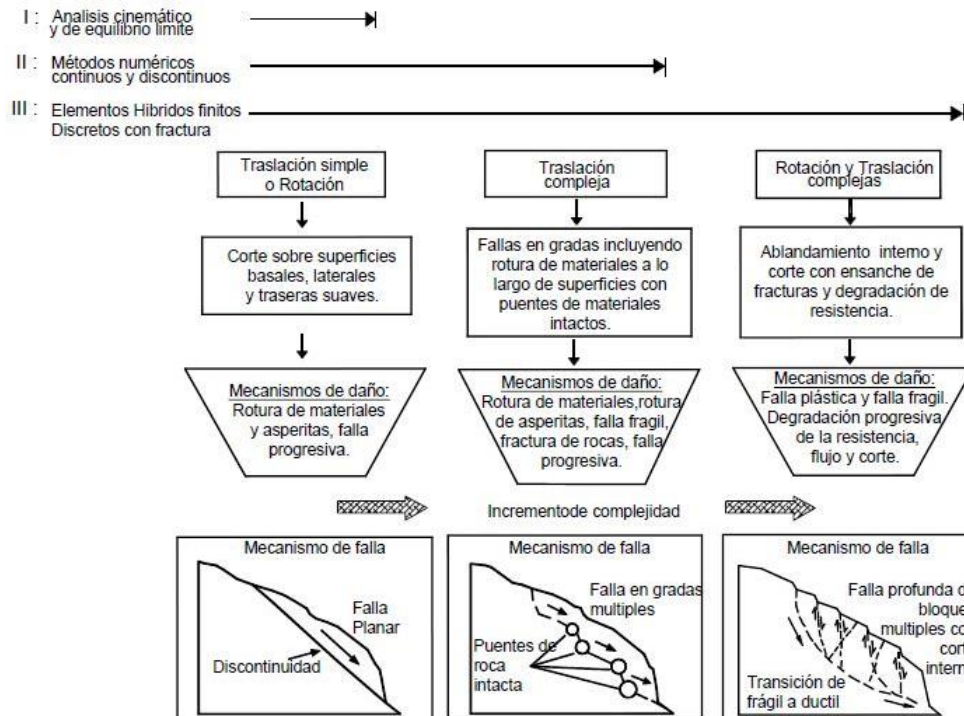


Figura 40: Diagrama que muestra el tipo de modelo que se recomienda utilizar de acuerdo con la complejidad de los movimientos (Stead y otros, 2006).

El auge que ha tomado en los últimos años el uso del computador prácticamente, ha obligado a su empleo para el análisis de estabilidad de taludes, en la mayoría de los casos. Este sistema ha permitido incorporar más información en los modelos de análisis y permite analizar situaciones que no eran posibles con los sistemas manuales.¹²⁶

En el Anexo 5 se muestra las aplicaciones relativas y softwares para análisis de estabilidad de taludes, cada una con su propósito específico.

3.6.3 MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES

Una vez estudiado el talud, definidos los niveles de amenaza y riesgo, el mecanismo de falla y analizados los factores de equilibrio, se puede pasar al objetivo final que es el diseño del sistema de prevención control o estabilización. Existen varias formas de enfocar y resolver cada problema específico y la

¹²⁵ Tomado de: *Deslizamientos, Análisis Geotécnico*, J. Suárez.

¹²⁶ Tomado de: *“Deslizamientos y estabilidad de taludes” ... J. Suárez*

metodología que se requiere emplear depende de una serie de factores técnicos, sociales, económicos, políticos; con una gran cantidad de variables en el espacio y en el tiempo.¹²⁷

A continuación, se presentan algunas de las metodologías utilizadas para disminuir o eliminar el riesgo a los deslizamientos de tierra.

3.6.3.1 PREVENCIÓN

La prevención incluye el manejo de la vulnerabilidad, evitando la posibilidad de que se presenten riesgos o amenazas. La prevención debe ser un programa del estado, en todos sus niveles mediante una legislación y un sistema de manejo de amenazas que permita disminuir los riesgos a deslizamiento en un área determinada.

Cuadro 1: Métodos de prevención de deslizamientos (Fuente: UNI)

| Método | Ventajas | Desventajas |
|-----------------------------------|--|--|
| Disuación con medidas coercitivas | Son muy efectivas cuando la comunidad está consciente del riesgo y colabora con el estado. | El manejo de los factores socioeconómicos y sociales es difícil. |
| Planeación del uso de la tierra | Es una solución ideal para zonas urbanas y es fácil de implementar. | No se puede aplicar cuando ya existe el riesgo. |
| Códigos técnicos | Presenta herramientas precisas para el control y prevención de amenazas. | Se requiere de una entidad que los haga cumplir. |
| Aviso y Alarma | Disminuye en forma considerable el riesgo cuando es inminente. | Generalmente, se aplica después de ocurrido el desastre. |

3.6.3.2 ELUSIÓN DE LA AMENAZA

Eludir la amenaza consiste en evitar que los elementos en riesgo sean expuestos a la amenaza de deslizamiento. Ver Cuadro 2.

3.6.3.3 CONTROL

Métodos tendientes a controlar la amenaza activa antes de que se produzca el riesgo a personas o propiedades. Generalmente, consisten en estructuras que retienen la masa en movimiento. Este tipo de obras se construyen abajo del deslizamiento para detenerlo después de que se ha iniciado. Ver Cuadro 3.¹²⁸

¹²⁷ Tomado de: "Estabilidad de Taludes" Universidad Nacional de Ingeniería, Dpto de Mecánica de suelos

¹²⁸ Tomado de: "Estabilidad de Taludes" Universidad Nacional de Ingeniería, Dpto de Mecánica de suelos

Cuadro 2: Métodos de elusión de amenazas (Fuente: UNI)

| Método | Aplicaciones | Limitaciones |
|--|---|--|
| Variantes o relocalización del proyecto | Se recomienda cuando existe el riesgo de activar grandes deslizamientos difíciles de estabilizar o existen deslizamientos antiguos de gran magnitud. Puede ser el mejor de los métodos si es económico hacerlo. | Puede resultar costoso y el nuevo sitio o alineamiento puede estar amenazado por deslizamientos. |
| Remoción total de deslizamientos | Es atractivo cuando se trata de volúmenes pequeños de excavación. | La remoción de los deslizamientos puede producir nuevos movimientos. |
| Remoción parcial de materiales inestables | Se acostumbra el remover los suelos subsuperficiales inestables cuando sus espesores no son muy grandes. | Cuando el nivel freático se encuentra subsuperficial se dificulta el proceso de excavación. |
| Modificación del nivel del proyecto o subrasante de una vía. | La disminución de la altura de los cortes en un alineamiento de gran longitud puede resolver la viabilidad técnica de un proyecto. | Generalmente, al disminuir la altura de los cortes se desmejoran las características del proyecto. |
| Puentes o viaductos sobre los movimientos | Muy útil en terrenos de pendientes muy altas | Se requiere cimentar los puentes sobre suelo estable y las pilas deben ser capaces de resistir las fuerzas laterales del material inestable. |

Cuadro 3: Métodos de control (Fuente: UNI)

| Método | Ventajas | Desventajas |
|--------------------------|--|---|
| Bermas | Generalmente son económicas rápidas de construir. | Se requiere un espacio grande a mitad de talud. |
| Trincheras | Sirven al mismo tiempo para controlar las aguas lluvias. | Los cantos fácilmente pasan por encima. |
| Estructuras de retención | Retienen las masas en movimiento | Se pueden requerir estructuras algo costosas. |
| Cubiertas de protección | Son uno de los métodos más efectivos para disminuir el riesgo en carreteras. | Son muy costosas. |

3.6.3.4 ESTABILIZACIÓN

La estabilización de un talud comprende los siguientes factores¹²⁹:

- a. Determinar el sistema o combinación de sistemas de estabilización más apropiados, teniendo en cuenta todas las circunstancias del talud estudiado.

¹²⁹ Tomado de: "Estabilidad de Taludes" Universidad Nacional de Ingeniería, Dpto de Mecánica de suelos

- b. Diseñar en detalle el sistema a emplear, incluyendo planos y especificaciones de diseño.
- c. Instrumentación y control durante y después de la estabilización. Debe tenerse en cuenta que, en taludes, nunca existen diseños detallados inmodificables y que las observaciones que se hacen durante el proceso de construcción tienden generalmente, a introducir modificaciones al diseño inicial y esto debe preverse en las cláusulas contractuales de construcción.¹³⁰

Los sistemas de estabilización se pueden clasificar en cinco categorías principales:

1. **Conformación del talud o ladera:** son sistemas que tienden a lograr un equilibrio de masas, reduciendo las fuerzas que producen el movimiento.

Cuadro 4: Sistemas para lograr un equilibrio de masas (Fuente: UNI)

| Método | Ventajas | Desventajas |
|--|---|--|
| Remoción de materiales de la cabeza del talud. | Muy efectivo en la estabilización de deslizamientos rotacionales. | En movimientos muy grandes las masas a remover tendrían una gran magnitud. |
| Abatimiento de la pendiente . | Efectivo especialmente en suelos friccionantes. | No es viable económicamente en taludes de gran altura. |
| Terraceo de la superficie. | Además de la estabilidad al deslizamiento, permite construir obras para controlar la erosión. | Cada terraza debe ser estable independientemente. |

2. **Recubrimiento de la superficie:** son métodos que tratan de impedir la infiltración o la ocurrencia de fenómenos superficiales de erosión, o refuerzan el suelo más sub-superficial. El recubrimiento puede consistir en elementos impermeabilizantes como el concreto o elementos que refuercen la estructura superficial del suelo como la cobertura vegetal.¹³¹

¹³⁰ Tomado de: "Estabilidad de Taludes" Universidad Nacional de Ingeniería, Dpto de Mecánica de suelos

¹³¹ Tomado de: "Estabilidad de Taludes" Universidad Nacional de Ingeniería, Dpto de Mecánica de suelos

Cuadro 5: Sistemas de recubrimiento de superficie (Fuente: UNI)

| Método | Ventajas | Desventajas |
|--|--|---|
| Recubrimiento de la superficie del talud. | El recubrimiento ayuda a controlar la erosión. | Se debe garantizar la estabilidad del recubrimiento. |
| Conformación de la superficie. | Puede mejorar las condiciones del drenaje superficial y facilitar el control de erosión. | Su efecto directo sobre la estabilidad es generalmente limitado. |
| Sellado de grietas superficiales. | Disminuye la infiltración de agua. | Las grietas pueden abrirse nuevamente y se requiere mantenimiento por periodos importantes de tiempo. |
| Sellado de juntas y discontinuidades. | Disminuye la infiltración de agua y presiones de poro en las discontinuidades. | Puede existir una gran cantidad de discontinuidades que se requiere sellar. |
| Cobertura vegetal. Árboles Arbustos y Pastos | Representan una alternativa ambientalmente excelente. | Pueden requerir mantenimiento para su establecimiento. |

- 3. Control de agua superficial y subterránea:** son sistemas tendientes a controlar el agua y sus efectos, disminuyendo fuerzas que producen movimiento y/o aumentando las fuerzas resistentes.¹³²

Cuadro 6: Sistemas que tienen a controlar el agua y sus efectos (Fuente: UNI)

| Método | Ventajas | Desventajas |
|--|---|--|
| Canales superficiales para control de escorrentía. | Se recomienda construirlos como obra complementaria en la mayoría de los casos. Generalmente, las zanjas se construyen arriba de la corona del talud. | Se deben construir estructuras para la entrega de las aguas y disipación de energía. |
| Subdrenes de zanja. | Muy efectivos para estabilizar deslizamientos poco profundos en suelos saturados subsuperficialmente. | Poco efectivos para estabilizar deslizamientos profundos o deslizamientos con nivel freático profundo. |
| Subdrenes horizontales de penetración. | Muy efectivos para interceptar y controlar aguas subterráneas relativamente profundas. | Se requieren equipos especiales de perforación y su costo puede ser alto. |
| Galerías o túneles de subdrenaje. | Efectivos para estabilizar deslizamientos profundos en formaciones con permeabilidad significativa y aguas subterráneas. | Muy costosos. |
| Pozos profundos de subdrenaje. | Útiles en deslizamientos profundos con aguas subterráneas. Efectivos para excavaciones no permanentes. | Su uso es limitado debido a la necesidad de operación y mantenimiento permanente. |

- 4. Estructuras de contención:** son métodos en los cuales se van a colocar fuerzas externas al movimiento aumentando las fuerzas resistentes, sin

¹³² Tomado de: "Estabilidad de Taludes" Universidad Nacional de Ingeniería, Dpto de Mecánica de suelos

disminuir las actuantes. Las estructuras de contención son obras generalmente masivas, en las cuales el peso de la estructura es un factor importante y es común colocar estructuras ancladas en las cuales la fuerza se transmite al deslizamiento por medio de un cable o varilla de acero. Cada tipo de estructura tiene un sistema diferente de trabajo y se deben diseñar de acuerdo a su comportamiento particular.¹³³

Cuadro 7: Estructuras de contención (Fuente: UNI)

| Método | Ventajas | Desventajas |
|---|--|--|
| Relleno o berma de roca o suelo en la base del deslizamiento. | Efectivos en deslizamientos no muy grandes especialmente en los rotacionales actuando como contrapeso. | Se requiere una cimentación competente para colocar el relleno. |
| Muros de contención convencionales, de tierra armada etc. | Útiles para estabilizar masas relativamente pequeñas. | Se requiere una buena calidad de cimentación. Son poco efectivos en taludes de gran altura. |
| Pilotes | Son efectivos en movimientos poco profundos, en los cuales existe suelo debajo de la superficie de falla que sea competente para permitir el hincado y soporte de los pilotes. | No son efectivos en deslizamientos profundos o cuando aparece roca o suelo muy duro debajo de la superficie de falla. Poco efectivos en deslizamientos rotacionales. |
| Anclajes o pernos | Efectivos en roca, especialmente cuando es estratificada. | Se requieren equipos especiales y son usualmente costosos. |
| Pantallas ancladas | Útiles como estructuras de contención de masas de tamaño pequeño a mediano. | Existen algunas incertidumbres sobre su efectividad en algunos casos, especialmente, cuando hay aguas subterráneas y son generalmente costosas. |

- 5. Mejoramiento del suelo:** son métodos que aumenten la resistencia del suelo. Incluyen procesos físicos y químicos que aumentan la cohesión y/o la fricción de la mezcla suelo-producto estabilizante o del suelo modificado.¹³⁴

¹³³ Tomado de: "Estabilidad de Taludes" Universidad Nacional de Ingeniería, Dpto de Mecánica de suelos

¹³⁴ Tomado de: "Estabilidad de Taludes" Universidad Nacional de Ingeniería, Dpto de Mecánica de suelos

Cuadro 8: Métodos de mejoramiento del suelo (Fuente: UNI)

| Método | Ventajas | Desventajas |
|--------------------------------|---|---|
| Inyecciones o uso de químicos. | Endurecen el suelo y pueden cementar la superficie de falla. | La disminución de permeabilidad puede ser un efecto negativo. |
| Magmaficación | Convierte el suelo en roca utilizando rayos especiales desarrollados por la industria espacial. | Su utilización en la actualidad es solamente para uso experimental. |
| Congelación. | Endurece el suelo al congelarlo. | Efectos no permanentes. |
| Electro-osmosis. | Reducen el contenido de agua . | Utilización para estabilización no permanente. |
| Explosivos. | Fragmenta la superficie de falla. | Su efecto es limitado y puede tener efectos negativos. |

Las obras pueden ser definitivas o pueden ser temporales de acuerdo al método utilizado. Generalmente en la estabilización de deslizamientos se emplean sistemas combinados que incluyen dos o más tipos de control de los indicados anteriormente; en todos los casos debe hacerse un análisis de estabilidad del talud ya estabilizado y se debe llevar un seguimiento del proceso durante la construcción y algunos años después.¹³⁵

3.6.3.5 ESCOGENCIA DEL FACTOR DE SEGURIDAD

Otra decisión que afronta el Ingeniero es la decisión sobre el factor de seguridad. Una idea general de los factores a emplear permite recomendar los siguientes factores de seguridad mínimos:

Tabla 6: Factores seguridad recomendados por tipo de caso (Fuente: UNI)

| Caso | Factor de seguridad |
|---|---------------------|
| Si puede producir la pérdida de vidas humanas al fallar el talud | 1.7 |
| Si la falla puede producir la pérdida de más del 30% de la inversión de la obra específica o pérdidas considerables importantes | 1.5 |
| Si se pueden producir pérdidas económicas no muy importantes | 1.3 |
| Si la falla del talud no causa daños | 1.2 |

3.6.3.6 PREVENCIÓN Y DESARROLLO DE AVISOS O ALARMAS

1. Prevención:

Los riesgos debidos a deslizamientos de tierra se pueden reducir utilizando cuatro estrategias así (Kockelman 1986):¹³⁶

- a. Restricciones al desarrollo en áreas susceptibles a deslizamientos
- b. Códigos para excavaciones, explanaciones, paisajismo y construcción.

¹³⁵ Tomado de: "Estabilidad de Taludes" Universidad Nacional de Ingeniería, Dpto de Mecánica de suelos

¹³⁶ Tomado de: "Estabilidad de Taludes" Universidad Nacional de Ingeniería, Dpto de Mecánica de suelos

- c. Medidas físicas tales como drenaje, modificación de la geometría y estructuras para prevenir o controlar los deslizamientos o los fenómenos que los pueden producir.
- d. Desarrollo de sistemas de aviso o alarma.

Para el diseño de un programa adecuado de prevención se requiere, de acuerdo al U.S. Geological Survey (1982), tener en cuenta los siguientes elementos:

- a. Una base técnica completa de las amenazas y riesgos.
- b. Un grupo técnico capaz de interpretar y manejar la información existente.
- c. Entidades del Estado conocedoras y conscientes de los problemas.
- d. Una comunidad que comprenda el valor y los beneficios de estos programas.¹³⁷

2. Medidas de aviso y alarma:

Las áreas propensas a inestabilidades de taludes pueden instrumentarse para prevenir o avisar sobre la ocurrencia de un fenómeno y pueden establecerse programas de información a la comunidad sobre la eventualidad de un determinado deslizamiento. Los sistemas de monitoreo y alarma son instalados con el objetivo principal de proteger vidas y propiedades y no de prevenir deslizamientos. Sin embargo, estos sistemas en ocasiones permiten un tiempo suficiente después del aviso para construir medidas físicas de control que reducen la amenaza a largo plazo.

Los sistemas de monitoreo usualmente involucran instrumentos de medidas de desplazamientos en superficie o sub-superficial. Los típicos componentes se enumeran abajo en el orden del incremento de la complejidad:¹³⁸

- a. Desplazamiento superficial:
 - Inspección visual
 - Mediciones de roturas cruzadas, ya sea manual o por extensómetro alámbrico
 - Monitoreo por levantamiento topográfico
 - GPS
 - Fotogrametría

¹³⁷ Tomado de: "Estabilidad de Taludes" Universidad Nacional de Ingeniería, Dpto de Mecánica de suelos

¹³⁸ Tomado y traducido de: "Guidelines for Open Pit Slope Design" Read & Stacey

- Escaneo laser
 - Radar, terrestre (SAR, RAR) o satelital (InSAR)
 - Telémetros y niveles eléctricos
- b. Componentes del subsuelo (instrumentos típicamente instalados en los agujeros de perforación) puede incluir:
- inclinómetros;
 - tiras cortantes y cables de reflectómetro en el dominio del tiempo (TDR);
 - extensómetros;
 - termistores
 - micro-sísmica
 - piezómetros.

Después de que cada conjunto de datos obtenido de estos instrumentos ha sido interpretado, las conclusiones deben informarse en forma de un informe de monitoreo interino y enviarse al personal responsable de la implementación de las acciones correctivas indicadas por los datos.¹³⁹

¹³⁹ Tomado y traducido de: "Guidelines for Open Pit Slope Design" Read & Stacey

CAPITULO 4: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Cuando se está en presencia de una excavación superficial, sea cual fuese su propósito, toda investigación relativa a la identificación de inestabilidad de taludes, podría implicar el siguiente procedimiento:

- 1. Estudio de escritorio:** una fotografía aérea es un aspecto importante de la identificación de riesgos de falla. El estudio de fotografías aéreas ayuda a catalogar los deslaves históricos, describe y evalúa la geomorfología y determina la historia del sitio, particularmente con respecto a las actividades humanas en taludes naturales, por ejemplo.
- 2. Mapeo de reconocimiento geomecánico:** el mapeo proporciona datos adicionales de información de deslizamientos que no eran visibles en las fotos aéreas y permite la observación en tierra de algunas de las interpretaciones geomorfológicas realizadas a partir de fotografías aéreas.
- 3. Investigación terrestre:** para comprender mejor el modelo terrestre, se realiza una investigación en terreno para explorar las propiedades del suelo y el estado del régimen de las aguas subterráneas.
- 4. Investigación del sitio:** realizar visitas al sitio y mediciones de campo de la geometría del talud (por ejemplo, altura del talud, ángulo, infiltración). Por lo tanto, los datos recopilados se pueden utilizar para proporcionar la información más precisa y representar la geometría real del talud para un diseño posterior.
- 5. Síntesis geotécnica:** se realiza una síntesis de ingeniería geológica del hallazgo del estudio teórico, cartografía geológica, trabajo de campo de investigación de terreno, trabajo de campo de investigación de sitio y pruebas de laboratorio para producir un modelo geológico y secciones geológicas-geotécnicas representativas.¹⁴⁰
- 6. Análisis de estabilidad de taludes:** definidas en el marco teórico.
- 7. Identificación de inestabilidades:** ya definidas en el marco teórico anterior, aquí se categorizan en cuanto a su nivel de peligrosidad

¹⁴⁰ Tomado, traducido y modificado para ser ajustado a la realidad actual desde: V. Yeung, ajustes por M. Voss.

- 8. Medidas de prevención, monitoreo, control y estabilización:** también ya definidas en el capítulo anterior, ya que para efectos del siguiente trabajo de investigación se centrará solamente en el uso de la bioingeniería.

Considerando que la investigación es netamente teórica, me centraré en destacar los hallazgos conceptuales referente al tema de este proyecto de tesina.

4.1 REVISIÓN LITERARIA NECESARIA PARA LA CONSECUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN – AUTORES

Detallada en la bibliografía, he procedido con cautela a la hora de citar las fuentes de manera precisa con el fin de destacar los trabajos de los diferentes autores mencionados.

Dado que el listado de autores utilizados es largo, quiero destacar las lecturas de los siguientes autores que hicieron posible la consecución de este trabajo de recopilación e investigación conceptual:

- **Danae Voormeij** - Es una geóloga de exploración con sede en Vancouver, con un BSc (honores) en Ciencias de la Tierra de la Universidad Simon Fraser y una maestría de la Universidad de Victoria. Ha sido miembro de la Asociación Geológica de Canadá y del Instituto Canadiense de Minería desde 2001, geocientífica profesional registrada en la Asociación de Ingenieros Profesionales y Geocientíficos de la Columbia Británica desde 2007, y miembro de la Sociedad de Geólogos Económicos desde 2013. La referencia utilizada ha sido: Gold Exploration in Tropical Landscapes - Edumine Course.
- **Jaime Suarez Díaz** - Profesor Escuela de Ingeniería Civil Universidad Industrial de Santander Bucaramanga, Colombia. Este ingeniero cumple 45 años de estar estudiando el comportamiento geotécnico de los suelos en el nororiente de Colombia. La referencia utilizada ha sido: Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales.
- **John Read and Peter Stacey** - Guidelines for Open Pit Slope Design, se basan en gran medida en la experiencia de los patrocinadores y en varios profesionales de la industria y académicos que han compartido

voluntariamente su conocimiento y experiencia ya sea preparando o contribuyendo su conocimiento a varios de los capítulos.

- **Pedro Ramirez Oyanguren y Leandro Alejano Monge** con su libro: *Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes*, el cual ha nacido de las clases de Mecánica de Rocas que imparten en la Universidad Politécnica de Madrid y en la de Vigo, y en el Master internacional “Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales”.
- **U.S. Department of Agriculture Forest Service (USDA)** - A soil Bioengineering Guide for Streambank and Lakeshore Stabilization, un oficial de recursos sugirió que el Centro de Tecnología y Desarrollo de San Dimas (SDTDC) publique una guía que ilustra las muchas técnicas de bioingeniería de suelos que utilizan varias agencias y la industria privada para estabilizar los bancos de corrientes. Esa sugerencia inspiró la creación de esta guía.
- **Varnes, D.J. (1978)** - *Slope Movement Types and Processes* un reporte especial que es la referencia más importante en la actualidad para la identificación de deslizamientos y sus características.

Y muchos otros más que recomiendo sean consultados en el futuro, ojalá pudiera agradecerles en persona por su contribución al conocimiento de la ingeniería de taludes.

4.2 INTRODUCCIÓN

La mayor parte de las teorías y desarrollos en la geotecnia han tenido su origen en trabajos realizados sobre suelos en climas no tropicales, generalmente, en depósitos de suelos sedimentarios especialmente, arenas y arcillas y por lo tanto están condicionados al comportamiento de ese tipo de suelos. La aplicabilidad de las teorías y los criterios de diseño geotécnico que existen actualmente, podría no ser completamente válida en el caso de suelos residuales, debido a diferencias importantes que existen en la constitución y estructura de los suelos y de las formaciones residuales, y las de los suelos que sirvieron de modelo para el desarrollo de la mecánica de suelos tradicional. Esta diferencia es debida

principalmente, al fenómeno de la meteorización que es extenso y profundo en la mayoría de las formaciones de suelos tropicales.

Como características de los suelos residuales pueden mencionarse las siguientes (Brand, 1985):

1. No pueden considerarse aislados del perfil de meteorización, del cual son solamente una parte componente. Para definir su comportamiento y la posibilidad de ocurrencia de deslizamientos, pueden ser más importantes las características del perfil que las propiedades del material en sí (Figura 41).
2. Son generalmente muy heterogéneos y difíciles de muestrear y ensayar.
3. Comúnmente, se encuentran en estado húmedo no saturado, lo cual representa una dificultad para evaluar su resistencia al corte.
4. Generalmente, poseen zonas de alta permeabilidad, lo que los hace muy susceptibles a cambios rápidos de humedad y saturación.¹⁴¹

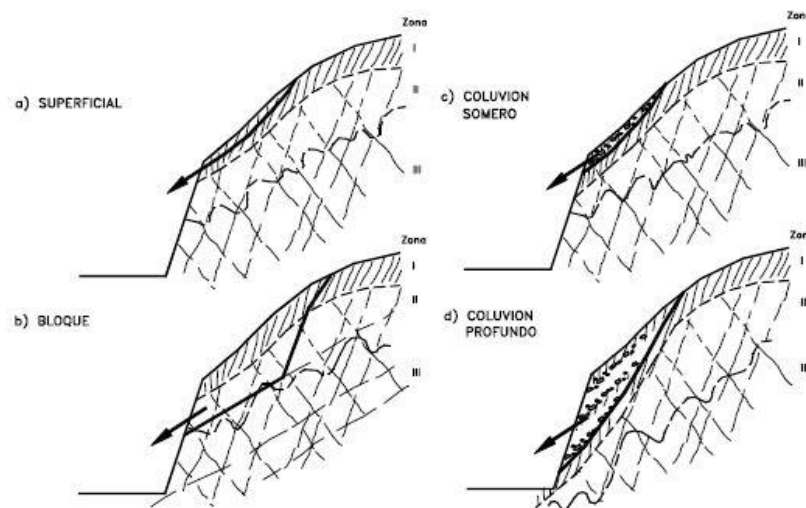


Figura 41: Tipos de deslizamiento en suelos residuales (Fuente: Deere y Patton 1971).

4.3 METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN INTEGRAL DE LOS SUELOS RESIDUALES

La caracterización de un suelo residual debido a su heterogeneidad, requiere de un análisis integral que tenga en cuenta todos los factores que afectan su comportamiento, lo cual incluye el grado y proceso de meteorización, su mineralogía, microestructura, discontinuidades, estado de esfuerzos, propiedades mecánicas, clasificación y caracterización del perfil. En la Tabla 7

¹⁴¹ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

se muestra un resumen de los elementos, características y procedimientos de análisis para una caracterización integral.¹⁴²

Tabla 7: Metodología para caracterización de un suelo residual (Fuente: Suárez, 1998)

| Elemento | Factores a caracterizar | Procedimiento |
|--|--|---|
| Medio Ambiente externo | Topografía, régimen de lluvias, humedad ambiental, temperatura, vegetación, sísmica, factores antrópicos. | Mediciones topográficas, hidrológicas, caracterización de cobertura vegetal. Índice climático. |
| Litología | Tipo de roca, minerales presentes, discontinuidades y microestructura de la roca original. | Caracterización geológica de los afloramientos de roca sana, secciones delgadas, micropetrografía. |
| Estado de Meteorización | Proceso de desintegración física y descomposición química. Grado de meteorización. | Ensayo de arenosidad, Martillo de Schmidt, Índice micropetrográfico, ensayos de penetración. |
| Mineralogía | Minerales resultantes del proceso de meteorización, tipos y % de arcilla, sesquióxidos 📖. | Análisis termo-gravimétrico, escaneado con electromicroscopio, Microscopio óptico, Difracción de rayos X. |
| Microestructura | Textura, Arreglo de partículas, Ensemble, Fábrica, matriz, tamaño de granos, terrones, sistema de soporte. Cementación entre partículas, Alteración o remoldeo, Anisotropía. | Análisis al microscopio y electromicroscopio. |
| Estructura | Discontinuidades heredadas, juntas, diaclasas, foliaciones, estratificación, fallas intrusivas. Separación, continuidad, relleno y propiedades de las discontinuidades. | Análisis visual de apiques, sondeos y afloramientos de suelo residual. Microscopio óptico. |
| Propiedades Mecánicas | Resistencia al cortante, Cohesión y, ángulo de fricción de la masa de suelo y de las discontinuidades, envolventes de falla, Relación de vacíos, Permeabilidad, Dispersividad, Factores que afectan estas propiedades. | Ensayos de campo y de laboratorio. Resistencia al cortante, permeabilidad, Peso unitario, relación de vacíos, porosidad, Dispersividad. |
| Régimen de aguas subterráneas | Humedad, grado de saturación, succión, Posibilidad de aumento rápido de humedad, avance del frente húmedo. Régimen interno de agua permanente y ocasional. | Ensayos de humedad, succión, velocidad de avance del frente húmedo. Redes de movimiento de agua permanente y por acción de lluvias. |
| Clasificación del suelo residual | Definición de la unidad de suelo, grupo y subgrupo, utilizando todos los elementos anteriores. | Sistema FAO Sistema de Wesley Nombre especial del suelo. |
| Caracterización del Perfil | Definición de las características del perfil. Profundidad del perfil. | Clasificación por el Método de Hong Kong (grados I a VI). |
| Superficies preferenciales de falla | Superficie de falla, tipo de falla. | Análisis geotécnico incluyendo agua, sismo, etc. |

¹⁴² Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

Del detalle con que se realice la caracterización del suelo residual depende la exactitud del diagnóstico. En ocasiones el ingeniero o geólogo no observa el que puede ser el detalle clave para determinar la estabilidad de un talud. Debe dedicarse esfuerzo especial a la determinación de la microestructura y estructura para de esta manera identificar los superficiales preferenciales de falla.¹⁴³

4.4 EL PROCESO DE METEORIZACIÓN

En ambientes tropicales, dominados por temperaturas altas y cambiantes y por lluvias abundantes, la meteorización de los materiales es muy fuerte, caracterizándose por la descomposición rápida de feldspatos y minerales ferromagnesianos, la concentración de óxidos de hierro y aluminio y la remoción de Sílice y de las bases Na_2O - K_2O - CaO y MgO (Gidigasú-1972). Los feldspatos se meteorizan inicialmente a Caolinita, Óxidos de Hierro y Óxidos de Aluminio y los compuestos más resistentes como las partículas de Mica y Cuarzo permanecen. La meteorización de rocas y cenizas volcánicas conducen a la formación de Montmorillonitas, Aloisitas, óxidos de hierro y aluminio en las etapas iniciales de la meteorización y finalmente se pueden formar Caolinitas, Esmectitas y Gipsitas (González y Jiménez, 1981) (Tabla 8).¹⁴⁴

Tabla 8: Tipos generales de minerales en los suelos residuales (Fuente: Suárez, 1998)

| Material de origen | Minerales resultantes |
|--------------------|--|
| Roca cristalina | Caolinita Óxido de hierro Óxido de aluminio. |
| Roca volcánica | Montmorillonita Aloisita Esmectita Óxido de hierro Óxido de aluminio |

Algunas rocas que contienen sales (NaCl), Cal (CaSO_4) y Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se disuelven fácilmente en agua, especialmente en presencia de CO_2 , acelerando el proceso de meteorización. A medida que el proceso de meteorización continúa los contenidos de Caolinita disminuyen y se alteran los demás compuestos a Fe_2O_3 y Al_2O_3 . Existen investigaciones que demuestran la

¹⁴³ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

¹⁴⁴ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

disminución de los contenidos de Caolinita, con el aumento del promedio anual de lluvias (Lohnes y Demirel, 1973).

El proceso generalmente es:

Material volcánico \Rightarrow Montmorillonita \Rightarrow Aloisita \Rightarrow Caolinita

4.4.1 ETAPAS DEL PROCESO DE METEORIZACIÓN

En general un proceso de meteorización involucra tres etapas así:

- a. **Desintegración:** se abren las discontinuidades y se desintegra la roca, formándose nuevas discontinuidades por fracturación y las partículas se parten, aumentando la relación de vacíos y la permeabilidad y disminuyendo la cohesión. En la meteorización la sal es generalmente un silicato y el producto de la reacción es una arcilla.
- b. **Descomposición:** se incrementa el contenido de arcilla y de suelo en general y se disminuye la fricción. La descomposición puede ser ocasionada por procesos químicos o biológicos. Los procesos químicos incluyen la hidrólisis y el intercambio catiónico. Los procesos biológicos pueden incluir efectos de las raíces, oxidación bacteriológica y reducción de hierro y compuestos del azufre.
- c. **Oxidación y re-cementación:** se aumenta el contenido de óxidos de hierro y aluminio, los cuales pueden cementar grupos de partículas aumentando la cohesión y el suelo tiende a estabilizarse. En la mayoría de los procesos de meteorización en las rocas ígneas predominan los procesos químicos, mientras en las rocas sedimentarias predominan los procesos físicos, sin embargo, estos procesos se interrelacionan. La meteorización generalmente, avanza hacia abajo de la superficie y a través de las juntas y demás conductos de percolación, produciendo variaciones de intensidad, de meteorización y dejando bloques internos de material no descompuesto.¹⁴⁵

Cuando la meteorización es incipiente los bloques son grandes y controlan en parte el comportamiento del talud, pero a medida que se

¹⁴⁵ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

hace más intensa el factor más importante es la resistencia del suelo meteorizado que actúa como matriz de los bloques independientes.

4.4.2 MINERALES RESULTANTES

- **Caolinita:** los suelos con caolinita como mineral de arcilla presentan un comportamiento normal en los ensayos, en términos de baja a media plasticidad y permeabilidad. El efecto del aumento de humedad sobre las propiedades del suelo generalmente, no es importante.
- **Montmorillonita:** los materiales con contenidos apreciables de Montmorillonita poseen muy alta plasticidad y baja permeabilidad. El efecto del aumento de humedad puede resultar en una disminución importante de la resistencia al cortante. La Montmorillonita tiene un alto nivel de reacción con el cemento y la cal.
- **Aloisita:** al aumentar la humedad de una aloisita puede disminuir la resistencia al cortante en forma apreciable.
- **Sesquióxidos:** generalmente, cementan las partículas y su presencia equivale a una reducción en la plasticidad. Los óxidos de hierro y aluminio se acumulan como consecuencia de una cadena de procesos químicos y de lavado interno. La identificación del mineral de arcilla presente es muy importante para la valoración del comportamiento del suelo.

Existen varios métodos para la identificación del mineral de arcilla:

- Análisis termogravimétrico
- Escaneado con Electro-microscopio
- Microscopio óptico
- Espectro de difracción de Rayos X¹⁴⁶

4.4.3 EFECTO DEL CLIMA

El clima ejerce una profunda influencia en la meteorización, especialmente la humedad relativa y la temperatura. Las reacciones químicas prácticamente se duplican cada aumento de 10°C de temperatura. La influencia de la temperatura

¹⁴⁶ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

y la humedad en la descomposición de la roca en Suráfrica ha sido relacionada por Weinert's (1974) por medio de un índice climático:

$$N = \frac{12EJ}{Pa}$$

Donde:

EJ: evaporación en el mes de enero, el mes más cálido

Pa: lluvia anual

El valor de $N=5$ indica la transición de las condiciones cálida sub-húmedas, en las cuales la meteorización química predomina y la condición caliente semiárida en las cuales predominan los fenómenos físicos. Donde N es menor de 5 se deben esperar grandes espesores de suelo residual.¹⁴⁷

Nota: para información sobre las zonas climáticas por favor ver: [EL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE KÖPPEN-GEIGER PARA CLIMAS TROPICALES](#)

4.4.4 OTROS FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE METEORIZACIÓN

La frecuencia o espaciamiento de las discontinuidades afecta el proceso de meteorización y en los sitios en los cuales el espaciamiento de las discontinuidades es mayor, pueden aparecer masas de materiales no descompuestos como es el caso de los "Tors" o masas de granito sólido (Brand-1982) ([Figura 42](#)).

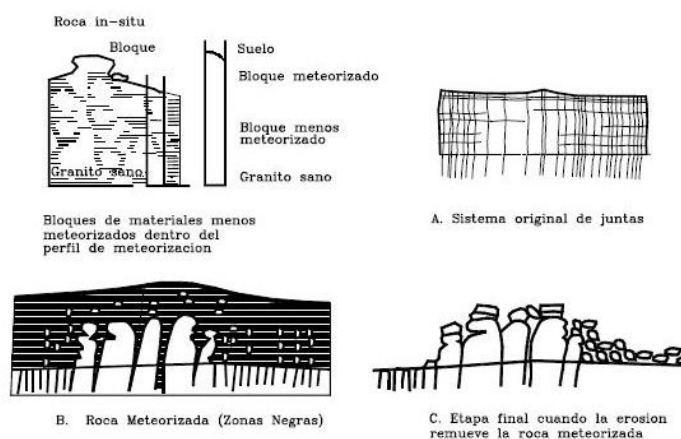


Figura 42: Etapas en la formación de torres (Tors) de granito bajo condiciones húmedas de meteorización en un medio tropical. (Fuente: Suárez, 1998)

¹⁴⁷ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

Las plantas y organismos vivos, tales como bacterias ayudan en el proceso de meteorización química. Otros elementos ambientales pueden incidir en la meteorización, pero sobre todo las condiciones de humedad y temperatura.

La topografía es un factor muy importante. En zonas de alta montaña predominan los procesos de meteorización mecánica, especialmente por acción del alivio a descargue de geo-presiones, los cambios de temperatura, los procesos de humedecimiento y secado y la cristalización de materiales.

La meteorización depende de la topografía del terreno, siendo mayor en los sitios de menor pendiente y la profundidad de la meteorización aumenta hacia abajo del talud.¹⁴⁸

4.4.5 MEDICIÓN DEL GRADO DE METEORIZACIÓN

El grado de meteorización puede medirse de varias formas:

- **Arenosidad:** la forma más sencilla es utilizando un cuchillo o una puntilla y medir la facilidad con que se puede cortar o el índice de arenosidad (Tabla 9).

Tabla 9: Medición del grado de descomposición de feldespatos mediante el ensayo de arenosidad. (Fuente: Suárez, 1998)

| Grado de Descomposición | Términos de arenosidad | Modo de reconocimiento |
|-------------------------|------------------------|--|
| Fresco | Duro | No puede ser cortado por un cuchillo, ni gravado por una puntilla. |
| Moderado | Arenoso | Puede ser cortado por un cuchillo o gravado por una puntilla. |
| Alto | Deleznable | Puede ser desmoronado a fragmentos de limo con las manos. |
| Completo | Blando | Puede ser moldeado fácilmente con las manos. |

- **Martillo de Schmidt:** una forma de evaluar en campo el grado de meteorización es utilizando el martillo de Schmidt. Este instrumento mide el rebote de un pistón metálico cargado con un resorte que se golpea contra la superficie de la roca. El rebote es un índice de la resistencia a la compresión y corte y puede utilizarse para determinar el grado de meteorización, previa elaboración de una carta de calibración similar a las

¹⁴⁸ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

presentadas por Irfan y Powel (1985) y por Cascini y otros (1991) las cuales se muestran en la figura siguiente.

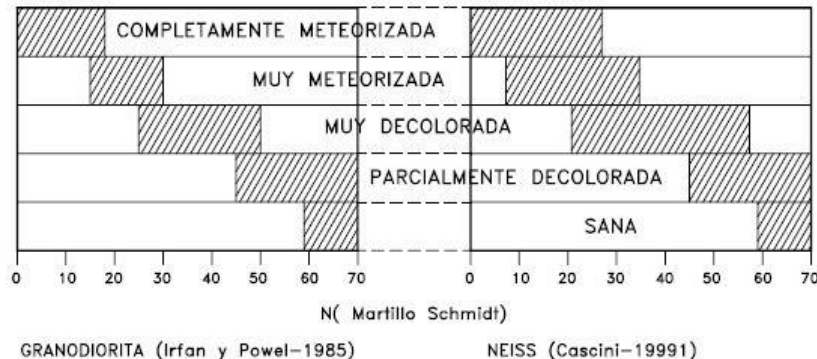


Figura 43: Relaciones entre el grado de meteorización y el índice de rebote del martillo de Schmidt. (Fuente: Suárez, 1998)

- **Ensayo de penetración:** los ensayos de penetración estándar o penetración de cono pueden relacionarse con la meteorización en materiales blandos y se puede diferenciar el suelo propiamente dicho de la roca meteorizada. Sin embargo, se requiere una calibración del sistema para cada formación, basada en un número grande de datos.
- **Índice Micro-petrográfico:** otra forma de medir el grado de descomposición es utilizando el índice micro-petrográfico en el cual, se determinan los porcentajes de materiales inalterados y alterados utilizando una magnificación de 100 veces, con un mínimo de tres secciones delgadas analizadas, y un mínimo de 90 puntos contados en cada caso (Irfan y Dearman – 1978).¹⁴⁹

$$\begin{aligned}
 \text{IMP} &= \frac{\% \text{ de materiales inalterados}}{\% \text{ de materiales alterados}} \\
 &= \frac{\% (\text{cuarzo} + \text{feldespatos inalterados} + \text{biotita inalterada})}{\% (\text{minerales alterados} + \text{vacíos} + \text{microgrietas})}
 \end{aligned}$$

En el Anexo 6, se muestra un trabajo realizado por Irfan (1988) en el cual se realizó un análisis micro-petrográfico de un granito.

¹⁴⁹ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

4.5 MICROESTRUCTURA DE LOS SUELOS RESIDUALES

Los términos microestructura, fábrica y textura se refieren al arreglo físico de los granos o partículas. Este arreglo junto con la mineralogía, el grado de meteorización y la estructura de discontinuidades determina el comportamiento ingenieril de la mayoría de los suelos residuales. La microestructura incluye la microfábrica, la composición y las fuerzas entre partículas. Las investigaciones de microestructura se realizan utilizando microscopios ópticos o microscopios electrónicos. La cementación de grupos de partículas es responsable de altas relaciones de vacíos, bajas densidades, altas resistencias, baja compresibilidad y alta permeabilidad. Generalmente la microestructura se analiza en dos niveles: Textura y Fábrica.

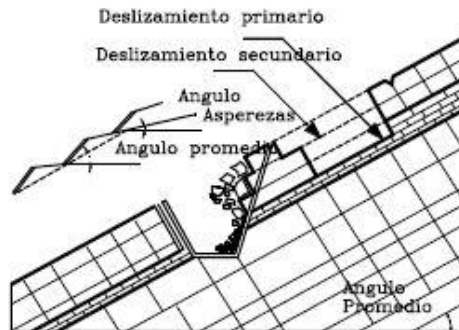
4.6 ESTRUCTURA DE LOS SUELOS RESIDUALES

Según Blight (1977) citando a Lumb, las juntas en la mayoría de las rocas ígneas y la estratificación en rocas sedimentarias permanecen en los suelos residuales. Igual cosa ocurre con la esquistosidad y la foliación de algunas rocas metamórficas.

1. Juntas o diaclasas: juegan un papel importante en las fallas de materiales residuales. Si se encuentran abiertas actúan como conductores de agua y activadores de presiones de poro. Por lo general, se encuentran más abiertas en la superficie que a profundidad. El agua al pasar a través de la junta produce meteorización de sus paredes, formando arena o arcilla que forma superficies de debilidad. Adicionalmente, el agua que viaja a lo largo de las juntas puede llevar arcilla en suspensión que es depositada en ellas y las discontinuidades se hacen muy peligrosas si se encuentran rellenas de arcilla. Blight afirma que la resistencia a lo largo de una estructura heredada puede ser la mitad de la resistencia en el suelo residual intacto y cita casos en que la resistencia es de solamente 1/3 de la resistencia a través del suelo. Las superficies de falla pueden coincidir con una junta o puede comprender varias familias de juntas diferentes formando bloques deslizantes.¹⁵⁰

¹⁵⁰ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

A. Buzamiento en la dirección del talud



B. Buzamiento en la dirección contraria al talud

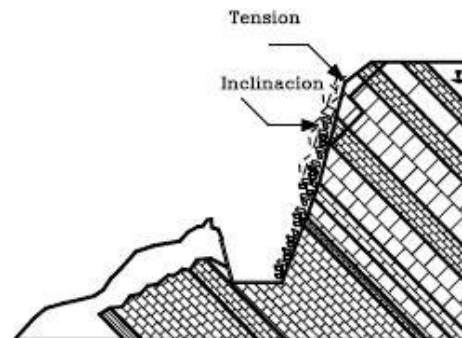


Figura 44: Efecto de las discontinuidades en la falla de los taludes. (Fuente: Suárez, 1998)

2. **Foliaciones:** son superficies generalmente paralelas de baja cohesión y por las cuales las rocas se pueden partir. Estas son debidas principalmente, a efectos de metamorfismo y son conocidas como pizarrosidad, esquistosidad, foliación, etc. Este fenómeno produce direcciones de debilidad muy similares a diaclasas, pero son menos separadas y pueden inducir el desmoronamiento de los suelos al momento de moverse, produciéndose flujos secos del material desintegrado.
3. **Estratificación:** esta genera superficies de debilidad por cambio de material. Cuando los materiales a lado y lado de la estratificación son de propiedades mecánicas similar trabajan en forma similar a una diaclasa, pero cuando la diferencia de propiedades es grande, como en el caso de estratificación de areniscas y Lutitas, la situación se hace más compleja, produciéndose concentración de agua en la interface y flujo dentro del material más permeable. Este fenómeno genera una zona de meteorización a partir del plano de estratificación que debilita esta superficie.¹⁵¹
4. **Fallas:** su influencia en los problemas de taludes en materiales residuales puede definirse así: Producen una zona de debilidad varios metros a lado y lado y en el caso de fallas de gran magnitud, de varios centenares de metros en dirección normal a éstas. En algunos casos las fallas son verdaderas familias de fallas que parecen especies de diaclasamiento. El material fracturado a lado y lado de la falla puede producir zonas inestables dentro de

¹⁵¹ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

la formación estable. Los planos de falla a su vez pueden estar rellenos de arcilla o completamente meteorizados, formando superficies débiles muy peligrosas. Es común que un deslizamiento esté directamente relacionado con la presencia de una falla geológica.

- 5. Intrusiones:** a veces los deslizamientos son generados por la presencia de intrusiones de materiales más permeables que traen su efecto en el régimen de aguas. Las diferencias en el grado de cristalización y el tamaño de los cristales también afectan la estabilidad de los taludes en rocas ígneas y metamórficas.¹⁵²

4.7 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SUELOS RESIDUALES

4.7.1 RESISTENCIA AL CORTANTE

La estabilidad de los suelos residuales muy meteorizados (grado VI en la clasificación de Hong Kong), se puede analizar utilizando las teorías tradicionales de la mecánica de suelos, con cierto grado de confiabilidad; sin embargo, a medida que se profundiza en el perfil las propiedades de los materiales cambian sustancialmente. Las muestras de roca son difíciles de muestrear y las muestras de tamaño para ensayos de laboratorio generalmente, dan estimativos muy pobres de la resistencia al cortante y de la permeabilidad. El caso más delicado de análisis es el de las saprolitas. Las saprolitas son generalmente, no saturadas, muy débilmente cementadas y muy heterogéneas, con varios sistemas de juntas heredadas (Mitchell y Sitar ,1982).

Vaughan (1988) explicó la relación entre la resistencia al cortante y la relación de vacíos en la siguiente forma:

- a. La resistencia derivada de la evolución del suelo y encontrada en equilibrio con el estado de esfuerzos, influencia el comportamiento del suelo y su dureza.
- b. La historia de esfuerzo durante la formación del suelo tiene muy poco efecto sobre las propiedades de los materiales.¹⁵³

¹⁵² Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

¹⁵³ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

- c. Los suelos tienen una variedad muy amplia de mineralogía y resistencia de los granos.
- d. Los suelos en el sitio tienen un rango muy amplio variable de relación de vacíos. Las deformaciones pequeñas inducidas durante el muestreo pueden debilitar las uniones y disminuir la resistencia al cortante. Brand (1985) sugirió que las saprolitas a bajas presiones efectivas tienen resistencias más altas que las obtenidas en ensayos triaxiales con envolvente de falla de línea recta.¹⁵⁴

4.7.2 VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTANTE

La cohesión y la fricción entre las partículas o bloques varían considerablemente de acuerdo al tipo de suelo, contenido de minerales, tamaño y forma de las partículas, humedad, presión de poros y la historia de la formación del material. Adicionalmente, cuando ha ocurrido anteriormente un movimiento, la cohesión y la fricción han disminuido especialmente, cerca de las superficies de falla o fractura. La resistencia al cortante es generalmente, menor en el suelo que en el saprolita o en la roca, pero las formaciones residuales tienen generalmente, superficies de discontinuidad equivalentes a superficies de debilidad de baja resistencia que facilitan la posibilidad de movimientos. Es común que la resistencia al cortante sea menor a lo largo de las discontinuidades heredadas, que en la matriz del material residual.

Según Massey y Pang (1988) el comportamiento y la resistencia al corte de los materiales son una función de:

- a. La naturaleza de la roca original.
- b. La mineralogía y microfábrica derivada de los procesos de meteorización física y química.
- c. El grado de saturación y los cambios inducidos por modificaciones del contenido de humedad.
- d. La presencia, orientación, espaciamiento, persistencia e imperfecciones de las discontinuidades heredadas, junto con la naturaleza de los rellenos o coberturas.

¹⁵⁴ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

- e. La presencia, forma y distribución de material de roca menos meteorizada en forma de bloques o bandas dentro de la matriz más fuertemente meteorizada.¹⁵⁵

Tiene gran importancia en el comportamiento de un talud el efecto de la presión de poros a lo largo de contactos de materiales diferentes, zonas de mayor permeabilidad y discontinuidades heredadas.

La resistencia al corte disminuye por acción de dos efectos:

1. La disminución de los esfuerzos efectivos de acuerdo al principio de Coulomb.
2. La separación de las superficies a lado y lado de la discontinuidad, debidas a movimientos de compresión elastoplástica de los materiales, por acción de la fuerza diferencial generada por la presión de poros "preferencial" a lo largo de la discontinuidad. Al aumentar la presión de poros la discontinuidad tiende a separarse y la resistencia al corte disminuye ([Figura 45](#)).

De estudios realizados por el Autor, discontinuidades con ángulo de fricción para presiones efectivas de aproximadamente 30° se comportan en la práctica como si el ángulo de fricción fuera de menos de 15° , al producirse presiones de poros "preferenciales" a lo largo de las discontinuidades de valores superiores a más de 3 metros de columna de agua.¹⁵⁶

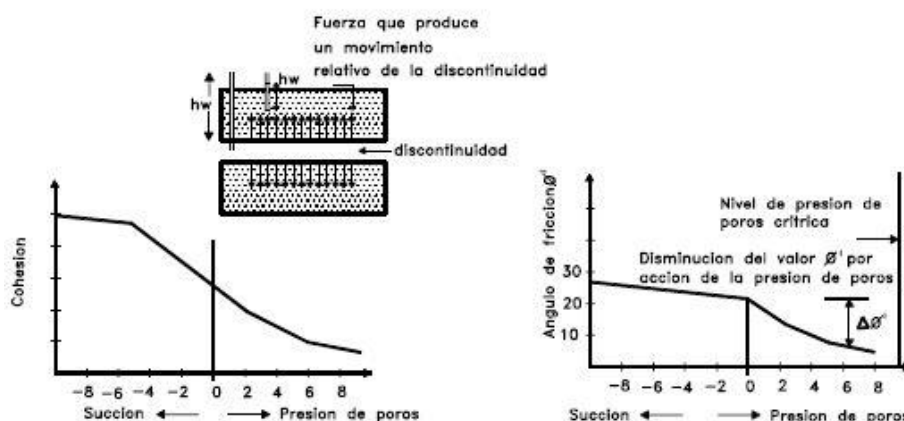


Figura 45: Variación de cohesión y el ángulo de fricción dentro de una discontinuidad por el aumento de la humedad y de la presión de poros. (Fuente: Suárez, 1998)

¹⁵⁵ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

¹⁵⁶ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

4.7.3 LA COHESIÓN

La cohesión es una propiedad determinante en el comportamiento de un suelo residual. En suelos no saturados hay una cohesión aparente, la cual es el producto de las presiones negativas en el agua de poros, la cual desaparece por saturación, sin embargo, en muchos casos, la cohesión es debida a la cementación de productos precipitados (Sowers,1985). La cohesión generalmente, no es continua a lo largo de una superficie y desaparece con frecuencia por la abertura de las discontinuidades debida a fuerzas de tensión o a presión de poros.¹⁵⁷

4.7.4 ÁNGULO DE FRICCIÓN

El valor del ángulo de fricción interna de los materiales disminuye con el avance del proceso de meteorización. En ensayos realizados en materiales de granitos y Neisses en Colombia, se encuentran variaciones de 26 a 38°, similares a los indicados por Deere y Patton (1971), para materiales de Lutitas entre 10 y 35° y para materiales de areniscas entre 25 y 45°, en concordancia a los valores propuestos por Sowers - 1981. En materiales derivados de areniscas, el Autor ha encontrado ángulos de fricción a lo largo de discontinuidades rellenas de arcilla con valores de 10 a 15°, cuando los ángulos de fricción de discontinuidades sin relleno dan valores de 35 a 38° en el mismo talud. Esta realidad dificulta la evaluación del comportamiento de los suelos residuales utilizando los modelos de la mecánica de suelos tradicional.

4.7.5 LA ENVOLVENTE DE FALLA

En los suelos residuales la envolvente de falla puede tener una forma no lineal, especialmente en el rango de presiones bajas. Brand (1985) presenta el caso de los suelos residuales derivados de granitos en Hong Kong, donde la envolvente de falla presenta una curva en los niveles de esfuerzos normales bajos sin que se presente un caso de cohesión ([Figura 46](#)).¹⁵⁸

¹⁵⁷ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

¹⁵⁸ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

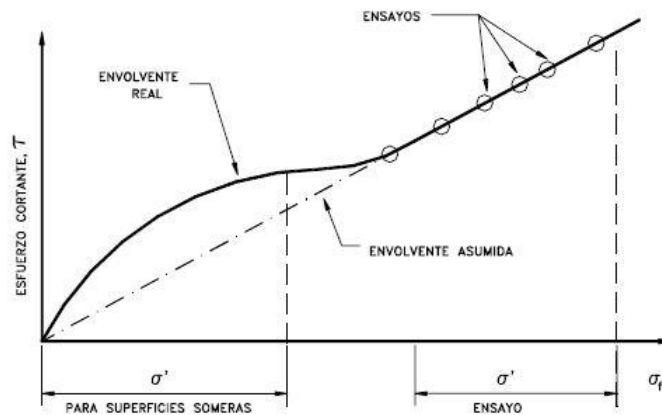


Figura 46: Envoltente real de falla para suelos residuales de granitos en superficies someras (Brand, 1985)

4.7.6 FACTORES QUE AFECTAN EL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN

1. **Historia de esfuerzos:** los suelos residuales se forman por una historia de descomposición o meteorización y esta a su vez es afectada por procesos tectónicos de compresión, relajación, corte, etc. Estos esfuerzos tectónicos han producido una serie de cambios en el estado de los materiales, los cuales equivalen generalmente a disminuciones en los valores de la resistencia al cortante. La mayoría de los suelos residuales se comportan como si fueran sobre-consolidados.
2. **Resistencia de los granos o partículas:** las partículas que conforman un suelo residual muestran generalmente una gran variabilidad en la resistencia al aplastamiento o trituración y esta resistencia influye en forma importante sobre los valores de la resistencia al cortante. Por ejemplo, los suelos residuales con partículas de cuarzo resistentes al aplastamiento muestran ángulos de fricción relativamente altos.¹⁵⁹
3. **Unión y cementación entre partículas:** una de las características básicas de los suelos residuales es la existencia de uniones entre las partículas. Estas uniones pueden ser de cementación por la depositación de carbonatos, hidróxidos, materia orgánica, etc., o por la re-precipitación de agentes cementantes como los silicatos o el crecimiento de uniones durante la

¹⁵⁹ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

alteración química de los minerales. Las uniones entre partículas disminuyen a medida que avanza el proceso de descomposición. La roca poco meteorizada posee una resistencia al cortante mucho mayor que la roca descompuesta.¹⁶⁰

4. **Estado de alteración o remoldeo:** la resistencia al cortante es muy sensitiva a la alteración del material. Esta alteración puede deberse a causas naturales o antrópicas. Por ejemplo, el uso de explosivos para la ejecución de un corte puede disminuir la resistencia al cortante de toda la ladera. La estructura también puede destruirse durante la saturación o la toma de muestras. La resistencia al corte del suelo varía en forma grande de una muestra natural a otra compactada, debido al efecto de cementación y es difícil poder obtener valores confiables de diseño.
5. **Las estructuras heredadas y discontinuidades:** la resistencia de las Saprolitas puede ser determinada casi en su totalidad por los detalles estructurales. La resistencia de las discontinuidades es determinada también por el grado de meteorización y la cementación secundaria o laterización. En ocasiones, puede determinarse la resistencia de la masa de suelo mapeando cuidadosamente las discontinuidades de la Saprolita y midiendo la resistencia a lo largo de esas discontinuidades.
6. **La anisotropía:** la resistencia al cortante depende de la dirección del esfuerzo con relación a la fábrica del suelo. Por ejemplo, en rocas metamórficas donde se encuentra mica presente, las superficies de las partículas de mica actúan como zonas de debilidad.¹⁶¹
7. **La humedad:** se ha detectado que en los suelos tropicales la humedad afecta sensiblemente su resistencia al corte. Se observa en ocasiones disminución de hasta 50% de la cohesión y 30% del ángulo de fricción por el proceso de saturación (Foss, 1973). Aparentemente la cementación es afectada en forma importante por la humedad. Es común el colapso de la estructura del suelo al saturarse, produciendo asentamientos diferenciales por saturación accidental por fugas de agua de conductos enterrados o por mal control del

¹⁶⁰ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

¹⁶¹ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

agua de escorrentía. Al secarse la Aloisita el agua de la capa hidratada se seca y se forma Metalloysita, lo cual cambia las propiedades del material y su comportamiento. Lumb (1975) ensayando muestras saturadas y no saturadas encontró que las envolventes de falla, en ensayos drenados dependían en forma importante de la saturación y de la relación de vacíos, en granitos y en suelos volcánicos. La cohesión obtenida representa lo que se llama Cohesión aparente, como un resultado de la succión capilar.

4.7.7 PERMEABILIDAD Y FLUJO DE AGUA

En un perfil de meteorización, la permeabilidad aumenta al incrementarse el tamaño de las partículas en el perfil de meteorización, para luego disminuir en la roca intacta, creando una zona de máxima concentración de agua que puede determinar la posición de la zona crítica de falla. Esto es muy corriente en perfiles de Granitos, Neisses y Esquistos y algunas veces en Lutitas y Areniscas. La mayoría de los problemas de estabilidad de laderas en suelos residuales se relaciona con infiltraciones debidas a la permeabilidad de los materiales. La infiltración de agua elimina las presiones negativas, aumenta las presiones positivas, genera corrientes de agua y sube los niveles freáticos.

A pesar de la influencia grande de la Permeabilidad en la estabilidad de las laderas, existe muy poca información sobre la permeabilidad, de los suelos residuales. La variación en la macrofábrica del perfil de meteorización puede resultar en grandes variaciones de permeabilidad tanto lateralmente como a profundidad. La variación en tamaño de granos, tamaño de vacíos, mineralogía, grado de fisuración y las características de las fisuras afectan los valores de la permeabilidad.¹⁶²

Tabla 10: Permeabilidad de perfiles de meteorización en rocas ígneas y metamórficas (modificado de Deere y Patton, 1971)

| Zona del perfil | Permeabilidad relativa |
|---|------------------------|
| Suelos orgánicos | Media a alta |
| Suelos residuales maduros o coluviones arcillosos | Baja |
| Suelos saprolíticos o suelos residuales jóvenes | Media |
| Saprolitas | Alta |
| Roca meteorizada | Media a alta |
| Roca sana | Baja a media |

¹⁶² Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

La permeabilidad de los suelos saprolíticos está controlada generalmente, por la estructura de los materiales. Como la permeabilidad es gobernada por detalles de escala macro, los ensayos de laboratorio generalmente, no son representativos debido a que su escala es muy pequeña. El método más común de ensayo de permeabilidad en el campo es la permeabilidad realizada en un sondeo o perforación.

Dado que los suelos residuales existen zonas de alta transmisibilidad a través de las discontinuidades, la permeabilidad es alta y las presiones de poro pueden reaccionar muy rápido a las lluvias fuertes por ejemplo saturándose y luego disminuyendo rápidamente y como consecuencia dichos cambios hacen muy difícil la determinación de las presiones de poro para el análisis de deslizamientos.¹⁶³

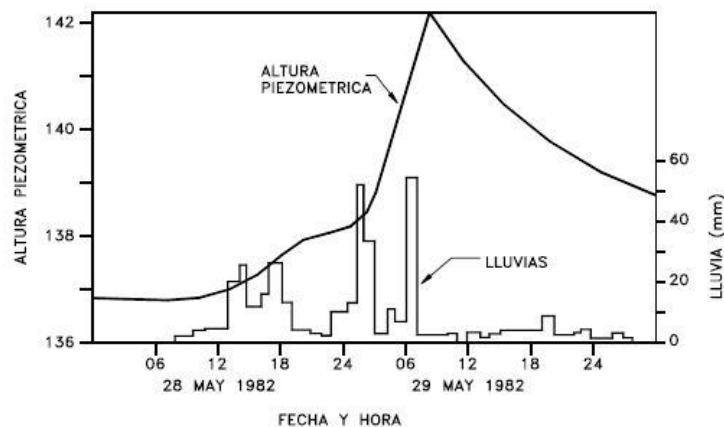


Figura 47: Ascenso rápido del nivel de agua en una sola lluvia en los granitos descompuestos de Hong Kong (Brand 1985).

El avance del frente húmedo es un factor muy importante en el análisis de estabilidad. El grado de saturación después de un evento lluvioso varía con la profundidad en el perfil (Figura 48). La eliminación de la succión en suelos no saturados debido a la saturación puede producir fallas repentinas de taludes. En una lluvia fuerte al ocurrir una infiltración durante un tiempo t , el frente húmedo avanza una distancia h , de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$h = \frac{kt}{n(S_f - S_o)}$$

Donde:

¹⁶³ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

k = Coeficiente de permeabilidad

n = Porosidad

S_f = Saturación final

S_o = Saturación inicial

Esta ecuación sugiere que el frente húmedo avanza más rápidamente si la lluvia antecedente ha incrementado S_o . Vaughan (1985) demostró que para un perfil que tiene una permeabilidad decreciente, al profundizarse se genera inestabilidad, mientras si la permeabilidad aumenta, se genera drenaje natural.¹⁶⁴

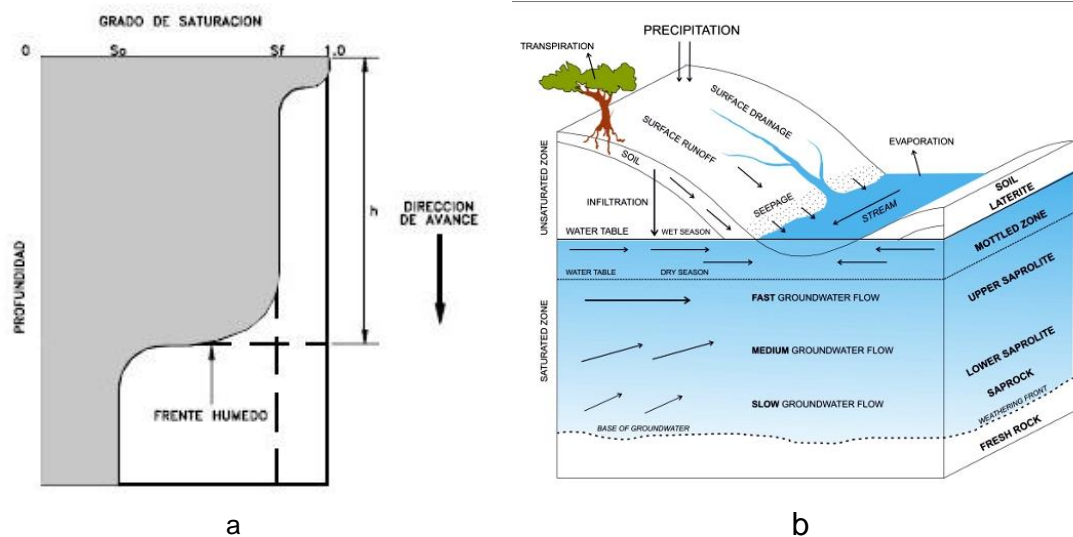


Figura 48: a) Avance del frente de humedad en suelos residuales. (Fuente: Suárez, 1998) b) Modelo de bloques del flujo de agua subterránea en la regolita laterita (Fuente: Voormeij, 2016)

4.7.8 COMPRESIBILIDAD

Las propiedades de consolidación y permeabilidad dependen de la estructura del suelo, teniendo que distinguir entre suelos naturales y suelos compactados. La permeabilidad varía típicamente entre 1×10^{-2} a 1×10^8 cm/seg. y el coeficiente de consolidación de 1×10^{-1} a 1×10^{-3} cm²/seg. En general para un mismo Límite Líquido la compresibilidad del suelo tropical es menor que la indicada por Terzaghi Peck. Según Vargas, para suelos tropicales¹⁶⁵:

$$C_c = 0.005 (LL + 22) - 0.1$$

¹⁶⁴ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

¹⁶⁵ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

Generalmente las curvas de consolidación exhiben una preconsolidación aparente debida a la presencia de cementación. Esta preconsolidación aparente disminuye y la compresibilidad aumenta cuando los suelos son saturados.¹⁶⁶

4.7.9 COMPACTACIÓN

Las características de compactación de los suelos residuales tropicales son influenciadas por su gradación, resistencia a la desintegración de los grupos de partículas, composición mineral y esfuerzo de compactación. En consecuencia, las características de compactación varían en un rango muy amplio.

La mayoría de suelos ensayados por el Autor poseen valores de peso unitario que varían entre 1.7 y 2.2 Ton/m. y las humedades óptimas poseen un rango desde 6 a 22%. A medida que aumenta el contenido de arcilla o finos presentes, aumenta la humedad óptima y disminuye el peso unitario máximo. Townsend (1985) reportó que para algunos suelos naturales con permeabilidades de campo de 10^{-4} a 10^{-5} cm/seg., la compactación producía una disminución de las permeabilidades de 10^{-5} a 10^{-7} cm/seg.

4.7.10 ENSAYOS EN SUELOS RESIDUALES

La validez de los ensayos de “Laboratorio” en suelos residuales es cuestionable, aunque no puede discutirse que son útiles para la toma de decisiones de diseño. Muestras totalmente inalteradas, aunque son difíciles de obtener, son deseables y es recomendable que las muestras sean lo más grande posibles. En algunos casos como en “Coluviones” los ensayos de laboratorio son totalmente inapropiados y sólo los ensayos de campo dan resultados de alguna confiabilidad. El ensayo de penetración estándar (SPT), tanto para suelos granulares como arcillosos, permanece como el más comúnmente empleado para conocer la resistencia de todo tipo de suelos residuales.¹⁶⁷

4.7.11 DEPENDENCIA DEL FACTOR AGUA

El perfil de meteorización y las propiedades de suelos tropicales dependen principalmente del régimen de lluvias y en general del ambiente climático de su

¹⁶⁶ Tomado de: “Deslizamientos y estabilidad de taludes” ... J. Suárez.

¹⁶⁷ Tomado de: “Deslizamientos y estabilidad de taludes” ... J. Suárez.

formación. En zonas de alta precipitación la relación de vacíos es alta y existe una dependencia directa de la relación de vacíos con la precipitación (Figura 49). El proceso de disolución, lavado y recementación afecta otras propiedades del suelo como son la densidad y cohesión. El fenómeno de lavado de finos y ciertos compuestos químicos es gradual y va produciendo un deterioro permanente en la calidad de los materiales que hace que los taludes se vuelvan inestables con el paso del tiempo.¹⁶⁸

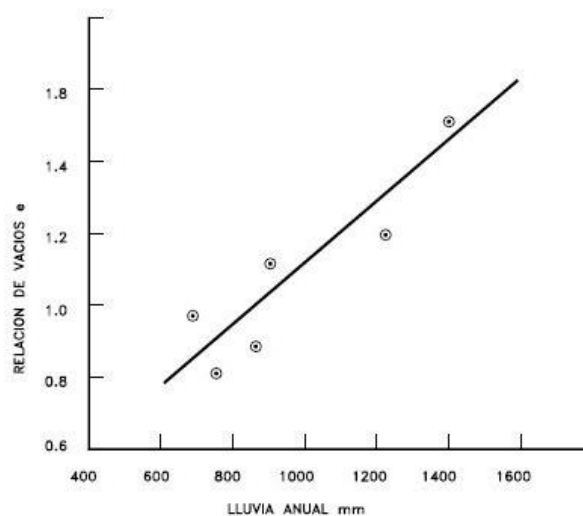


Figura 49: Relación entre la relación de vacíos y la precipitación en un granito altamente meteorizado y lavado, en Suráfrica. (Bligh 1997).

4.8 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS TROPICALES

En esta sección por favor referirse a HORIZONTES TROPICALES COMUNES. También se pueden considerar la clasificación FAO-UNESCO (Anexo 7) y el sistema de clasificación de Wesley (

Anexo 8).

4.9 CARACTERIZACIÓN DEL PERFIL DE SUELOS RESIDUALES

El perfil de meteorización es muy importante en la estabilidad de los taludes en un suelo residual, porque este generalmente controla la superficie de falla

¹⁶⁸ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

potencial, el mecanismo de falla, el régimen de hidrología subterránea y la distribución de la presión de poros (Brand, 1985). Generalmente, los perfiles de los suelos residuales se componen de zonas de diferente meteorización que van desde el suelo propiamente dicho hasta la roca sana o fresca (Figura 50). Se han tratado de definir zonas homogéneas, pero en la práctica no existe zonificación real dentro de un perfil, sino un cambio gradual de las características de los materiales con la profundidad, incluso es muy difícil definir en forma precisa el límite de la roca fresca con el suelo residual o la roca descompuesta.¹⁶⁹

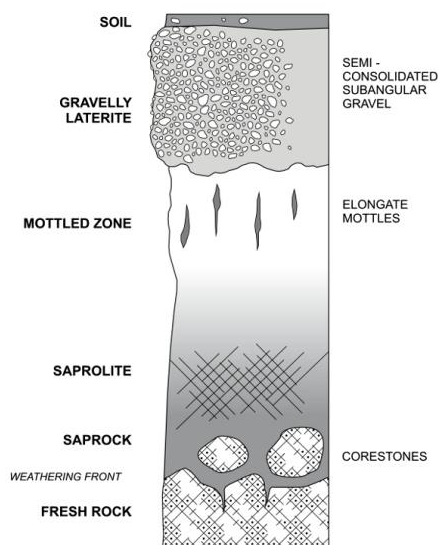


Figura 50: Perfil de regolita idealizada de Uganda (Fuente: Voormeij, 2016)

Como los suelos residuales se descomponen de la roca parental, el perfil de suelo representa una historia del proceso de meteorización. Los sistemas de clasificación de perfiles presentan diferentes estados de meteorización y separan los perfiles verticales en diferentes zonas. La permeabilidad y la resistencia al cortante varían gradualmente con la profundidad, las cuales controlan la respuesta a la infiltración de la lluvia y la localización de las superficies de falla. Los espesores del perfil de suelo y las propiedades dependen de la roca parental, discontinuidades, topografía y clima. Como estos factores varían horizontalmente, el perfil puede variar en distancias relativamente cortas.

¹⁶⁹ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

Además, se forman perfiles muy profundos en regiones tropicales en donde los agentes meteorizadores son especialmente fuertes.¹⁷⁰

Las discontinuidades afectan en forma significativa la permeabilidad y la resistencia al cortante de la masa de suelo, por esta razón en los ensayos de laboratorio de muestras relativamente, pequeñas se obtienen coeficientes de permeabilidad y resistencias al cortante muy diferentes a la realidad.

A medida que se avanza en el perfil las propiedades de los suelos van cambiando en forma rápida y esto dificulta no solamente los ensayos sino los análisis, debido a que la estructura del material se vuelve muy importante a medida que se va profundizando, pasando de un comportamiento de suelo a un comportamiento de roca. Las clasificaciones más utilizadas para los grados de meteorización de un perfil de suelo residual son las desarrolladas en Hong Kong (Phillipson and Brand - 1985), El Reino Unido (Dearman and Turk -1985) y los Estados Unidos (Sowers - 1985).¹⁷¹

Tabla 11: Sistema de clasificación del perfil de meteorización empleado en Hong Kong (Oficina de control geotécnico, 1979)

| Grado | Descomposición | Detalles de diagnóstico en las muestras |
|-------|----------------------------|--|
| VI | Suelo | No aparece textura reconocible de roca. Las capas superficiales pueden contener materia orgánica y raíces. |
| V | Completamente descompuesta | Roca completamente descompuesta pero aún aparece textura de roca ligeramente reconocible. |
| IV | Muy descompuesta | Pedazos grandes que pueden ser destruidos con las manos. |
| III | Moderadamente descompuesta | Pedazos grandes que no pueden ser descompuestos por las manos (muestras tomadas con broca a rotación). |
| II | Algo descompuesta | Aparece como roca sana pero tiene manchas muestras de descomposición. |
| I | Roca sana | |

La variabilidad de las propiedades de resistencia, humedad y permeabilidad, a través del perfil dificulta la utilización de los modelos tradicionales de la mecánica de los suelos "homogéneos e isotrópicos". Otros elementos disturbantes son las discontinuidades y la presencia de bloques de materiales diferentemente

¹⁷⁰ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

¹⁷¹ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

meteorizados. Las características de un perfil de suelo residual dependen del tipo y propiedades de la roca originaria.¹⁷²

Los perfiles son marcadamente diferentes para formaciones de origen ígneo-metamórfico y para formaciones sedimentarias. Los perfiles de suelos residuales producto de rocas foliadas o estratificadas son marcadamente isotrópicos y generalmente son más débiles y permeables a lo largo de los planos de orientación (Sowers, 1985).¹⁷³

4.10 PERFILES DE METEORIZACIÓN Y DESLIZAMIENTOS DE LOS TALUDES EN ALGUNOS SUELOS RESIDUALES

La resistencia a la descomposición química varía de una roca a otra, siendo las Cuarcitas las más resistentes y dentro de las más conocidas por su descomposición rápida se encuentran las Calizas, las Lutitas y los Granitos. La meteorización produce la pérdida de las propiedades de cementación de la roca original y esta depende del tipo de roca:

- **Suelos residuales de granitos dioritas neises y esquistos:** en suelos de origen ígneo-metamórfico generalmente hay un solo perfil con suelo en la superficie, luego el saprolita y finalmente las rocas alterada y sana. ([Figura 51](#)). La profundidad del perfil de meteorización depende no solo de las características de la roca y del medio ambiente sino también de la pendiente del terreno; en zonas de pendiente alta los perfiles son poco profundos y los materiales tienden a ser granulares, mientras en las zonas de pendiente suave los perfiles son más profundos y los materiales más arcillosos. Este fenómeno puede controlar el tipo de deslizamiento que se genera superficial en pendientes altas y profundo en pendientes medianas.¹⁷⁴ ([Figura 52](#))

¹⁷² Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

¹⁷³ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

¹⁷⁴ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.


| PERFIL | DETALLES | GRADO (material) | VARIACION U.S.C.S | COLOR | DISTRIBUCION GRANULOMETRICA 0 25 50 75 100 | DESCRIPCION |
|--|----------|---------------------------------|-------------------|----------|--|--|
|  | | VI (Suelo) | MH | Rojo | % Arcilla | Arena y arcilla sin textura de roca, espesor variable de 0 a 8 metros. Las capas superficiales pueden contener raíces y materia orgánica. |
| | | V Totalmente meteorizada | ML | Moteado | % Limas | Arenas, arcillas y gravas. Se observan algunas estructuras heredadas de la roca. |
| | | IV (Muy meteorizada) | SM | Amarillo | % Arena | Material de transición (espesor variable a muy delgado). Predominan las Arenas y gravas arcillosas. Aparecen muy claras las discontinuidades y bloques aislados de roca. |
| | | III (Moderadamente meteorizada) | GM | Palido | | Aparecen bloques grandes de roca en matriz de arena y grava arcillosa. |
| | | II (algo meteorizada) | | | | Roca con decoloración o descomposición de las discontinuidades. Se pueden separar los bloques pero son difíciles de romper. |
| | | I (Roca sana) | | | | No aparece decoloración o descomposición de las discontinuidades. Se pueden separar los bloques pero son difíciles de romper. |

Figura 51: Perfil de meteorización en materiales de origen Igneo-Metamórfico. (Fuente: Suárez, 1998)

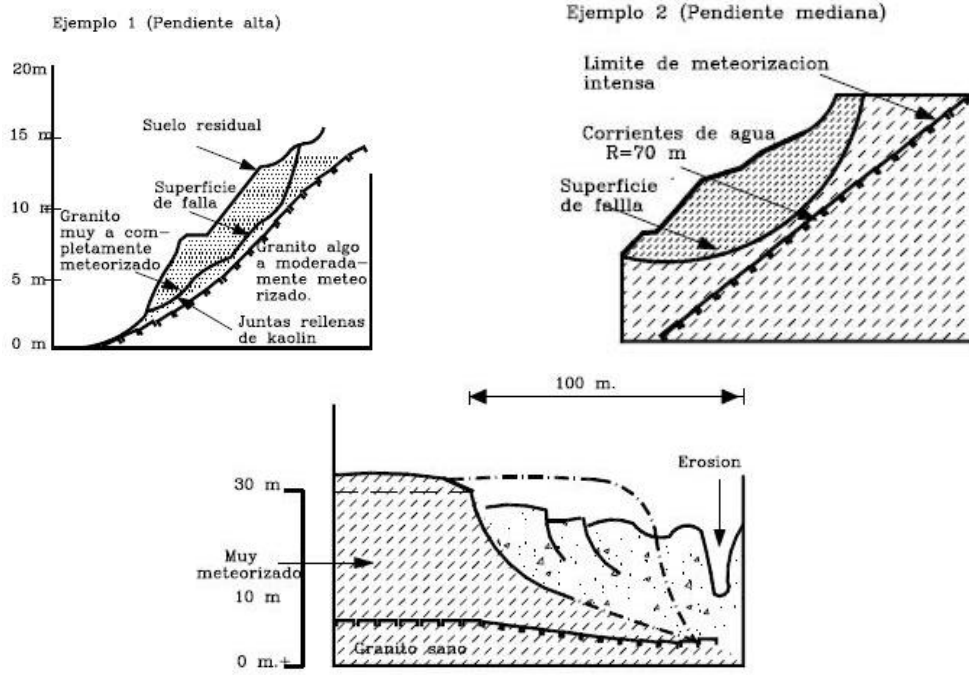


Figura 6.18. Fallas en perfiles de granito meteorizado de diferente pendiente.

Figura 52: Fallas en perfiles de granito meteorizado de diferente pendiente. (Fuente: Suárez, 1998)

- Suelos residuales de lutitas y areniscas:** las lutitas constituyen cerca de la mitad del volumen de rocas sedimentarias sobre la corteza terrestre y han sido algunos de los materiales degradados más complicados de manejar en obras de ingeniería civil. Las lutitas al meteorizarse forman inicialmente capas de arcilla de apariencia laminar, las cuales en el proceso final de meteorización se convierten en mantos gruesos de arcilla blanda laminada. En Lutitas o en alteraciones de areniscas y Lutitas existe un perfil general similar a los propuestos en los sistemas de clasificación, pero a su vez cada capa, entre planos muy definidos de estratificación genera su propio perfil por meteorización diferencial.¹⁷⁵ (Figura 53)

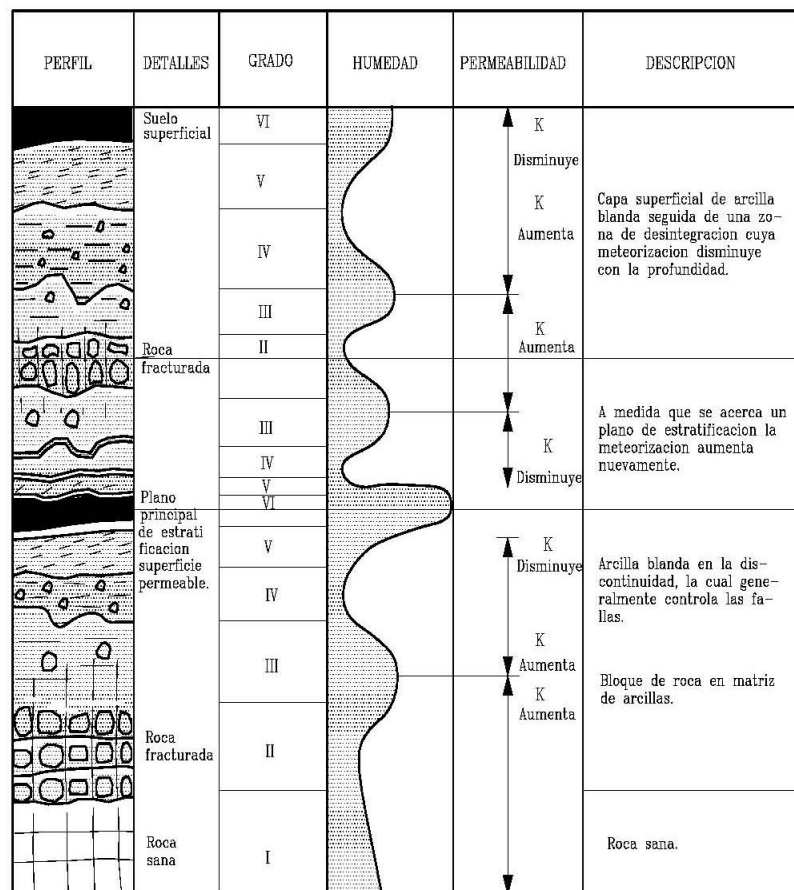


Figura 53: Perfil general de meteorización en materiales de origen sedimentario (Fuente: Suárez, 1998)

Los Planos de Estratificación y las Fallas o Fracturas importantes o las capas de materiales algo permeables generan superficies de cambio brusco en el perfil,

¹⁷⁵ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

los cuales controlan generalmente las fallas. Condiciones similares se presentan cuando aparecen diques, bloques y cantos de grandes materiales geológicamente diferentes.

De las rocas sedimentarias, las Lutitas son las más susceptibles a deslizamientos. Las Lutitas están conformadas por capas de diferente composición y por lo tanto de diferentes propiedades, tales como capas de Bentonita, zonas de margas y planos de estratificación que pueden controlar las superficies de deslizamiento y las trayectorias de infiltración. Las intercalaciones de rocas permeables e impermeables pueden representar situaciones propicias para la ocurrencia de deslizamientos, como en el caso de mantos de areniscas y arcillolitas intercaladas. De acuerdo a la posición de los diversos mantos y el buzamiento de los estratos se puede presentar un mecanismo de falla.¹⁷⁶

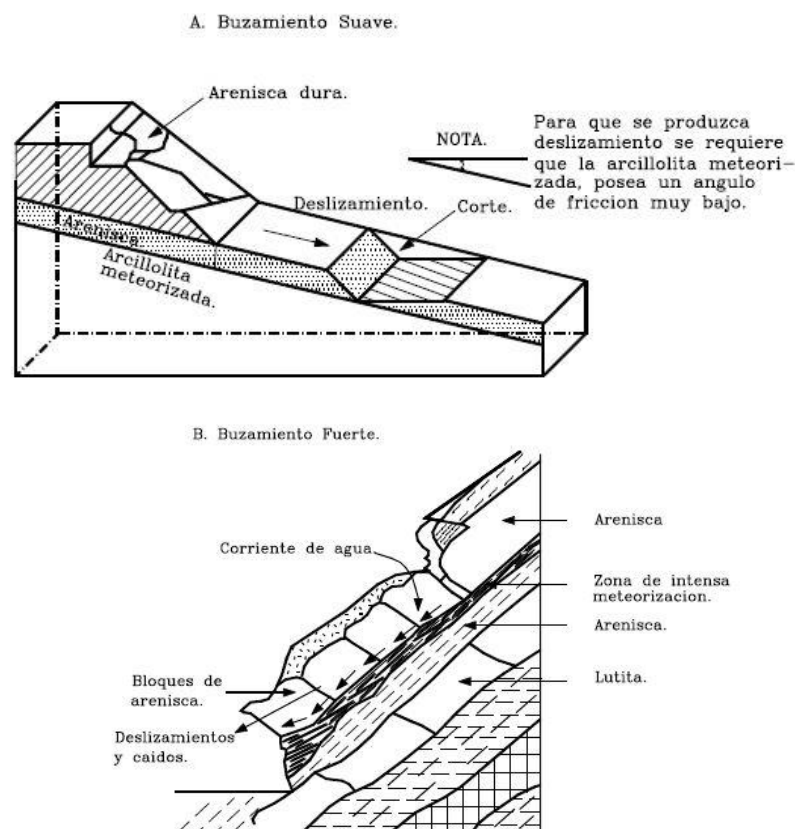


Figura 54: Deslizamientos en intercalaciones de Areniscas y Lutitas (Fuente: Suárez, 1998)

- **Suelos residuales de calizas:** presentan perfiles relativamente profundos de meteorización en presencia de humedades altas en pendientes suaves. En

¹⁷⁶ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

las Calizas o Rocas Carbonatadas la meteorización es controlada por el proceso de disolución en agua (Sowers - 1985); los materiales no solubles o que no han tenido suficiente contacto con el agua para disolverse se mantienen intactos mientras los solubles se descomponen totalmente.¹⁷⁷

Los deslizamientos generalmente están controlados por los planos de estratificación siendo las superficies de falla comúnmente tangentes a estos (Figura 55). Adicionalmente, se pueden presentar ductos internos o cavernas, los cuales generan corrientes concentradas de agua subterránea y es común encontrar deslizamientos en los sitios de afloramiento de estas corrientes.

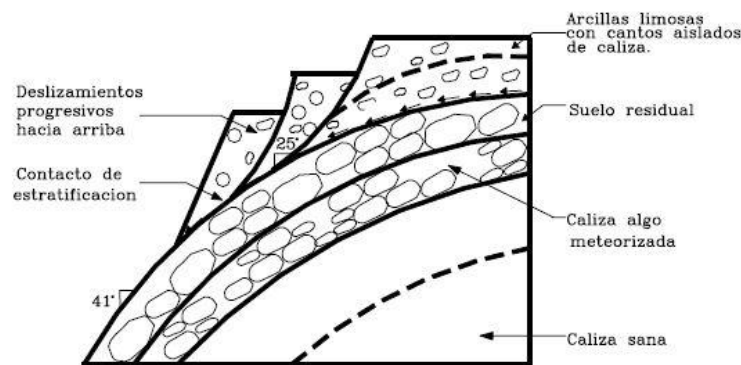
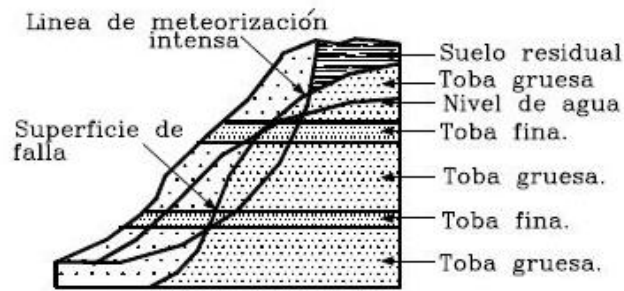


Figura 55: Deslizamientos en suelos residuales de Calizas (Málaga-Colombia) (Fuente: Suárez, 1998)

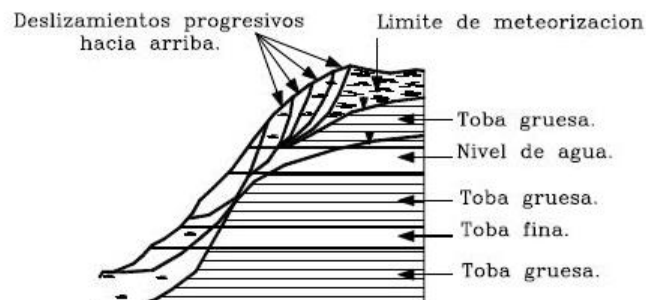
- **Suelos residuales de origen volcánico:** andesitas, basaltos, etc.: Los perfiles de meteorización en suelos de origen volcánico son similares en su apariencia general a los de los suelos de origen ígneo intrusivo, pero en este caso las discontinuidades tienden a ser horizontales y verticales y los deslizamientos tienden a ser controlados por las características del perfil de meteorización, aunque las discontinuidades pueden afectar el mecanismo de movimiento. El tipo de falla que se presenta depende del espesor y la pendiente inferior del manto de meteorización intensa, donde aparecen diques, bloques o cantos grandes de materiales geológicamente diferentes.¹⁷⁸

¹⁷⁷ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

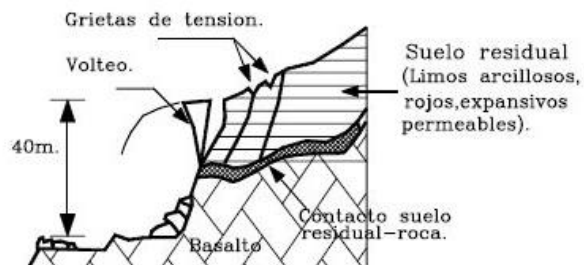
¹⁷⁸ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.



A. Falla en un talud natural de materiales de origen volcánico con perfil profundo de meteorización



B. Falla al hacer un corte en un talud de materiales de origen volcánico con perfil profundo de meteorización



C. Falla al hacer un corte en un talud de suelos residuales de origen volcánico con perfil de meteorización semi-horizonta profundo

Figura 56: Fallas en materiales de origen volcánico (Fuente: Suárez, 1998)

- **Formaciones aluviales meteorizadas:** en ocasiones se encuentran formaciones aluviales de edad Cuaternario o Terciario que han sufrido procesos de meteorización por descomposición, desintegración, oxidación y recementación.¹⁷⁹ Los perfiles de meteorización son poco profundos en las formaciones poco permeables, pero pueden alcanzar grandes profundidades en los materiales permeables y son escasas las discontinuidades heredadas,

¹⁷⁹ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

las cuales son comúnmente verticales y discontinuas, ocasionadas por fenómenos de secamiento- humedecimiento o por sismos (); sin embargo, en los materiales que han sufrido procesos de neotectónica se pueden presentar discontinuidades similares a las diaclasas de las rocas.

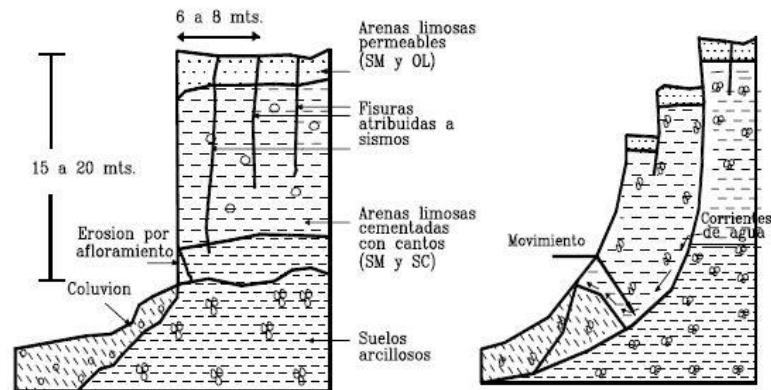


Figura 57: Deslizamientos en taludes verticales de suelos aluviales (Fuente: Suárez, 1998)

Las formaciones aluviales de arenas y gravas tienden a formar superficies de falla en planos más o menos rectos y en casos de alturas grandes de capilaridad, se presentan fallas casi verticales, con la presencia de grietas de tensión y una componente pequeña de volteo. En formaciones arcillosas las fallas de deslizamiento tienen superficies generalmente curvas.¹⁸⁰

4.11 ESTABILIZACIÓN DE TALUDES Y LOS SISTEMAS DE BIOINGENIERÍA

La estabilidad de taludes se rige por la carga, que es la fuerza motriz que causa el fallo, y la resistencia, que es la fuerza del sistema de raíces del suelo. El peso de los árboles que crecen en una pendiente aumenta la carga, pero las raíces de los árboles sirven como refuerzo del suelo y aumentan la resistencia. La vegetación influye en la estabilidad de los terrenos indirectamente a través de su efecto sobre el régimen de humedad del suelo. La vegetación intercepta la lluvia y extrae el agua del suelo a través de la evapotranspiración. Esto reduce la humedad del suelo y la presión de los poros, aumenta la resistencia al corte del suelo y aumenta la resistencia.¹⁸¹ Las raíces de la vegetación tienden a aumentar la permeabilidad del suelo y aumentan la infiltración y la humedad del suelo,

¹⁸⁰ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

¹⁸¹ Tomado y traducido de: "Slope Stabilization and Erosion Control..." Morgan & Rickson

mientras que la capa orgánica asociada con la cubierta vegetal tiende a retardar la infiltración. Las influencias de estos factores en la estabilidad se resumen en el cuadro siguiente:

Cuadro 9: Efectos de la vegetación en la estabilidad de taludes (Fuente: Morgan & Rickson, 1995)

| Proceso | Tipo | Efecto en la Estabilidad |
|--|-------------|--------------------------|
| 1. Las raíces aumentan la permeabilidad, aumentan la infiltración y, por lo tanto, aumentan la presión de los poros. | Hidrológico | Negativo |
| 2. La vegetación aumenta la intercepción y la evapotranspiración, y por lo tanto reduce la presión de los poros. | Hidrológico | Positivo |
| 3. La vegetación aumenta el peso o el recargo y por lo tanto aumenta la carga en el talud. | Mecánico | Negativo |
| 4. La vegetación aumenta la resistencia al viento, y por lo tanto aumenta la carga en el talud. | Mecánico | Negativo |
| 5. Las raíces refuerzan el suelo y aumentan la fuerza. | Mecánico | Positivo |

Pero, ¿qué pasa cuando se realiza una excavación o una modificación del terreno para realizar una construcción de una carretera o una represa?

Si bien los métodos de análisis de estabilidad son bien conocidos, los métodos analíticos para evaluar la contribución de las raíces son relativamente nuevos y todavía están en desarrollo. Este capítulo intentará resumir los métodos simplificados disponibles que den una ilustración de los métodos conocidos para la estabilización de taludes usando vegetación.

4.11.1 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

El análisis de estabilidad se puede usar para evaluar una condición existente o una solución propuesta para determinar si cumple con los requisitos de seguridad. Los métodos más comunes se basan en el equilibrio límite, en el que se considera que la masa del suelo está al borde de la falla, y la resistencia al corte del suelo se desarrolla completamente a lo largo de una superficie de deslizamiento potencial. La seguridad del talud se expresa generalmente como un factor de seguridad.¹⁸²

¹⁸² Tomado y traducido de: "Slope Stabilization and Erosion Control..." Morgan & Rickson

Generalmente, el deslizamiento ocurre cuando el esfuerzo cortante (τ) en el talud supera la resistencia de corte correspondiente (τ_f) y el factor de seguridad F es:

$$F = \frac{\tau_f}{\tau} \quad 1$$

Diferentes parámetros mecánicos pueden afectar la resistencia al corte del suelo y, en consecuencia, el factor de seguridad del talud, por ejemplo, la presión del agua de los poros, debido al hecho de que cuando aumenta la presión del agua de los poros, el factor de seguridad disminuye. Para analizar la estabilidad del talud, existen diferentes métodos dependiendo del método de movimiento.¹⁸³

1. Plano de traslación de deslizamiento/falla

Como se muestra en la [Figura 58](#), los planos de traslación generalmente se controlan estructuralmente por la debilidad de la superficie, como fallas, juntas, planos de capas y contactos entre la roca caja y la capa superior del suelo. Este método puede ser aplicable cuando la superficie de deslizamiento (planos de estratos, etc.) es paralela a la superficie del suelo, como se muestra en la [Figura 59](#). Barnes (2000) mostró que, si la superficie de deslizamiento está debajo del nivel freático, el factor de seguridad será:

$$F = \frac{(c' + \gamma_w z \cos^2 \beta (\gamma_w - \gamma_w)) / \gamma_w \sin \beta \cos \beta}{\gamma_w \sin \beta \cos \beta} \quad 2$$

donde β = ángulo de la superficie de deslizamiento, z = profundidad de la superficie de deslizamiento, γ = peso unitario del suelo saturado, h_w = profundidad de la capa freática, γ_w = peso unitario del agua c' = impacto efectivo de cohesión y ϕ' = ángulo efectivo de fricción interna. El aumento en c' y ϕ' puede causar un aumento en el factor de seguridad F .¹⁸⁴

¹⁸³ Tomado y traducido de: "Contribution of the root to Slope Stability", Normaniza et al.

¹⁸⁴ Tomado y traducido de: "Contribution of the root to Slope Stability", Normaniza et al.

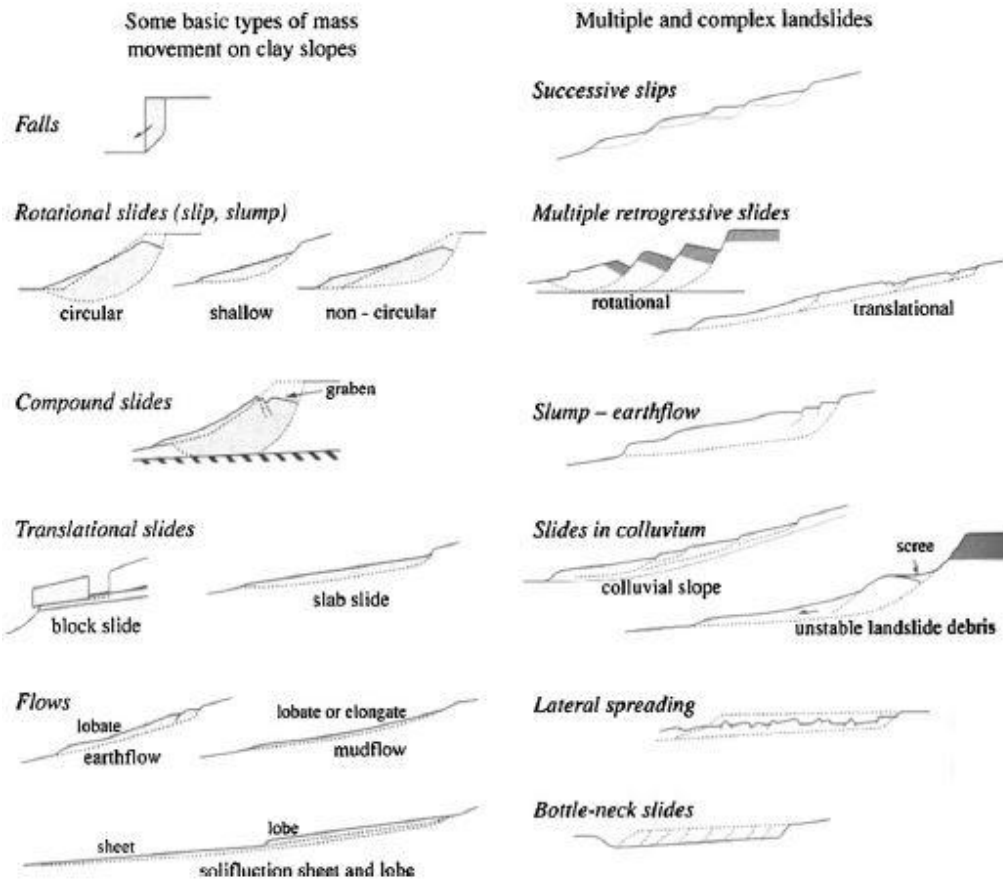


Figura 58: Tipos de movimientos de masa (Skempton & Hutchinson, 1969)

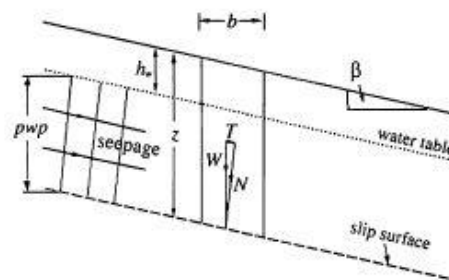


Figura 59: Plano de traslación de deslizamiento/falla (Barnes 2000)

2. Análisis de arco circular

Este método es que la superficie de la superficie está en un cierto punto, como se muestra en la [Figura 60](#). El factor de seguridad en este caso estará dado por:

$$F = \text{momento de resistencia al corte} / \text{momento de volcado}^{185}$$

¹⁸⁵ Tomado y traducido de: "Contribution of the root to Slope Stability", Normaniza et al.

Durante el momento de giro, hay un momento causado por la resistencia al corte en la superficie de deslizamiento. Barnes (2000) muestra que, en tal caso, el factor de seguridad será:

$$F = c_u R^2 \theta / Wd. \quad 3$$

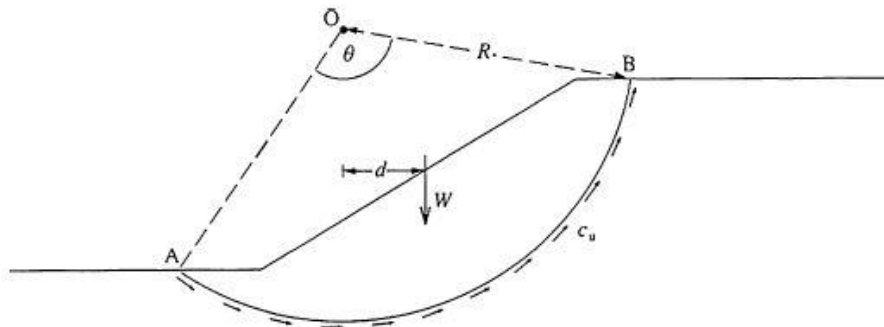


Figura 60: Análisis de arco circular (Barnes, 2000)

3. Análisis de estrés efectivo

Bishop y Morgenstern (1960) encontraron que existe una relación entre el factor de seguridad y la relación de presión de poro r_u :

$$F = m - nr_u \quad 4$$

donde m y n se denominan coeficientes de estabilidad. Este método se aplicó hasta que Barnes descubrió que había una relación entre el factor de seguridad y ϕ' (Barnes 2000):

$$F = a + btg\phi' \quad 5$$

donde a y b son los coeficientes de estabilidad del talud. El coeficiente a se refiere a (h_w/H) , y b a ambos (h_w/H) y $(\phi' / \gamma H)$, donde H es la altura del talud.¹⁸⁶

4.11.2 LA INFLUENCIA DE LA VEGETACIÓN EN LA ESTABILIDAD DEL SEGMENTO DE UN TALUD

Greenway (1987) presentó la influencia hidromecánica sobre la estabilidad de taludes como se muestra en la [Figura 61](#). Luego, Coppin y Richard (1990) formularon los efectos principales de la vegetación en la estabilidad del

¹⁸⁶ Tomado y traducido de: "Contribution of the root to Slope Stability", Normaniza et al.

segmento del talud ([Figura 61](#) y Tabla 12). Ellos dieron la siguiente fórmula para el cálculo del factor de seguridad:

$$F = \frac{((c' + c'_R) + ((\gamma Z - \gamma_w h_w) + W) \cos^2 \beta + T \sin \theta) \times \text{tg} \phi' + T \cos \theta}{((\gamma Z + W) \sin \beta + D) \cos \beta} \quad 6$$

donde γ = peso unitario del suelo (kN/m^3), Z = altura vertical del suelo sobre el plano de deslizamiento (m), β = ángulo de inclinación ($^\circ$), γ_w = peso unitario del agua (9.81 kN/m^3), h_w = altura vertical del nivel freático sobre el plano de deslizamiento (m), c_R' = mejor cohesión efectiva del suelo debido al refuerzo de la matriz de la raíz por la vegetación a lo largo de la superficie de deslizamiento (kN/m^2), c' = mejor cohesión efectiva del suelo debido a la evaporación por la vegetación a lo largo de la superficie de deslizamiento (kN/m^2), W = sobrecarga debido al peso de la vegetación (kN/m), D = fuerza de carga del viento paralela al talud (kN/m), T = fuerza de tracción de la raíz que actúa en la base del corte (kN/m).¹⁸⁷

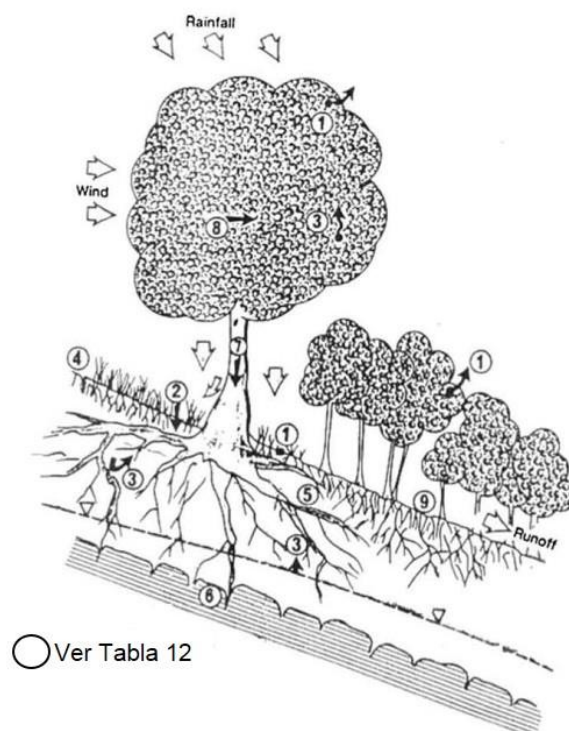


Figura 61: Influencia hidromecánica en la estabilidad de taludes (Greenway 1987)

¹⁸⁷ Tomado y traducido de: "Contribution of the root to Slope Stability", Normaniza et al.

Tabla 12: Influencia hidromecánica en la estabilidad de taludes (Greenway, 1987)

| Mecanismos Hidrológicos | Influencia |
|---|------------|
| 1. El follaje intercepta la lluvia, causando pérdidas por absorción y evaporación que reducen la lluvia disponible para la infiltración. | B |
| 2. Las raíces y los tallos aumentan la rugosidad del suelo y la permeabilidad del suelo, lo que lleva a una mayor capacidad de infiltración. | A |
| 3. Las raíces extraen humedad del suelo, que se pierde en la atmósfera a través de la transpiración, lo que lleva a una menor presión del agua de los poros. | B |
| 4. El agotamiento o la humedad del suelo pueden acentuar el agrietamiento de la desecación en el suelo, dando como resultado una mayor capacidad de infiltración. | A |
| Mecanismos Mecánicos | |
| 5. Las raíces refuerzan el suelo, aumentando la resistencia al cizallamiento del suelo. | B |
| 6. Las raíces de los árboles pueden anclarse en estratos firmes, brindando apoyo al suelo talud arriba, a través de los refuerzos y arcos. | B |
| 7. El peso de los árboles en el talud, incrementando los componentes de fuerza normal y cuesta abajo. | A/B |
| 8. La vegetación expuesta al viento transmite fuerzas dinámicas hacia el talud. | A |
| 9. Las raíces unen las partículas del suelo en la superficie del suelo, reduciendo su susceptibilidad a la erosión. | B |
| Legenda: A - Adverso a la estabilidad B – Beneficia a la estabilidad | |

4.11.3 MECANISMO DE ANCLAJE DE LA RAÍZ EN UN TALUD DE SUELO

La vegetación afecta significativamente tanto a la estabilidad superficial como a la masa de los taludes (Gray 1995). El suelo y las raíces muestran similitudes con respecto a la estructura y la reacción dúctil a la tensión. Ambos de estos elementos se deforman mucho antes de romperse. Su capacidad de retención no se pierde durante la deflexión y el hundimiento del talud relevante.¹⁸⁸

La función de resistencia al corte se define en el diagrama de tensión de Mohr como la envoltura de diferentes estados de tensión-deformación. Este método muestra que la simplificación común de la función mediante una línea recta solo es válida en caso de pequeñas extensiones de recargo. La profundidad del suelo no suele ser más profunda que 1, 5 o 2 metros. En la superficie del suelo, no hay recargo y las tensiones no son tanto como las capas más profundas. Los valores respectivos están cerca de los valores en el diagrama de tensión mencionado

¹⁸⁸ Tomado y traducido de: "Contribution of the root to Slope Stability", Normaniza et al.

anteriormente. La envoltura no es una función lineal de los parámetros de corte ϕ y c , que son parámetros utilizados para simplificar el cálculo, pero no describen de manera efectiva la calidad del material.

Tobias (1995) describió el análisis de los datos con la superposición del estado de estrés pasivo, donde se demostró que la resistencia al corte en la capa de la raíz era 9-55% más alta que la parte inferior del tipo de la planta. Usando un modelo básico para la interacción suelo-raíz, Gray y Leiser (1980) discutieron que la resistencia al corte se incrementa en el suelo reforzado por las raíces. El ángulo de las raíces es 90° con respecto a la superficie de corte, la resistencia al corte es contribuida por el refuerzo de la raíz, y S_r (equilibrio límite) requiere eso ([Figura 62a](#)):

$$S_r = (T(\cos \alpha + \sin \alpha \operatorname{tg} \phi)) / A \quad 7$$

$$S_r = (T_y + T_z * \operatorname{tg} \phi) / A \quad 7a$$

donde T = fuerza de tracción en el refuerzo de la raíz, α = inclinación de T , A = área de la sección en consideración y ϕ = ángulo de fricción interna del suelo.

Cuando se escribe en términos de estrés (σ), ecuación 7 se convierte en:

$$S_r = (\sigma_r A_r (\cos \alpha + \sin \alpha \operatorname{tg} \phi)) / A \quad 7b$$

Donde A_r = área de refuerzo.

Gray y Ohashi (1983) mostraron que para $48^\circ < \alpha < 72^\circ$, ecuación 7b es aplicable y $\cos \alpha + \sin \alpha \operatorname{tg} \phi \approx 1.2$.

La forma más sencilla es suponer que la raíz y el suelo se deformarán juntos, o que no tendrá ningún efecto en la deformación por cizallamiento, donde α está determinada por la tensión de cizallamiento en el suelo ([Figura 62b](#)). En este caso, las ecuaciones. 7, 7a y 7b seguirían siendo válidas, siempre que se utilice el valor correcto de T y σ .¹⁸⁹

¹⁸⁹ Tomado y traducido de: "Contribution of the root to Slope Stability", Normaniza et al.

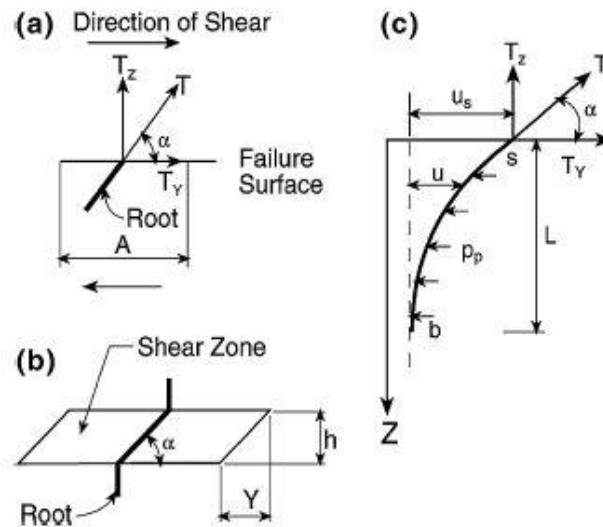


Figura 62: Modelos sencillos; a) equilibrio límite; b) refuerzo flexible; c) modelo de cable (Tobias 1995)

El experimento de Abe y Ziemer (1991) con la pared reforzada mostró que la rigidez a la flexión, el grosor de la zona de corte y el refuerzo ya no se deforman con el suelo. Para considerar la deformación y la resistencia a la flexión en el refuerzo, Oden y Ripperger (1981) utilizaron la siguiente ecuación para la unión (Figura 62c):

$$EI(d^4u/dz^4) - T_z(d^2u/dz^2) = q \quad 8$$

donde E y I = es el módulo de Young y momento de inercia del refuerzo de la raíz, q = reacción del suelo y u = desplazamiento. Esta ecuación se puede simplificar a cable flexible si $\eta L = 2.5$, donde $g = (T_z/EI)^{1/2}$ y L = longitud del lazo (porción deformada del refuerzo de la raíz) en este caso:

$$T_z(0) = T(L) \quad 8a$$

$$T_y(0) = qyL \quad 8b$$

$$u(0) = qyL^2/2T_z(0). \quad 8c$$

La cantidad de T está limitada por la tensión final. Para las raíces perpendiculares al talud, pequeñas cantidades de u , $\alpha \rightarrow 90^\circ$ o se puede usar $T_z > 0$, lo que representa un fallo inicial cuando la raíz cede.¹⁹⁰ Si la raíz es dúctil y no se fractura, u y T aumentan continuamente hasta que la solución del cable

¹⁹⁰ Tomado y traducido de: "Contribution of the root to Slope Stability", Normaniza et al.

sea aplicable. Además, la raíz leñosa profunda es más eficaz en la prevención de fallas de estabilidad de masas poco profundas. Las raíces refuerzan mecánicamente la transferencia del suelo al esfuerzo cortante en la resistencia a la tensión del suelo en las raíces. Mientras tanto, anclado e incrustado como actor o contrafuerte para contrarrestar la fuerza de corte en el talud. Además, el peso de la vegetación puede aumentar la estabilidad a través del aumento de la tensión (normal) de confinamiento en la superficie de falla '(Gray y Sotir, 1996). Por otro lado, las raíces proveen mejor conexión entre las partículas de suelo en el cuerpo (fuerza de tracción en la superficie), lo que resulta en algunas fuerzas cementación de la masa del suelo.

Sin embargo, una cubierta herbácea densa es una de las mejores protecciones contra la lluvia superficial y la erosión del viento. Las pérdidas de suelo debido a la erosión por lluvia pueden reducirse cien veces (Johansson 2000), manteniendo una cobertura herbácea densa. Esta protección tiene un papel importante en la extracción de humedad del suelo mediante la evapotranspiración y la intercepción de gotas de lluvia por el follaje. El follaje y los residuos de plantas absorben la energía y previenen el desprendimiento del suelo por las gotas de lluvia. Además, los sistemas de raíces unen o restringen físicamente las partículas del suelo mientras filtran el sedimento de la escorrentía; por lo tanto, los tallos y el follaje aumentan la rugosidad de la superficie y la velocidad lenta de la escorrentía. Las plantas y sus residuos ayudan a mantener la porosidad y permeabilidad del suelo, o retrasar la aparición o escorrentía.¹⁹¹

Gray y Sotir (1996) describieron la pérdida de suelo computada (por ejemplo, toneladas) por acre para una tormenta determinada. El intervalo de tiempo (A) se puede obtener al examinar la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE, por sus siglas en inglés):

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad 9$$

donde R = factor climático, K = valor de erosionabilidad del suelo, LS = factor topográfico, C = factor de vegetación y P = factor de práctica de control de la

¹⁹¹ Tomado y traducido de: "Contribution of the root to Slope Stability", Normaniza et al.

erosión. La ecuación USLE proporciona un método para estimar las pérdidas de suelo y la variabilidad de cada uno de los parámetros para cambiar, gestionar o limitar las pérdidas de suelo. Además, Brenner (1973) demostró que la evapotranspiración por la vegetación puede reducir las presiones del agua de los poros dentro del suelo de los taludes y promover la estabilidad.¹⁹²

4.11.4 EFECTO DE LA VEGETACIÓN EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES A TRAVÉS DEL EFECTO EN LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

Como describió Lu (2006), los análisis de equilibrio a escala de partículas se utilizan para identificar tres tipos de fuerzas entre partículas: (1) fuerzas activas transmitidas a través del grano del suelo; (2) fuerzas activas en o cerca de los contactos entre partículas; y (3) fuerzas pasivas, o contrapesadas, en o cerca de los contactos entre partículas. El segundo tipo de fuerza incluye fuerzas fisicoquímicas, fuerzas de cementación y fuerzas de tensión superficial de la presión negativa del agua de los poros; Todas estas fuerzas pueden combinarse conceptualmente en una tensión macroscópica llamada 'tensión de succión'. Terzaghi (1943) en suelo saturado mostró que:

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad 10$$

donde σ' = estrés efectivo, σ = estrés total y u_w = presión de agua de poro. Por otro lado, la ecuación de Coulomb para la resistencia al corte en suelos saturados es:

$$\tau = c' + \sigma' \operatorname{tg} \phi' \quad 11$$

donde c' = impacto efectivo de cohesión y ϕ' = ángulo efectivo de fricción interna. Con el reemplazo de σ' de la ecuación 10 a 11, tendremos:

$$\tau = c' + (\sigma - u_w) \operatorname{tg} \phi'. \quad 12$$

Por otro lado, Skempton (1960) mostró:¹⁹³

¹⁹² Tomado y traducido de: "Contribution of the root to Slope Stability", Normaniza et al.

¹⁹³ Tomado y traducido de: "Contribution of the root to Slope Stability", Normaniza et al.

$$\sigma' = \sigma - (1 - (c_s/c))u_w \quad 13$$

donde c_s = compresibilidad del grano y c = compresibilidad del esqueleto granular. Como se muestra arriba, está presente en ambas ecuaciones, lo que causa la fuerza capilar en la humedad del suelo. Esta fuerza en el comportamiento de ingeniería macroscópica del suelo se puede ver por el aumento asociado a la fuerza de cizallamiento y tracción. Bishop (1959) añadió un parámetro a la ecuación de Taraghi:

$$\sigma' = \sigma - u_a + x(u_a - u_w) \quad 14$$

donde $(\sigma - u_a)$ es simplemente la tensión normal, $(u_a - u_w)$ es succión matricial y x es el parámetro de tensión efectiva (se considera que varía entre cero y unidad). Jennings y Burland (1962) declararon que el parámetro mecánico en un suelo no saturado se ve afectado por cambios en el esfuerzo normal neto que por succión matricial. En otras palabras, el aumento en la succión matricial da como resultado un aumento en la resistencia al corte, que describimos como ϕ^b . Como el enfoque de la variable de estrés independiente de Fredlund y Morgenstern (1978) incorpora la ecuación 12 y el círculo de Mohr-Coulomb, la resistencia al corte (τ) sería:

$$\tau = c' + ((\sigma - u_a) + x(u_a - u_w))tg\phi' \quad 15$$

Fredlund y Morgenstern (1978) descubrieron que el efecto del cambio en el total no se puede cambiar del efecto del cambio en el agua de poro como se muestra a continuación: ¹⁹⁴

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)tg\phi' + (u_a - u_w)tg\phi^b \quad 16$$

donde ϕ^b indica el ángulo de aumento en la resistencia al corte relacionado con la succión matricial del suelo. Cuando la succión matricial $(u_a - u_w)$ llega a cero (en suelo saturado), la ecuación 16 se convertirá en ecuación 12. Los círculos de Mohr-Coulomb ilustraron de una manera tridimensional en el caso de suelo

¹⁹⁴ Tomado y traducido de: "Contribution of the root to Slope Stability", Normaniza et al.

insaturado en la [Figura 63](#). En este modelo, describieron la tensión de corte como la ordenada y $(\sigma - u_a)$ y $(u_a - u_w)$ como abscisas. Dado que la presión del aire de los poros se reemplaza con la presión del agua de los poros en caso de saturación, $(\sigma - u_a)$ el eje cambia para $(u_a - u_w)$. Como se muestra en el Anexo 9 y la [Figura 63](#), el valor de ϕ^b es mayormente menor o igual que ϕ' . Muestran que el esfuerzo cortante tiene una relación directa con la succión matricial como se ilustra en la [Figura 64](#).

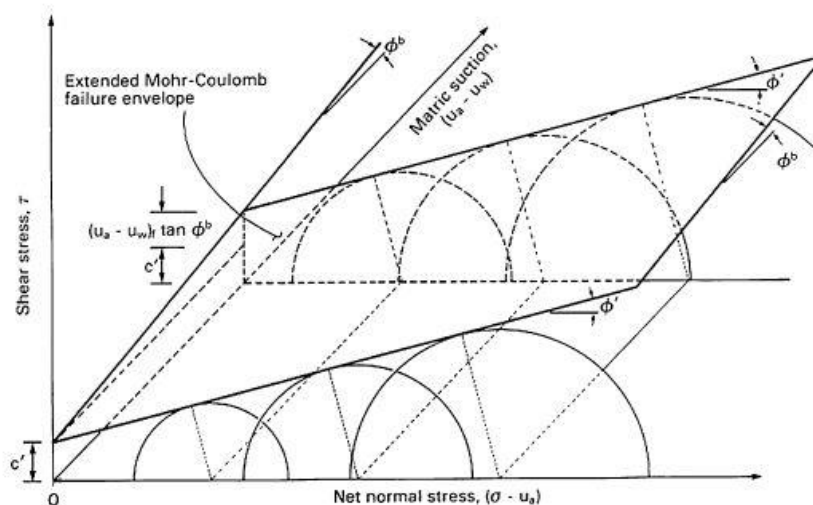


Figura 63: Envolvente de falla de Mohr-Coulomb extendido para suelos insaturados (Fredlund y Morgenstern 1978)

Como se muestra en el diagrama, la ecuación para la línea es:

$$c = c' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad 17$$

donde c = intercepción de cohesión total y $(u_a - u_w)_f$ = succión matricial en el plano de falla en la falla.¹⁹⁵

¹⁹⁵ Tomado y traducido de: "Contribution of the root to Slope Stability", Normaniza et al.

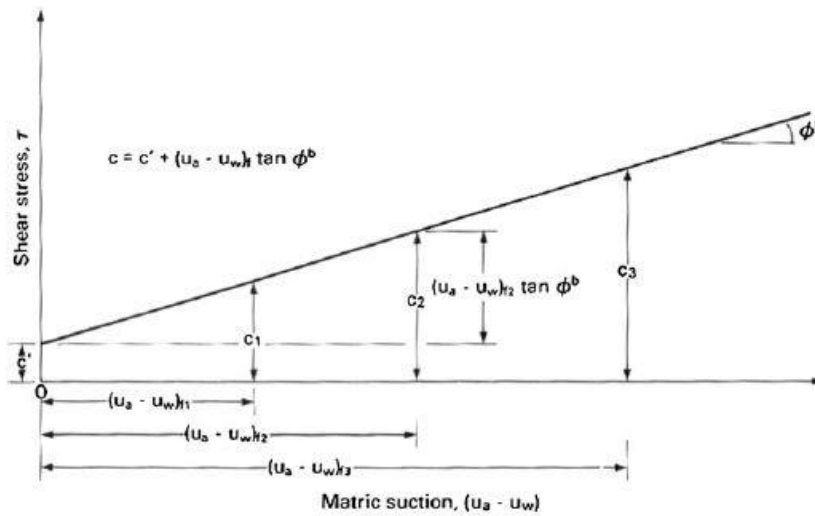


Figura 64: Línea de intercepciones a lo largo del plano de fallas en el τ versus el plano $(u_a - u_w)$ (Fredlund y Morgenstern 1978)

Cuando el suelo insaturado está saturado en paralelo al proceso de saturación, c está disminuyendo como se muestra en la [Figura 65](#). La cohesión inspecciona $C1$, $C2$ y $C3$, como la cohesión total, tienen una relación directa con la succión matricial. Con la sustitución de la ecuación 12 para la ecuación 11, la resistencia al corte (τ_{ff}) será:¹⁹⁶

$$\tau_{ff} = c + (\sigma - u_a)_f \operatorname{tg} \phi' \quad 18$$

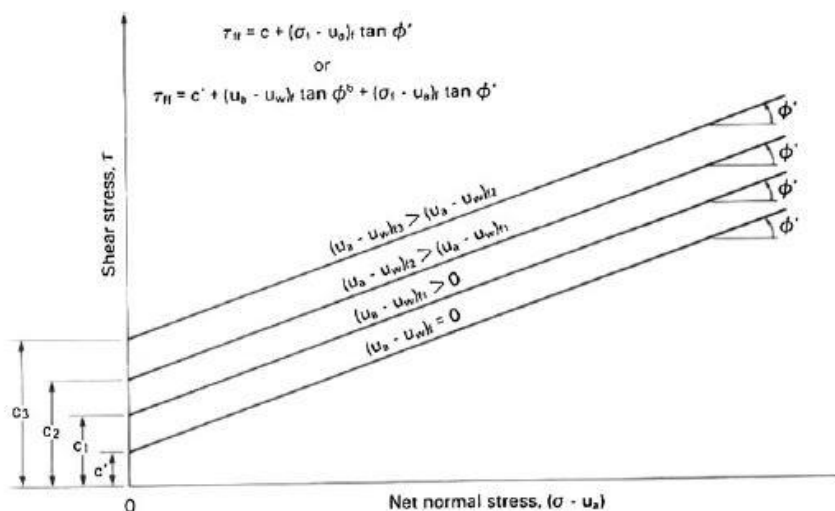


Figura 65: Proyección horizontal de las curvas de nivel de la envolvente de falla contra τ ($\sigma - u_a$) (Fredlund y Morgenstern 1978)

¹⁹⁶ Tomado y traducido de: "Contribution of the root to Slope Stability", Normaniza et al.

Faisal y otros (2006) anunciaron que "la curva característica del agua del suelo es otra relación importante para el suelo no saturado". SWCC es la relación entre el contenido de agua del suelo y la succión matricial. En esta investigación, descubrieron que el incremento en la succión matricial en los suelos insaturados produce el mismo incremento en la resistencia al corte con respecto al neto del stress normal; el aumento de la resistencia al corte con respecto a la succión matricial es menor que lo normal con respecto al estrés normal. De hecho, en esta investigación, se demostró que el estado de estrés en un suelo insaturado se puede representar mediante dos tensores de estrés independientes (ecuaciones 19, 20):

$$\begin{vmatrix} (\hat{\sigma}_x - u_a) & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & (\hat{\sigma}_y - u_a) & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{zy} & (\hat{\sigma}_z - u_a) \end{vmatrix} \quad 19$$

$$\begin{vmatrix} (u_a - u_w) & 0 & 0 \\ 0 & (u_a - u_w) & 0 \\ 0 & 0 & (u_a - u_w) \end{vmatrix} \quad 20$$

Estos investigadores encontraron que aumentar la succión matricial causa un aumento en la resistencia al corte; sin embargo, este aumento no es el resultado de un aumento en ϕ' . Por otro lado, encontraron el mismo ϕ' para diferentes succiones matriciales.

Matyas y Radhakrishna (1968) presentaron el cambio de volumen en una superficie tridimensional con respecto a los parámetros de estado $(u_a - u_w)$ y $(\sigma - u_a)$. Anderson (1991) en su modelo de estabilidad de taludes/hidrología utilizó el efecto de aumentar el nivel freático en la región tropical debido a la infiltración, pero ignoró el aumento en la resistencia del suelo a través del efecto de succión (Anderson y Lloyd 1991).¹⁹⁷

Faisal et al. (2006) con el mismo esquema anterior simuló un cambio en la condición dinámica/hidrológica debido a la lluvia y discutió la responsabilidad del cambio de presión de agua pura (negativo y positivo) en el análisis de estabilidad de taludes. Demostraron que, en las regiones tropicales, los suelos involucrados a menudo son suelos residuales y tienen capas de agua profundas. Los suelos

¹⁹⁷ Tomado y traducido de: "Contribution of the root to Slope Stability", Normaniza et al.

superficiales tienen presiones de agua de poro negativas que juegan un papel importante en la estabilidad de taludes. Debido a las fuertes lluvias durante la temporada de lluvias en esta región, el nivel freático se puede cambiar en un corto período de tiempo, lo que lleva a la inestabilidad del talud (resultado del ciclo húmedo y seco). Pero principalmente en el análisis de estabilidad de taludes, se ignoró la tensión de succión. En este estudio, se demostró que para una intensidad de lluvia dada $q_s = 1 \times 10^{-6}$ m/s, el factor de seguridad del talud tiende a disminuir con el aumento de la permeabilidad (k_s) del suelo. El factor de seguridad del talud también se reduce con el aumento de la altura del talud. Además, se discutió que, en la sección de suelo simple, el factor de seguridad tiene una relación lineal con la tasa de cambio en la resistencia al corte con respecto al esfuerzo de succión, que se muestra a continuación:

$$F = f + s \tan \phi^b \quad 21$$

donde F = el factor de seguridad, f y s = coeficientes de estabilidad y $\tan \phi^b$ = la tasa de cambio en la resistencia al corte con respecto a la succión matricial.

Faisal et al. (2006) afirmaron que la vegetación en la superficie del suelo no solo disminuye la infiltración, sino que también cambia el valor de succión. También descubrieron que el suelo sin cobertura superficial parece tener una mayor tasa de infiltración en comparación con el suelo cubierto de hierba. Parece que la presencia de hierba estimula más golpes de agua. Además, el sistema radicular también ayuda a aumentar la tasa de infiltración de agua. El monitoreo de succión en este estudio muestra que los valores de succión en estado estable para el modelo con pasto ya que su cubierta de superficie generalmente es marginalmente más baja. Esto puede deberse al efecto de las raíces que formaron un paso anormal del agua para que la misma se infiltre.¹⁹⁸

4.11.5 SISTEMAS DE BIOINGENIERÍA DE SUELOS

La vegetación para la estabilización de taludes va desde pastos hasta arbustos y árboles. Estos pueden establecerse por siembra convencional o siembra viva. Se han desarrollado métodos especializados para establecer la vegetación en

¹⁹⁸ Tomado y traducido de: "Contribution of the root to Slope Stability", Normaniza et al.

taludes, que se llaman biotecnología del suelo o sistemas de bioingeniería del suelo. Estos métodos de construcción utilizan principalmente recortes sin raíz, que se toman de plantas vivas y se instalan en el suelo por diversos medios y en diversas configuraciones. Los esquejes de las plantas se arraigan y se establecen en el talud. Gray y Leiser (1982), Schiechtl (1980), Coppin y Richards (1990) han descrito sistemas de bioingeniería de suelos y métodos de construcción. Algunos sistemas comunes se resumen en la Tabla 13 y la [Figura 66](#).¹⁹⁹

Tabla 13: Resumen de sistemas de bioingeniería (Fuente: Morgan & Rickson, 1995)

| Nombre | Construcción | Función primaria(s) |
|--|---|---|
| 1. Estacas Vivas (Live stake) | Los palos se cortan del material vegetal enraizado y se introducen directamente en el suelo. | Las plantas vivas reducen la erosión y eliminan el agua por evapotranspiración. Las raíces de las plantas refuerzan el suelo. |
| 2. Fajina viva (Live fascine (wattling)) | Las ramas de material vegetal vivo se unen y se colocan en una zanja. Están atados al suelo por estacas vivas (Figura 7.25 (a)) | Igual que 1 |
| 3. Colchón de cepillos (Brush mattress) | Las ramas vivas se colocan juntas en la superficie para formar un colchón (Figura 7.25b)) | Igual que 1. Además, proporciona protección inmediata contra la erosión. |
| 4. Capa de cepillos, embalaje de ramas (Brushlayer, branchpacking) | Las ramas vivas se colocan en zanjas o entre capas de relleno compactado (Figura 7.25 (c) y (d)) | Igual que 1 |
| 5. Geomalla de vegetación (Vegetated geogrid) | Las ramas vivas se colocan en capas entre el suelo compactado envuelto en geomalla (Figura 7.25 (e)) | La geomalla proporciona estabilidad inmediata. Las plantas cumplen las mismas funciones que en 1. |
| 6. Plantas con raíces (Rooted plants) | Se siembran plantas con raíces cultivadas en un vivero o en la naturaleza. | Igual que 1. Además, las raíces brindan apoyo. |

La mayoría de los sistemas tienen el doble propósito de reducir la erosión de la superficie y reforzar el suelo. Los phreatophytes como los sauces son efectivos para aumentar la evapotranspiración. La efectividad de un sistema como refuerzo del suelo depende de la profundidad a la que se pueden colocar los recortes y la profundidad a la que penetrarán las raíces. La tasa de crecimiento de las raíces se relaciona con el volumen del corte y algunas guías sobre la

¹⁹⁹ Tomado y traducido de: "Slope Stabilization and Erosion Control..." Morgan & Rickson

elección y la preparación de cortes han sido dadas por Gray y Ocio (1982) y Schichtl (1980).²⁰⁰

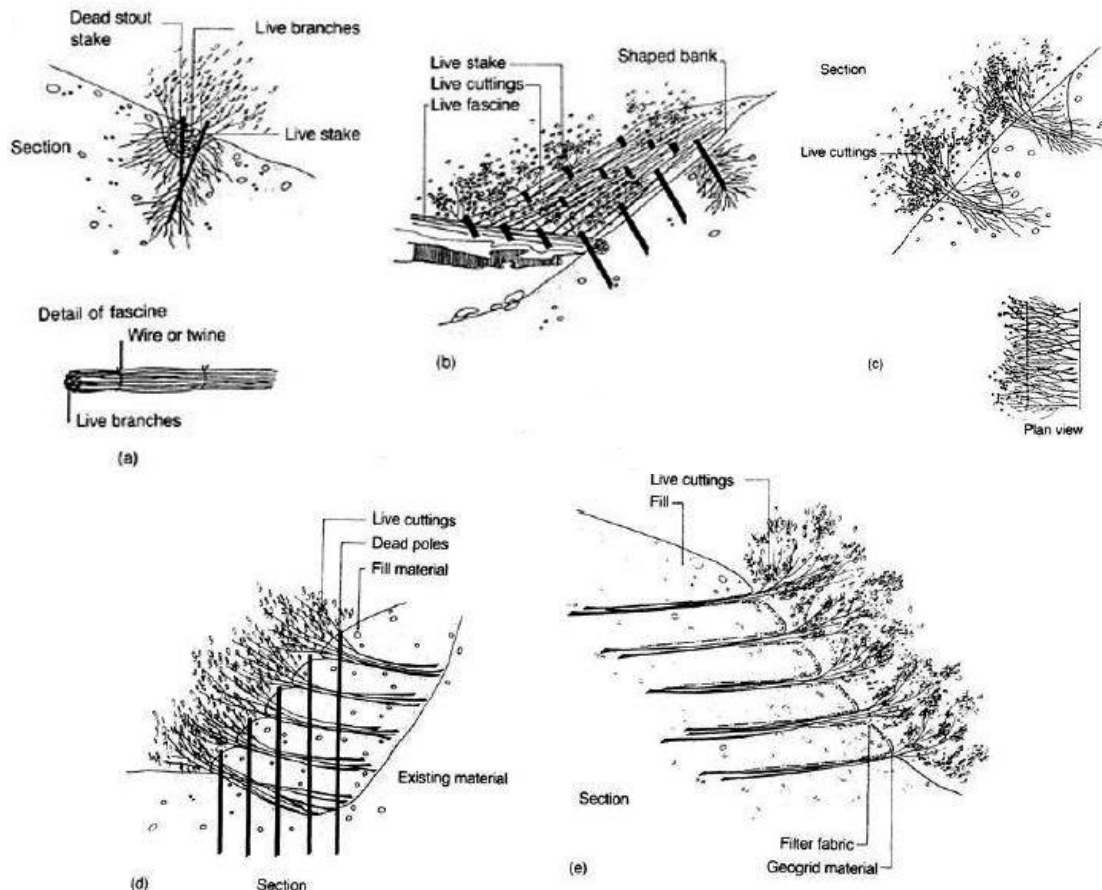


Figura 66: Sistemas de bioingeniería de suelos: (a) fajina viva; (b) colchón; (c) pinceles; (d) embalaje de ramas; (e) gavión blando vivo. Las hojas y las raíces no son representativas de la condición en el momento de la instalación (Robbin B.Sotir & Assoc.)

Las propiedades de la raíz de la vegetación pueden variar en un amplio rango, porque dependen de la especie vegetal, el perfil del suelo y el medio ambiente. Algunas plantas (Greenway- 1987) poseen un sistema de raíz “extensivo”, en el cual las raíces alcanzan profundidades o extensiones grandes, mientras otras forman un sistema “intensivo” con raíces más cortas y finas.²⁰¹ La forma de las raíces puede presentar tres esquemas diferentes así:

- a. Raíz de extensión lateral
- b. Raíz de extensión radial.
- c. Raíz pivotante.

²⁰⁰ Tomado y traducido de: “Slope Stabilization and Erosion Control...” Morgan & Rickson

²⁰¹ Tomado de: “Deslizamientos y estabilidad de taludes” ... J. Suárez.

Consiste en una raíz vertical profunda centrada con ramificaciones de raíces pequeñas. Generalmente las raíces pivotantes alcanzan profundidades mayores que las raíces laterales o radiales (Figura 67). Estas raíces son muy efectivas para la estabilización de deslizamientos poco profundos.

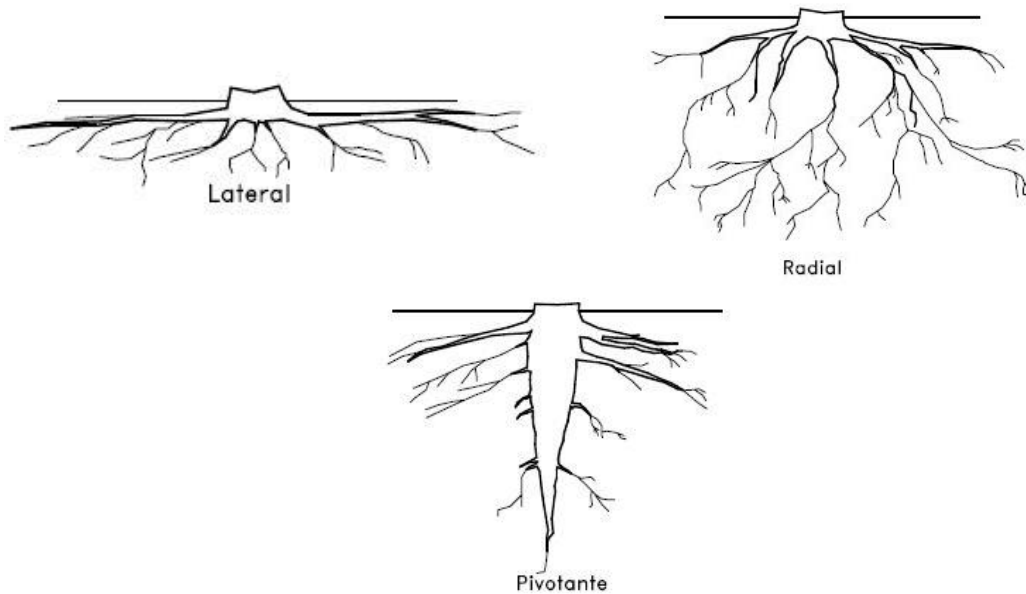


Figura 67:Tipos de raíz (Fuente: Suárez, 1998)

Leventhal y Mostyn (1987) indican que las raíces de diámetro menor a 20 milímetros son las más importantes para la estabilidad de un talud que las raíces de mayor diámetro. Otro factor que contribuye a la resistencia del sistema suelo-raíces es la densidad de raíces por volumen de suelo.²⁰²

Por lo tanto, la estabilización taludes con vegetación requiere una elección juiciosa del tipo de vegetación. Para la estabilidad, la especie debe tener un sistema de raíces que se extienda a una profundidad suficiente. En regiones húmedas, las plantas con alta transpiración reducirán la humedad del suelo y la presión de los poros. Las características de las plantas que deben considerarse en la elección de las especies se resumen en la Tabla 14. Siempre que sea factible, se prefiere la vegetación nativa y se debe considerar la sucesión de la vegetación pionera al clímax en el entorno del sitio, principalmente el clima y el tipo de suelo y humedad.²⁰³

²⁰² Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

²⁰³ Tomado y traducido de: "Slope Stabilization and Erosion Control..." Morgan & Rickson

Tabla 14: Características de los grupos de plantas (Fuente: Morgan& Rickson, 1995)

| | |
|-----------------------------------|---|
| 1. Criterio ecológico | Resistencia a la sequía, sal y temperaturas extremas. |
| 2. Características de crecimiento | Facilidad de propagación, tasa de crecimiento. Requiere consideración de material de corte, humedad, temperatura, luz, tipo de suelo y tiempo de propagación. |
| 3. Propiedades ingenieriles | Resistencia de las raíces, profundidad y diámetro de los sistemas radiculares, uso del agua. |

Las plantaciones vivas y/o los sistemas de bioingeniería de suelos pueden proporcionar una resistencia adecuada en muchos casos. También pueden usarse en combinación con estructuras de retención convencionales. En este caso sirven como medidas complementarias. El ejemplo común se ilustra en la [Figura 68](#). La estructura de retención es necesaria para proporcionar estabilidad contra una superficie de deslizamiento profundo (a en la [Figura 68](#)), mientras que la vegetación se usa para prevenir la erosión y los deslizamientos poco profundos (b en la [Figura 68](#)) en el talud sobre la estructura. Tal combinación permite el uso de una estructura de retención más pequeña.

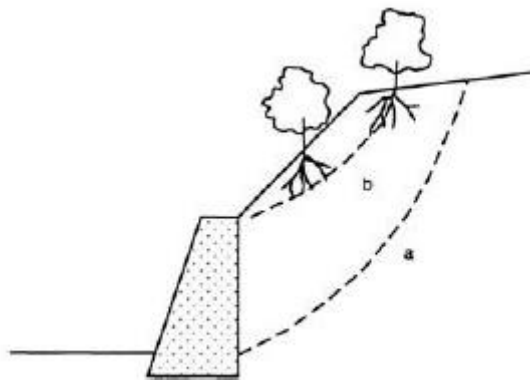


Figura 68: Combinación de un muro de contención con vegetación para la estabilización de taludes, a = superficie de deslizamiento profundo; b = superficie de deslizamiento superficial. (Fuente: Morgan & Rickson)

La vegetación también puede cultivarse en aberturas de estructuras tales como paredes y rejillas de cunas y en intersticios de rip-rap, revestimientos y gaviones para reforzar el suelo detrás de estas estructuras. Las descripciones detalladas de muchas combinaciones de estructura de vegetación se pueden encontrar en Gray y Leiser (1982).²⁰⁴

²⁰⁴ Tomado y traducido de: "Slope Stabilization and Erosion Control..." Morgan & Rickson

4.11.6 ESTABILIDAD DE TALUDES USANDO VEGETACIÓN - TÉCNICAS Y APLICACIONES

La revegetalización de un talud ayuda a controlar la erosión y ayuda a aumentar el factor de seguridad. Por esta razón cada día se utiliza más la vegetación en la estabilización de taludes. El efecto de la vegetación es una interacción compleja entre factores hidrológicos y mecánicos de difícil cuantificación.

El establecimiento de vegetación no es fácil y deben realizarse consideraciones especiales para su diseño, sin embargo, todo ingeniero debe considerar la vegetación como el sistema básico de estabilización para los taludes en suelo o roca meteorizada.

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

Pastos y plantas diseñadas con el propósito de producir refuerzo del suelo se pueden plantar junto con muros de contención o sistemas estructurales de estructura abierta, en forma de grilla, con espacios para el crecimiento de la vegetación. Por ejemplo, Gray y Sotir (1992) describen el uso de piedra conjuntamente con vegetación para la estabilización de un talud, en el cual la vegetación ayudó a retener los bloques de roca y al mismo tiempo reforzar el talud. La utilización de mantos orgánicos o mantos sintéticos junto con la vegetación conforman una protección integral contra la erosión. Generalmente, estos materiales se desintegran después de que las plantas crecen y se establecen en forma permanente.²⁰⁵

Las técnicas y aplicaciones que se presentaran a continuación representan un esquema resumido de una variedad de alternativas que actualmente existen en el mundo (no todas), y solo pretende resaltar aquella que podrían ser utilidad a la hora de realizar un diseño de estabilización de taludes, ya sea para lagunas

²⁰⁵ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

de colas, o minas en rehabilitación, zonas estériles y caminos de accesos, así como también en el tema de diques de contención, represas, etc.

4.11.6.1 TÉCNICA DE EMBALAJE CON RAMAS O BRANCH PACKING:

El empaque o embalaje de ramas se usa para reparar pequeñas depresiones y agujeros localizados en los bancos. Consiste en capas alternas de ramas vivas y relleno compactado. Las ramas atrapan los sedimentos que rellenan la depresión localizada o el agujero, mientras que las raíces se extienden por todo el relleno y hacia la tierra circundante para formar una masa unificada.²⁰⁶

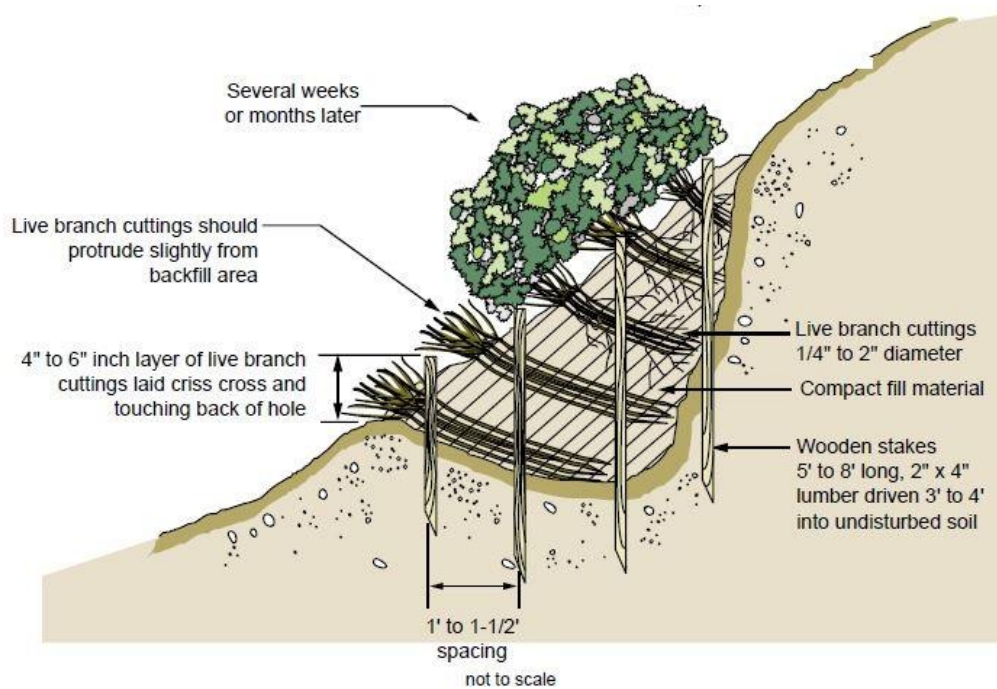


Figura 69: Empaque de ramas (Branch packing) (Fuente: USDA, 2000)

Aplicaciones y efectividad:

- Repara los asentamientos y los orificios en los bancos de flujo que varían de 2 a 4 pies de altura y profundidad y 4 pies de ancho de manera efectiva y económica.
- Retrasa la escorrentía y reduce la erosión y el desgaste de la superficie a medida que las partes superiores de las plantas comienzan a crecer.
- Establece un banco de corriente con vegetación rápidamente.
- Mejora las condiciones de colonización de la vegetación autóctona.
- Proporciona refuerzo inmediato al suelo.

²⁰⁶ Tomado y traducido de: "A soil Bioengineering Guide", USDA

- Sirve como inclusiones de tracción para el refuerzo una vez que se instalan las ramas vivas.

En el Anexo 10 se muestra un ejemplo de aplicación.

4.11.6.2 CAPAS DE CEPILLOS O BRUSH LAYERING

Es la técnica de colocar recortes en bancos horizontales que siguen el contorno de un banco existente o lleno (talud). Las ramas sirven como inclusiones de tracción o unidades de refuerzo de la tierra para proporcionar una estabilidad superficial de los taludes. Los recortes están orientados más o menos perpendiculares a la cara inclinada. La parte del cepillo que sobresale de la cara del talud ayuda a retardar la escorrentía y reducir la erosión de la superficie. Cuando se usa en un talud de relleno, esta técnica es similar a las geomallas con vegetación sin el tejido geotextil.²⁰⁷

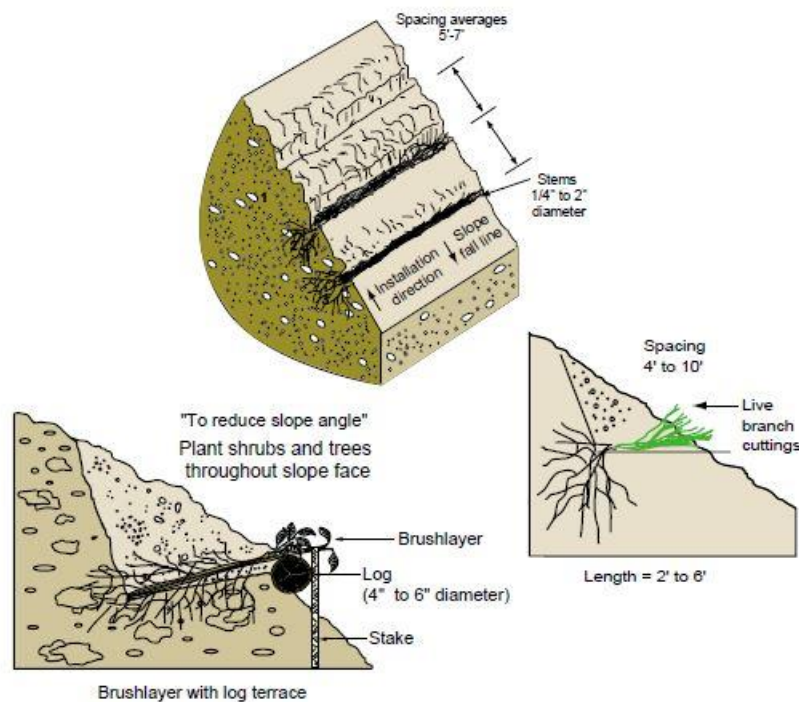


Figura 70: Capas de cepillos (Brush layering) (Fuente: USDA, 2000)

Aplicaciones y efectividad:

- Divide la longitud del talud en una serie de pendientes más cortas separadas por filas de la capa de cepillo.
- Seca los sitios excesivamente húmedos.

²⁰⁷ Tomado y traducido de: "A soil Bioengineering Guide", USDA

- Trabajos donde la base no está perturbada.
- Funciona en una depresión y como un parche.
- Refuerza el suelo con los tallos de las ramas sin raíz.
- Refuerza el suelo a medida que se desarrollan las raíces, agregando significantes.
- Resistencia al desplazamiento por deslizamiento o cizallamiento.
- Trampas de escombros en la ladera.
- Ayuda a la infiltración en sitios secos.
- Ajusta el microclima del sitio, ayudando a la germinación de la semilla y regeneración natural.
- Puede causar que el flujo lave el suelo entre capas.
- No funciona en curvas exteriores.

En el Anexo 11 se muestra un ejemplo de aplicación.

4.11.6.3 COLCHÓN DE CEPILLOS O BRUSH MATTRESS

Es una capa de ramas inactivas colocadas y aseguradas a la superficie de un banco. Ofrece cobertura bancaria inmediata. Esta técnica también es efectiva en lagos. Por lo general, se combina con una técnica de estabilización de la base, como roca, tacos de raíces, sedimentación en vivo, fajinas, troncos de fibra de coco o revestimientos de árboles. En este ejemplo, se utilizará una fajina con el colchón.²⁰⁸

²⁰⁸ Tomado y traducido de: "A soil Bioengineering Guide", USDA

BRUSH MATTRESS
(Not to scale)

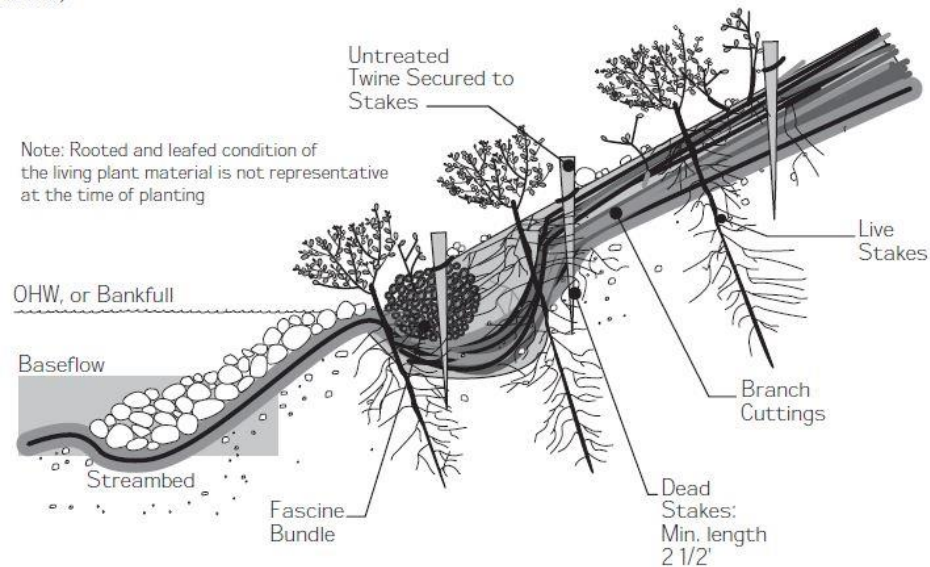


Figura 71: Colchón de cepillos (Brush Mattress) (Fuente: USDA, 2000)

Aplicaciones y efectividad:

- Requiere buen suelo para frenar el contacto. No crecerá si todas sus ramas están expuestas.
- Permite la instalación en combinación con apuestas en vivo y acciones enraizadas en el banco.
- Captura sedimentos durante condiciones de inundación.
- Mejora las condiciones de colonización de la vegetación autóctona.

En el Anexo 12 se muestra un ejemplo de aplicación.

4.11.6.4 ROLLO DE FIBRA DE COCO (COCONUT FIBER ROLL)

Un rollo de fibra de coco (Coir™ log) se utiliza para proteger la base de un banco y para definir un borde. Es una estructura cilíndrica compuesta de fibras de cáscara de coco unidas entre sí con un cordel tejido de fibra de coco. Este producto se fabrica con mayor frecuencia en diámetros de 12 pulgadas y longitudes de 20 pies. Sin embargo, la compra de rollos prefabricados puede ser costosa. Use estacas o patos de pato para anclarlo en su lugar en la punta del talud, generalmente en la marca de agua alta ordinaria o nivel de banco.²⁰⁹

²⁰⁹ Tomado y traducido de: "A soil Bioengineering Guide", USDA

COCONUT FIBER ROLL
(Not to scale)

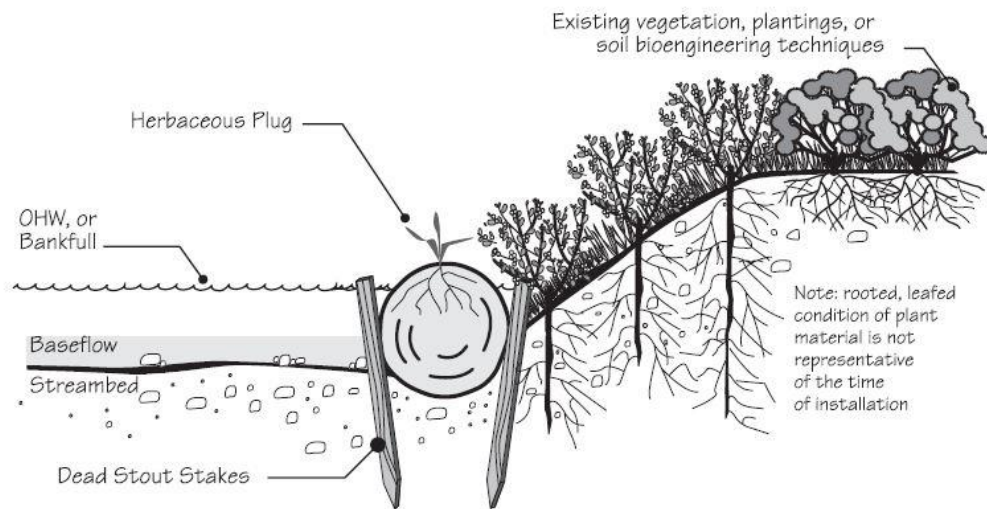


Figura 72: Rollo de fibra de coco (Coconut Fiber Roll) (Fuente: USDA, 2000)

Aplicaciones y efectividad:

- Protege los taludes de deslizamientos poco profundos o debajo de minas.
- Se ajusta a la curvatura existente.
- Atrapa los sedimentos dentro y detrás del rollo.
- Produce una base bien reforzada sin mucha alteración del sitio.
- Tiene una duración estimada de 6 a 10 años, según las afirmaciones del fabricante.

En el Anexo 13 se muestra un ejemplo de aplicación.

4.11.6.5 SIEMBRA CONJUNTA (JOINT PLANTING)

La siembra conjunta disfraza los detritos y puede proporcionar hábitat. Las raíces de las plantas ayudan a mantener el suelo bajo las rocas. Implica apisonar las estacas vivas en uniones o espacios abiertos entre las rocas existentes o cuando la roca se coloca en la cara del talud.²¹⁰

²¹⁰ Tomado y traducido de: "A soil Bioengineering Guide", USDA

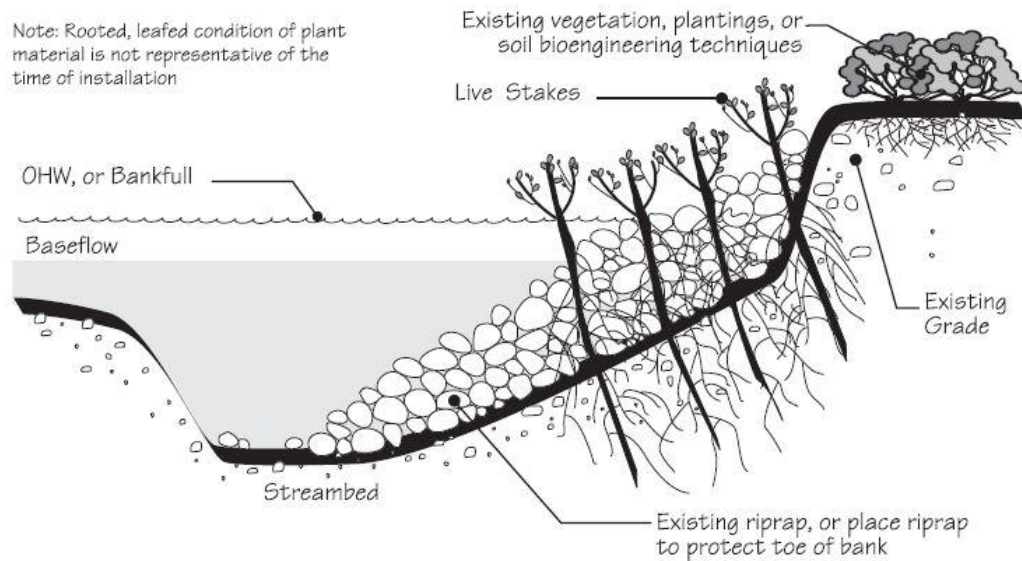


Figura 73: Siembra conjunta (Joint Planting) (Fuente: USDA, 2000)

Aplicaciones y efectividad:

- Exitoso 30 a 50% del tiempo. El primer año de riego mejora las tasas de supervivencia.
- Mejora el drenaje eliminando la humedad del suelo.
- Crea, con el tiempo, una estera de raíz viva en la base del suelo sobre la que se ha colocado la roca. Estos sistemas de raíces unen o refuerzan el suelo y evitan el lavado de finos entre y debajo de la roca.
- Proporciona protección inmediata y es eficaz para reducir la erosión en los bancos que erosionan activamente.²¹¹

En el Anexo 14 se muestra un ejemplo de aplicación.

4.11.6.6 MURO DE CUNA VIVO O LIVE CRIBWALL

Un muro de cuna vivo se utiliza para reconstruir un banco en un entorno casi vertical. Consiste en un arreglo entrelazado en forma de caja de miembros de madera o troncos sin tratar. La estructura está llena de roca en la parte inferior y el suelo a partir de la marca ordinaria de agua alta o nivel de banco. Las capas de esquejes de ramas vivas radian dentro de la estructura de la cuna y se extienden hacia el talud. Una vez que los esquejes vivos se arraigan y se

²¹¹ Tomado y traducido de: "A soil Bioengineering Guide", USDA

establecen, la vegetación asume gradualmente las funciones estructurales de los miembros de madera.²¹²

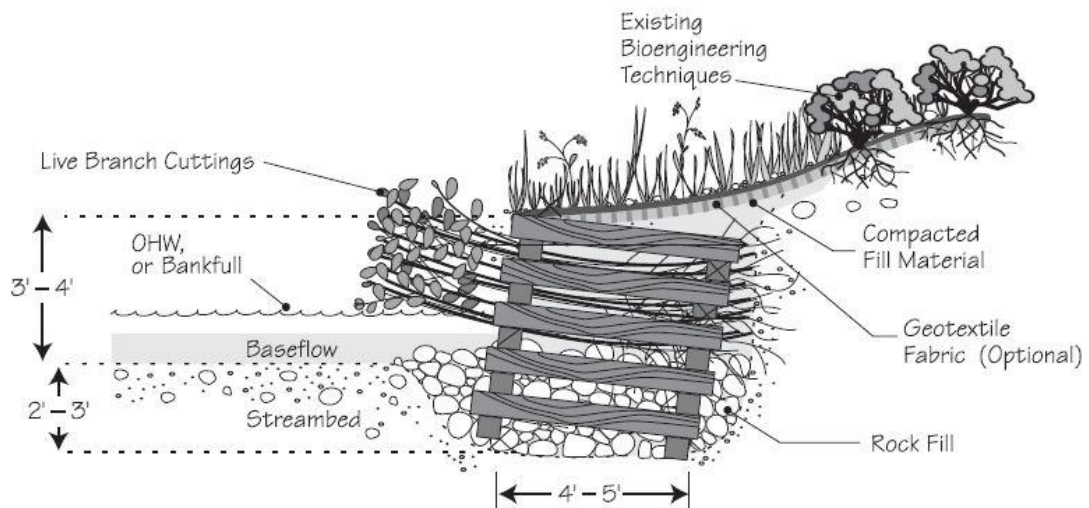


Figura 74: Muro de cuna vivo o Live Cribwall (Fuente: USDA, 2000)

Aplicaciones y efectividad:

- Apropriado en la base de un talud donde se requiera una pared baja para estabilizar la base del talud y reducir su inclinación.
- Útil donde el espacio es limitado y requiere una estructura más vertical.
- Útil para el control efectivo de la erosión del banco donde fluye el agua de las lluvias torrenciales.

En el

Anexo 15 se muestra un ejemplo de aplicación.

4.11.6.7 FAJINAS VIVAS O LIVE FASCINES

Una fajina viva ayuda a controlar la erosión de la superficie y las raíces de la fajina brotada ayudan a estabilizar el banco. Una fajina es un largo haz de cortes de ramas unidos en una estructura cilíndrica. Debe colocarse en una zanja de

²¹² Tomado y traducido de: "A soil Bioengineering Guide", USDA

contorno poco profunda en un talud seco y en ángulo sobre una pendiente húmeda para reducir la erosión y el deslizamiento superficial.²¹³

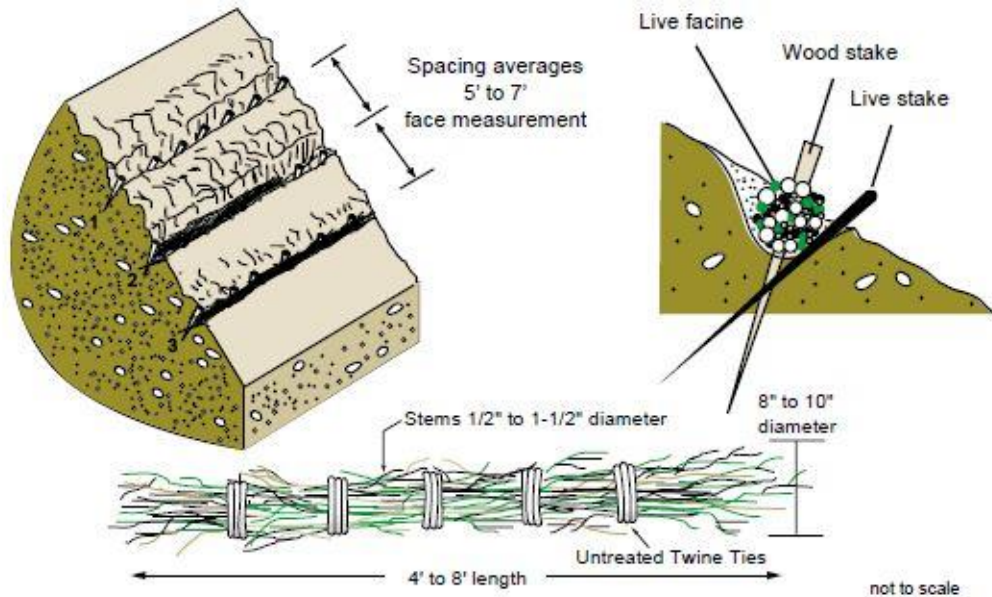


Figura 75: Fajinas vivas o Live Fascines (Fuente: USDA, 2000)

Aplicaciones y efectividad:

- El principal uso de las fajinas es el control de erosión, especialmente en zonas de cárcavas.²¹⁴
- Protege taludes de deslizamientos poco profundos (1-2 pies de profundidad).
- Requiere la humedad del suelo o la precipitación regular durante la temporada de crecimiento para crecer.
- Ofrece protección inmediata contra la erosión de la superficie.
- Mejora las condiciones para la colonización de la vegetación nativa al crear una estabilización de la superficie y un microclima propicio para el crecimiento de las plantas.
- Sirve para facilitar el drenaje cuando se instala en ángulo.²¹⁵

En el Anexo 16 se muestra un ejemplo de aplicación.

²¹³ Tomado y traducido de: "A soil Bioengineering Guide", USDA

²¹⁴ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

²¹⁵ Tomado y traducido de: "A soil Bioengineering Guide", USDA

4.11.6.8 POSTES VIVOS O LIVE POSTS

Estos forman un revestimiento permeable. Reducen las velocidades de la corriente y causan la deposición de sedimentos en el área tratada. Las raíces ayudan a estabilizar un banco. Los postes inactivos están hechos de grandes cortes instalados en bancos en patrones cuadrados o triangulares. Los postes sin raíz arraigados a distancias de aproximadamente 4 pies también pueden proporcionar algunos beneficios al desviar flujos de corrientes más altos y atrapar sedimentos. ²¹⁶

LIVE POSTS (Not to scale)

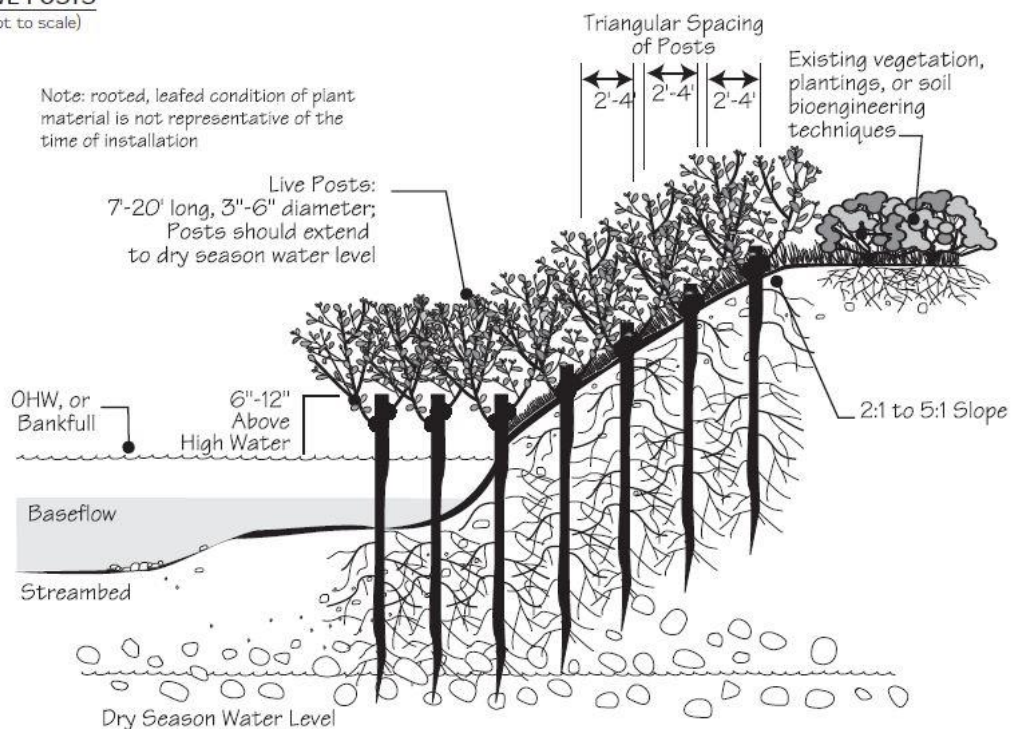


Figura 76: Postes vivos o Live Posts (Fuente: USDA, 2000)

Aplicaciones y efectividad:

- Utilizado en combinación con otras técnicas de bioingeniería de suelos.
- Se instala mediante una variedad de métodos que incluyen chorro de agua o largueros mecanizados (Hoag, et al. 2001) para formar hoyos de plantación o conduciendo los postes directamente con arietes montados en la máquina.
- Restaura rápidamente la vegetación circundante.

²¹⁶ Tomado y traducido de: "A soil Bioengineering Guide", USDA

- Mejora las condiciones para la colonización de especies nativas.
- Se repara a sí mismo.²¹⁷

4.11.6.9 ESTACAS VIVAS O LIVE STAKES

Las estacas vivas son longitudes de tallo de árboles y arbustos que se entierran en el suelo con el objeto de que broten árboles.²¹⁸ Estas crean una estera de raíz viva que estabiliza el suelo al reforzar y unir las partículas del suelo y al extraer el exceso de humedad del suelo. La mayoría de las especies de sauces se arraigan rápidamente y comienzan a secarse en un banco excesivamente húmedo poco después de la instalación. Los esquejes vivos y enraizables se insertan o se introducen en el suelo. Si se prepara, se maneja y se coloca correctamente, la estaca viva se enraizará y crecerá.²¹⁹

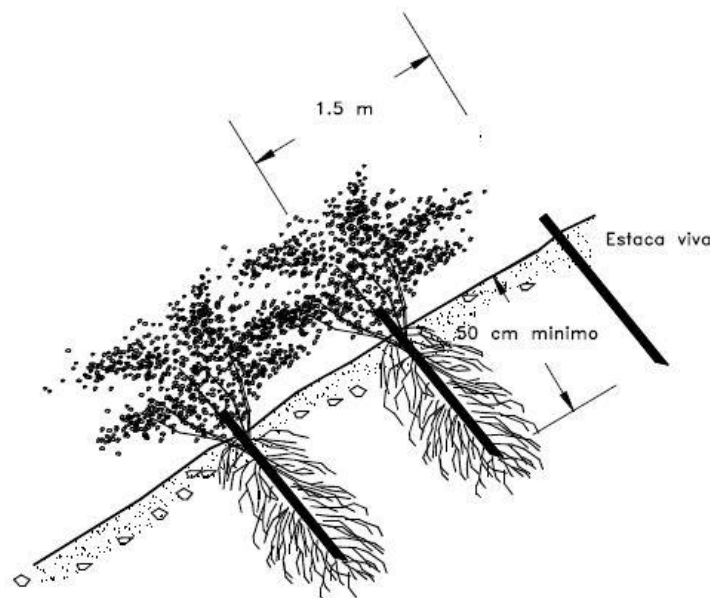


Figura 77: Estacas vivas o Live Stakes (Fuente: Suárez, 1998)

En el

²¹⁷ Tomado y traducido de: "A soil Bioengineering Guide", USDA

²¹⁸ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

²¹⁹ Tomado y traducido de: "A soil Bioengineering Guide", USDA

Anexo 17 se presenta un listado de árboles que se reproducen por estaca y que son utilizados para estabilización de taludes en Bucaramanga en los Andes colombianos.²²⁰

Aplicaciones y efectividad:

- El procedimiento es simple, rápido y económico.
- Use estacas en la zona húmeda de los bancos o donde es probable que la precipitación mantenga el suelo húmedo durante las estaciones de crecimiento.
- Proporciona una técnica en la que las condiciones del sitio no son complicadas, el tiempo de construcción es limitado y se necesita un método económico.
- Repara pequeños resbalones de tierra y desplomes que frecuentemente están mojados.
- Mejora el rendimiento de la tela de geotextil sirviendo como clavijas para mantener la tela hacia abajo.
- Mejora las condiciones para la colonización natural de la vegetación de la comunidad vegetal circundante.
- Estabiliza áreas entre otras técnicas de bioingeniería, como las fajas vivas.²²¹

En el Anexo 18 se muestra un ejemplo de la aplicación.

4.11.6.10 PAQUETE DE RAÍCES O ROOTED STOCK

El stock enraizado proporciona cobertura instantánea de hojas y mejora del hábitat. El paquete de raíz es un árbol trasplantado, arbusto leñoso o planta herbácea con un sistema radicular establecido. Puede tratarse de esquejes enraizados en forma de bola con una envoltura de arpillera, raíz desnuda, plantas en contenedores o césped o juncia recolectados cerca del sitio y trasplantados.

Aplicaciones y efectividad:

²²⁰ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

²²¹ Tomado y traducido de: "A soil Bioengineering Guide", USDA

- Ofrece protección inmediata del banco. El sistema raíz invadirá el banco en cuestión de semanas, a diferencia de los meses que toma un corte para establecer un sistema raíz significativo.
- No puede alcanzar el nivel freático durante la estación seca debido a las raíces cortas.

4.11.6.11 GEOMALLA DE VEGETACIÓN O VEGETATED GEOGRID

Las geomallas de vegetación se utilizan para reconstruir un banco. Son similares a la técnica de relleno de capas de cepillos, excepto que se envuelve una tela de control de erosión (geotextil) alrededor de cada elevación del suelo. Las ramas vivas se colocan entre las capas.²²²

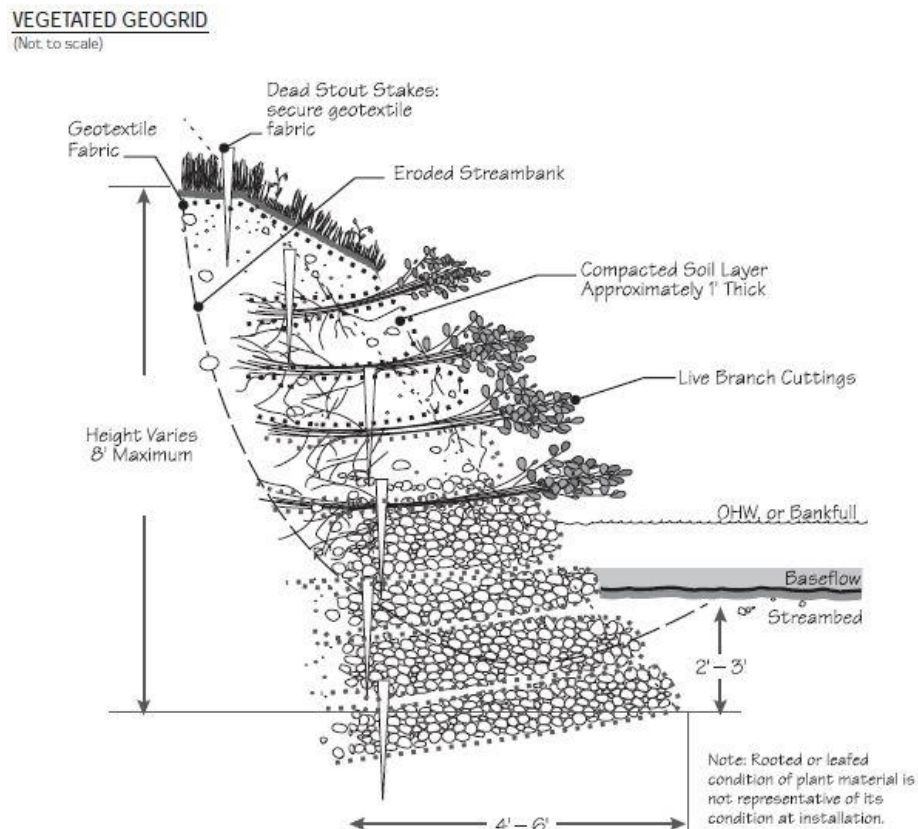


Figura 78: Geomalla de vegetación o Vegetated Geogrid (Fuente: USDA, 2000)

Aplicaciones y efectividad:

- Retrasa la erosión y estabiliza los bancos de taludes de relleno.
- Captura los sedimentos para estabilizar aún más la ribera.
- Mejora las condiciones de colonización de la vegetación autóctona.

²²² Tomado y traducido de: "A soil Bioengineering Guide", USDA

- Produce rápido crecimiento vegetativo.
- Aunque funciona de inmediato, puede ser complejo y costoso.²²³

En el

Anexo 19 se muestra un ejemplo de la aplicación.

4.11.6.12 OTRAS TÉCNICAS

Muro de gaviones con vegetación

Otra técnica, llamada muros de gaviones blandos con vegetación. Los gaviones blandos están hechos de yute o bolsas de fibra sintética, originalmente utilizadas para fertilizantes o azúcar, que se rellenan con tierra o áridos y se colocan para crear un muro de retención suave. Esta técnica se puede utilizar cuando las piedras no están disponibles para la construcción de gaviones.²²⁴



Figura 79: Muros de gaviones blandos con vegetación (Fuente: NCHRP, 2012)

Muros de roca con vegetación

Una pared de roca con vegetación es una combinación de la roca y los recortes de ramas vivas que se utilizan para estabilizar y proteger la punta de los taludes pronunciados (USDA 1992). Las paredes de roca con vegetación se diferencian de las estructuras de retención convencionales en que están colocadas contra tierra relativamente sin disturbios y no están diseñadas para resistir grandes presiones laterales.²²⁵

²²³ Tomado y traducido de: "A soil Bioengineering Guide", USDA

²²⁴ Tomado y traducido de: "Cost-Effective and Sustainable Road Slope Stabilization..." NCHRP.

²²⁵ Tomado y traducido de: "Cost-Effective and Sustainable Road Slope Stabilization..." NCHRP.

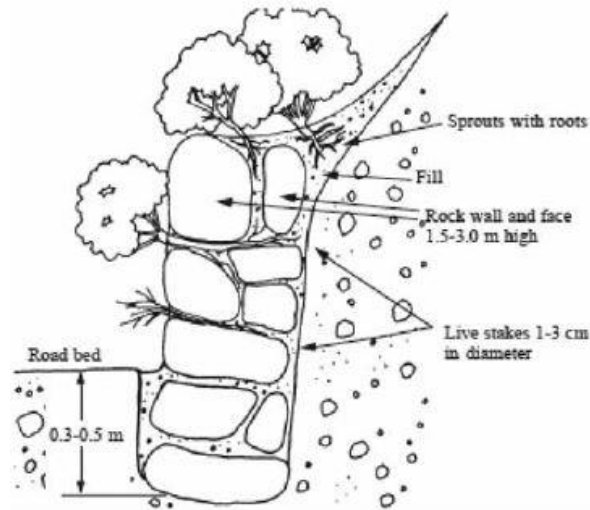


Figura 80: Muros de roca con vegetación (Fuente: Keller & Sherar 2003)

Los muros de roca con vegetación son apropiados cuando se necesita una pared baja para estabilizar la punta del talud y reducir su inclinación. Las paredes de roca con vegetación son útiles cuando el espacio es limitado y hay roca natural disponible.²²⁶

Mantillo y abono (mulch and compost)

El mantillo se usa como una medida temporal para ayudar con el establecimiento y el crecimiento de la vegetación, pero el mantillo solo no protegerá un talud de erosión ni establecerá una cubierta vegetal (Howell, 1999). El mantillo puede ser orgánico (por ejemplo, compost, recortes de césped, paja, corteza, hojarasca) o inorgánico (por ejemplo, piedra) (Sotir y Gray 2011). El mantillo se puede aplicar de varias maneras, incluso extendiéndolo por toda la pendiente, sobre semillas sembradas o alrededor de plantas individuales (Howell 1999). El mantillo ayuda a mantener el suelo fresco y húmedo y mejora el crecimiento y el establecimiento temprano de plantas de arbustos y árboles (Howell 1999). Una buena opción para blindar semillas de pasto sembrado es acolchar todo el sitio con material vegetal cortado o pincel eliminado del sitio (Howell 1999).

El mantillo es adecuado para cualquier sitio con pendientes de hasta 45° y con materiales de buen drenaje (Howell 1999). Para pendientes de más de 45°,

²²⁶ Tomado y traducido de: "Cost-Effective and Sustainable Road Slope Stabilization..." NCHRP.

pueden ser necesarias redes de control de erosión o mantas para mantener el mantillo en su lugar.²²⁷

El compost es materia orgánica descompuesta o envejecida. Puede usarse como cobertura o agregarse al suelo como una enmienda, y puede usarse para crear una berma o dique para controlar la erosión (EPA 2008). Las bermas de compost se pueden colocar perpendiculares al flujo de las aguas y generalmente tienen una sección transversal trapezoidal. Las bermas de filtro de compost generalmente se colocan a lo largo del perímetro de un sitio o a intervalos en un talud, lo que reduce la velocidad del flujo de agua y retiene los sedimentos y contaminantes. Se pueden usar en lugar de cercas de limo y no es necesario eliminarlas del sitio una vez que se complete el trabajo. El compost también se puede usar para rellenar vatios o rollos de fibra, controlar presas o ser vegetado. En el [Anexo 20](#) se muestra un ejemplo de la aplicación.

Siembra de semillas a mano

La siembra manual se realiza lanzando semilla a mano directamente en un sitio. El uso de semillas de gramíneas permite una fácil cobertura vegetativa de grandes áreas (Howell 1999). La siembra de pasto se usa a menudo junto con el mantillo y la malla para ayudar al establecimiento del pasto. Inicialmente, las armaduras de la hierba contra la erosión, y más tarde, a medida que se desarrollan las raíces, también actúan para reforzar el suelo poco profundo (Howell 1999). Las semillas de hierba deben sembrarse en suelos que drenan bien.²²⁸

En el

Anexo 21 se muestra un ejemplo de esta aplicación.

²²⁷ Tomado y traducido de: "Cost-Effective and Sustainable Road Slope Stabilization..." NCHRP.

²²⁸ Tomado y traducido de: "Cost-Effective and Sustainable Road Slope Stabilization..." NCHRP.

4.12 LIMITACIONES DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN VEGETAL Y COSTOS

4.12.1 LIMITACIONES

El establecimiento exitoso de vegetación en un talud está determinado por muchos factores tales como: época de siembra, pendiente del talud, localización, y composición de los materiales del talud. Las épocas ideales de plantación son las semanas anteriores a la temporada de lluvias, sin embargo, se puede realizar el plante en épocas secas disponiendo de un programa adecuado de riego.

La pendiente de los taludes tiene un efecto importante en el esfuerzo requerido para establecer la cobertura vegetal. Para taludes de pendiente alta se requiere colocar elementos de anclaje para los pastos y bermas para los árboles. En taludes de pendiente fuerte se aconseja no sembrar árboles, sino arbustos para disminuir las fuerzas del viento sobre ellos. Si los materiales son muy duros se puede requerir la excavación de cajas profundas para la siembra de cada arbusto y deben utilizarse cantidades importantes de suelo orgánico o fertilizantes.

Con referencia a la localización del talud, los taludes que reciben la exposición directa del sol de la tarde presentan mayores dificultades para la vegetación, que los que reciben el sol de la mañana o poseen condiciones de sombra relativa.²²⁹ Deben analizarse, además, los factores relacionados con la presencia de actividades como, por ejemplo, el movimiento de vehículos, el pisoteo, las voladuras etc. Obviamente estos sistemas no pueden ser aplicados en taludes sujetos a explotación.

4.12.2 COSTOS

El costo de implementar un programa para controlar la erosión o la inestabilidad de taludes usando vegetación depende de la condición del terreno en el momento de la intervención. Mientras la cobertura vegetal se mantenga por encima del 50–60%, los costos de restaurar la tierra a su condición original son relativamente pequeños. Aumentan a medida que la cobertura de vegetación se deteriora y la tasa de erosión aumenta dramáticamente hasta que, cuando la

²²⁹ Tomado de: "Deslizamientos y estabilidad de taludes" ... J. Suárez.

cobertura cae por debajo del 5-10% y se ha eliminado casi todo el suelo, los costos se vuelven extremadamente altos. Este patrón de costos tiene una validez general y demuestra la importancia de reconocer el papel de ingeniería de la vegetación y planificar un programa adecuado de control de la erosión y estabilización de taludes antes de que se lleve a cabo la remoción de la vegetación.²³⁰

Este enfoque es factible cuando la tierra se está registrando o despejando para el desarrollo agrícola, pero es menos fácil de adoptar donde la cubierta de vegetación y el suelo deben eliminarse completamente, por ejemplo, en la construcción de carreteras o en la minería a cielo abierto.

Incluso si se ha producido la eliminación completa de la cubierta vegetal, el control de la erosión y la inestabilidad de taludes puede ser más económico con la vegetación que con las soluciones de ingeniería convencionales. Coppin y Richards (1990) comparan los perfiles de gasto probables para trabajos de bioingeniería y estructuras inertes ([Figura 81](#)). Los costos iniciales son más altos con las estructuras, pero estos pueden ser compensados por menores costos de mantenimiento y monitoreo.²³¹

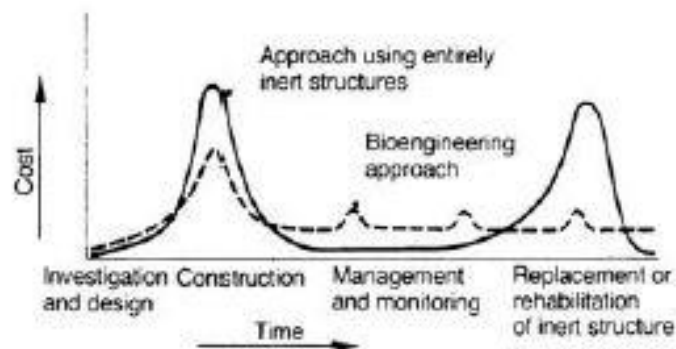


Figura 81: Perfiles de costos para el uso de bioingeniería y estructuras inertes para la estabilización de taludes (después de Coppin y Richards, 1990).

Las ventajas reales de la vegetación, sin embargo, están en el largo plazo. Mientras que las estructuras inertes tienen una vida de diseño y tienen que ser reemplazadas, la vegetación es efectiva por un período indefinido y, sujeto a las restricciones, solo requiere reparaciones y reacondicionamientos ocasionales de

²³⁰ Tomado y traducido de: "Slope stabilization and erosion control"... Morgan & Rickson.

²³¹ Tomado de: "Slope stabilization and erosion control"... Morgan & Rickson.

bajo costo. A corto plazo, puede ser necesario usar vegetación simulada, como coberturas y geotextiles para proteger un área hasta que la vegetación propuesta se haya establecido. Aunque esto aumentará el costo, el aumento puede no ser adicional debido a que con frecuencia se requiere una protección similar en espera de la construcción de estructuras inertes, particularmente si, por alguna razón, un proyecto se retrasa.²³²

²³² Tomado de: "Slope stabilization and erosion control"... Morgan & Rickson.

CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Este proyecto de tesina presentó información sobre técnicas de estabilización de taludes viales rentables y sostenibles, con un enfoque en la estabilización de taludes para áreas que no estén en fase de explotación activa, para diques de contención y lagunas de colas, etc., con el uso de los sistemas de bioingeniería. Para documentar el estado de la práctica, se realizó una revisión exhaustiva de la literatura, seguida traducciones y compresión de las técnicas y conceptos expuestos.

Se revisó el papel del tipo de suelo típico de zonas tropicales y la mecánica del suelo en la estabilidad de taludes, incluida la importancia de comprender qué tipos de suelo están presentes, cómo se comportarán bajo estrés o saturados de agua y el mecanismo por el cual podrían fallar. Comprender estos conceptos ayudará a seleccionar las técnicas de estabilización de taludes y la vegetación apropiadas para estabilizar dichas pendientes.

La bioingeniería de suelos y la estabilización biotecnológica de taludes que usa la vegetación y elementos estructurales para estabilizar y puede ser rentable y sostenible a pesar de ser conceptos relativamente nuevos y que generalmente no están cubiertos formalmente como parte de los cursos de licenciatura en las ingenierías.

En bioingeniería, las experiencias se combinan con la del ingeniero civil, el ingeniero geotécnico y el geólogo, y se basa en las habilidades botánicas, biológicas y ecológicas necesarias. La bioingeniería por lo tanto atraviesa varias disciplinas. Su futuro depende de reunirlos como base para mejorar nuestra comprensión teórica de las funciones de ingeniería de la vegetación y para analizar la experiencia práctica anterior y presente. De estos desarrollos debe surgir una mejor cuantificación de los diversos efectos de la vegetación y las incertidumbres involucradas, junto con un conjunto de procedimientos de diseño numérico.

5.2 RECOMENDACIONES

- Realizar a futuro un registro completo del tiempo de establecimiento de la raíz, la distribución espacial y la contribución a la estabilidad de los taludes para diferentes climas y composiciones del suelo.
- Identificación de la base de conocimientos actual del comportamiento de la raíz de la vegetación, que puede ampliarse con estudios de laboratorio y de campo.
- Comprensión de cómo se desarrollan los suelos en sitios con menos lluvias, por ejemplo, climas subtropicales, áridos y con heladas (permafrost).
- Práctica más generalizada de análisis adecuados de suelos en las etapas de planificación de proyectos.
- Mandatos para la inclusión del control de erosión y estabilización de taludes en todos los proyectos.
- Implementación de sistemas de alerta in situ para prevenir pérdidas humanas y económicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFÍA

- Adrian Harvey (2012). *Introducing Geomorphology – A Guide to Landforms and Processes*. Dunedin Academic Press Ltd. Edinburgh.
- Artemio Cuenca Payá (2001). *Laboratorio de Carreteras. Comentarios sobre el cálculo de taludes*. Alicante. España.
- Atlas Copco. (2007). *Mining Methods in Underground Mining*. Atlas Copco 2nd edition. Suecia
- Carlos Enrique Escobar P., Gonzalo Duque-Escobar (2017). *Geotecnia para el trópico andino*. Manizales, Colombia.
- Cruden, D.M., Varnes, D.J., (1996). *Landslide Types and Processes, Special Report*. Transportation Research Board, National Academy of Sciences. Washington. USA.
- Edumine Course: *Guidelines for Open Pit Slope Design 1 - Fundamentals and Data Collection*.
- Elliott Menache (2011). *Bio-Structural” Erosion Control. Incorporating Vegetation in Engineering Desings to Protect Puget Sound Shorelines*. Puget Sound Research 2001. USA.
- Danae Voormeij (2016). *Gold Exploration in Tropical Landscapes - Edumine Course*.
- Donald H. Gray, Robin B. Sotir (1995). *Biotechnical Stabilization of Steepened Slopes*. Prepared for: Transportation Research Board. Washington D.C., USA.
- *First International Conference on Eco-Engineering (2004). Eco - and Ground Bioengineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability*. Springer. Netherlands.
- Guillermo Rodríguez Cayllahua (2017). *Material de apoyo y presentaciones del diplomado de Geomecánica Subterránea y Superficial*, Centro Geotécnico Internacional (CGI). Perú.
- Ivan Fernando Otálvaro. *Presentación: Clasificación de deslizamientos*. Universidad Nacional. Colombia.

- Jaime Suarez Díaz (2001). Control de Erosión en Zonas Tropicales. Universidad Industrial de Santander. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos - Ingeniería de Suelos Ltda., Publicaciones UIS. Colombia.
- Jaime Suarez Díaz (1998). Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Ingeniería de Suelos Ltda. Publicaciones UIS. Colombia.
- Jan Novotný. (2013). Varnes Landslide Classification (1978), presentation. Charles University in Prague, Faculty of Science. República Checa.
- John Burland, Tim Chapman, Hilary Skinner and Michael Brown. (2011). ICE Manual of Geotechnical Engineering. Institution of Civil Engineers. Escocia.
- John Read and Peter Stacey (2009). Guidelines for Open Pit Slope Design. Csiro Publishing. Australia.
- José Daniel Ale Véliz. Métodos de Estabilización de Taludes Mediante Estructuras de Suelo Reforzado. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil.
- Lisa Lewis. (2000). Soil Bioengineering: An Alternative for roadside Management, A Practical Guide. U.S. Department of Agriculture Forest Service. California. USA.
- Morgan R.P.C and Rickson R.J. (Edition by). (1995). Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach. Chapman and Hall. UK.
- Mulyono, Subardja, Ekasari, Lailati, Sudirja, and Ningrum (2017). The Hydromechanics of Vegetation for Slope Stabilization. Global Colloquium on GeoSciences and Engineering 2017. IOP Publishing Ltd. Indonesia.
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) (2012). Cost-Effective and Sustainable Road Slope Stabilization and Erosion Control. Montana State University. USA.
- Normaniza Osman, Abdolhossein Khalilnejad, Faisal Hj.Ali (2011). Contribution of the Root to Slope Stability. Springer Science + Business Media B.V. Research Gate.

- Pedro Ramirez Oyanguren, Leandro Alejandro Monge. (2004). Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes. Universidad Politécnica de Madrid. España.
- Seyed Reza Azimi (2016). Soil Slope Stability Techniques: A Comprehensive Analysis. Thesis for Curtin University. Australia.
- Sim, Ong & Bachat (2016). Geomorphological Approach for Assessment of Slope Stability and Landslide Hazard Mapping. 19th Southeast Asian Geotechnical Conference & 2nd AGSSEA Conference (19SEAGC & 2AGSSEA) Young Geotechnical Engineers Conference. Kuala Lumpur.
- Universidad de Caldas (Grupo interdisciplinario de Geotecnia). Análisis retrospectivo del deslizamiento Barrio La Sultana. Colombia.
- Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Estabilidad de Taludes. Trabajo escalonado de Geología Aplicada. Perú.
- U.S. Department of Agriculture Forest Service. A soil Bioengineering Guide for Streambank and Lakeshore Stabilization. USA.
- Varnes, D.J. (1978) Slope Movement Types and Processes. In: Schuster, R.L. and Krizek, R.J., Eds., Landslides, Analysis and Control, Transportation Research Board, Special Report No. 176, National Academy of Sciences. Washington. USA.
- Victor Yeung (2008). Application of Soil nailing for Slope Stability Purpose. University of Technology, Faculty of Engineering and Information Technology. Sydney, Australia.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Las siguientes definiciones, se refieren sobre todo a los conceptos utilizados en esta investigación y generalmente no corresponden a las definiciones “universales” de dichos términos, ya que se basan esencialmente en las abreviaciones propuestas por los autores citados.

A

Aluvial: Suelo depositado por agua corriente.

B

Banco: Es el módulo o escalón comprendido entre dos niveles que constituyen la rebanada que se explota, de estéril o mineral, y que es objeto de excavación desde un punto del espacio hasta una posición final preestablecida.

Bermas: Son aquellas plataformas horizontales existentes en los límites de la explotación sobre los taludes finales, que contribuyen a mejorar la estabilidad de un talud y las condiciones de seguridad.

C

Coluvial: material que cubre el fondo de un valle arrastrado por las vertientes.

D

Deslizamiento: El movimiento ocurre cuando el esfuerzo de corte excede (shear stress) la resistencia

(shear strength) del material. La ocurrencia de los movimientos en masa es la consecuencia de un campo de esfuerzos complejos.²³³

E

Escombros (debris): contiene una proporción significativa de material grueso; 20% a 80% de partículas que son grandes hasta 2mm, y el resto son menores de 2mm.²³⁴

L

Ladera: similar a un talud, generada en procesos geomorfológicos naturales.²³²

Laterita: El suelo residual rojo se desarrolló en regiones húmedas, tropicales y subtropicales de buen drenaje. Está lixiviado de sílice y contiene concentraciones particularmente de óxidos e hidróxidos de hierro e hidróxidos de aluminio. Puede ser un mineral de hierro, aluminio, manganeso o níquel. (Fuente: Edumine)

²³³ Ivan Otálvaro

²³⁴ Varnes 1978

Lodo: describe material en el que el 80% o más de las partículas son más pequeñas que 0.06 mm, el límite superior de las partículas de tamaño limo.

N

Nivel Freático: es el lugar geométrico de los puntos donde la presión del agua es igual a la presión atmosférica. En otras palabras, el nivel freático está definido por los niveles alcanzados por el agua subterránea en pozos de observación (nivel piezométrico).

NI-43-101: o “National Instrument 43-101”, es un esquema canadiense de clasificación de recursos minerales que se utiliza para divulgar información sobre propiedades minerales. Las compañías extranjeras y nacionales que cotizan en las bolsas de valores supervisadas por la Administración de Valores de Canadá (CSA, por sus siglas en inglés) deben cumplir con las reglas y pautas de la norma NI 43-101 para mostrar información relacionada con las propiedades minerales.²³⁵

²³⁵ <https://www.thebalance.com>

²³⁶ [Edumine.com](https://www.edumine.com)

²³⁷ Varnes 1978

P

Podzolización: El proceso por el cual un suelo se vuelve más ácido debido al agotamiento de las bases, y desarrolla capas superficiales que son lixiviadas de arcilla y desarrollan horizontes B iluviales.²³⁶

R

Regolita: La capa o manto de material rocoso incoherente suelto, de cualquier origen, que en casi todas partes subyace en la superficie de la tierra y descansa sobre el lecho de roca. Comprende residuos de roca de todo tipo: ceniza volcánica, deriva glacial, aluvión, depósitos de viento, acumulaciones orgánicas y suelos.²³⁵

Roca: es "una masa dura o firme" que estaba intacta y en su lugar natural antes del inicio del movimiento.²³⁷

S

Sesquióxidos: un óxido en el que el oxígeno está presente en la proporción de tres átomos a dos de otro elemento. Por ejemplo, óxido de aluminio (Al_2O_3).

Suelo: es “un agregado de partículas sólidas”, generalmente de minerales y rocas, que se transportaron o se formaron por el desgaste de la roca en su lugar. Los gases o líquidos que llenan los poros del suelo forman parte del suelo.²³⁸

T

Talud: masa de materiales de la corteza terrestre que posee una inclinación definida y cambios de altura considerables, conformada de manera artificial.²³⁹

Tierra: describe el material en el que el 80% o más de las partículas son más pequeñas que 2 mm, el límite superior de las partículas es del tamaño de la arena.²³⁷

V


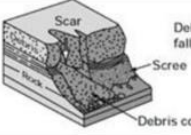
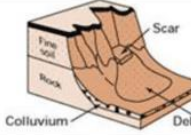
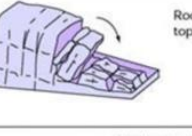
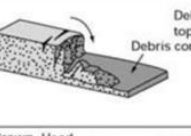
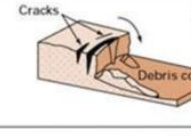
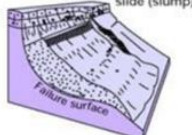
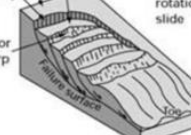
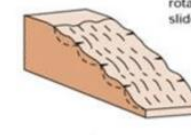
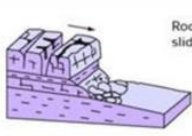

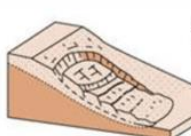
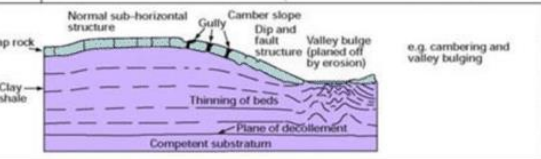

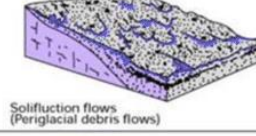
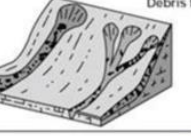

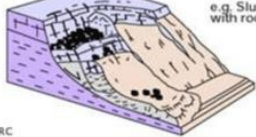
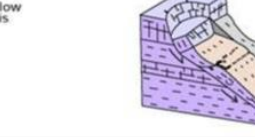
Vegetación: Conjunto de plantas propias de una zona o un lugar o existentes en un terreno determinado.

²³⁸ Varnes 1978

²³⁹ Ivan Otálvaro

ANEXOS

Anexo 1: Landslide classification by Varnes (1978) and Cruden and Varnes (1996) based on the type of movement and material. (Fuente: Research Gate).

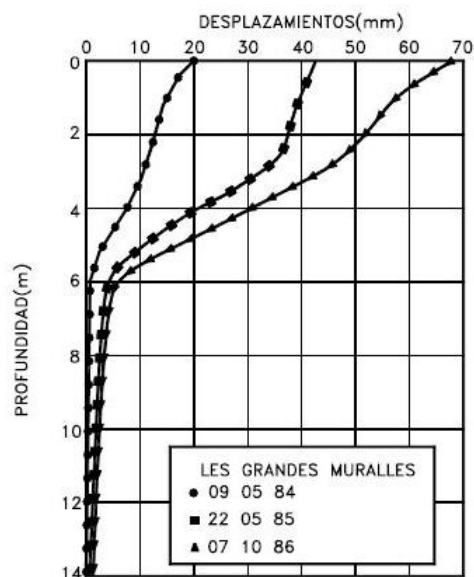
| Material | | ROCK | DEBRIS | EARTH |
|---------------|---|--|---|---|
| Movement type | | | | |
| FALLS | |  <p>Rock fall</p> |  <p>Debris fall Scree Debris cone</p> |  <p>Earth fall Colluvium Debris cone</p> |
| | |  <p>Rock topple</p> |  <p>Debris topple Debris cone</p> |  <p>Earth topple Debris cone</p> |
| SLIDES | Rotational |  <p>Single rotational slide (slump) Failure surface</p> |  <p>Multiple rotational slide Crown Scarp Head Scarp Minor Scarp Failure surface</p> |  <p>Successive rotational slides</p> |
| | Translational (Planar) |  <p>Rock slide</p> |  <p>Debris slide</p> |  <p>Earth slide</p> |
| SPREADS |  <p>Cap rock Normal sub-horizontal structure Clay shale Thinning of beds Plane of decollement Competent substratum Gully Camber slope Dip and fault structure Valley bulge (planed off by erosion) e.g. cambering and valley bulging</p> | | |  <p>Earth spread</p> |
| FLOWS |  <p>Solifluction flows (Periglacial debris flows)</p> | |  <p>Debris flow</p> |  <p>Earth flow (mud flow)</p> |
| COMPLEX |  <p>e.g. Slump-earthflow with rockfall debris</p> | |  <p>e.g. composite, non-circular part rotational/part translational slide grading to earthflow at toe</p> | |

BGS © IERC

Anexo 2: Velocidad de los movimientos (Adaptado de Cruden, Varnes 1996)

| Clase | Descripción | Velocidad (mm/sg) | Desplazamiento | Poder destructor |
|-------|-----------------------|--------------------|----------------|---|
| 7 | Extremadamente rápido | | | Catástrofe de violencia mayor; edificios destruidos por el impacto o el material desplazado, muchas muertes; escape improbable. |
| | | 5×10^3 | 5 m/seg | |
| 6 | Muy rápida | | | Alguna pérdida de vidas; velocidad demasiado alta para permitir a todas las personas escapar. |
| | | 5×10^1 | 3 m/min | |
| 5 | Rápida | | | Escape posible; estructuras, propiedades y equipos destruidos. |
| | | 5×10^{-1} | 1.8 m/hora | |
| 4 | Moderada | | | Algunas estructuras temporales y poco sensitivas pueden mantenerse temporalmente. |
| | | 5×10^{-3} | 13 m/mes | |
| 3 | Lenta | | | Construcciones remediales pueden llevarse a cabo durante el movimiento. Algunas estructuras insensitivas pueden mantenerse con mantenimiento frecuente. |
| | | 5×10^{-5} | 1.6 m/año | |
| 2 | Muy lenta | | | Algunas estructuras permanentes no son dañadas por el movimiento. |
| | | 5×10^{-7} | 16 mm/año | |
| 1 | Extremadamente lenta | | | Imperceptibles sin instrumentos; construcción posible pero deben tenerse precauciones. |


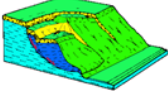


Anexo 3: Deformaciones de pre-falla en el deslizamiento de “Les grandes murailles” en Francia (Leroueil y otros 1996).



Anexo 4: Métodos de análisis de estabilidad de taludes (Fuente: Suárez, 1998)

| Método | Superficies de falla | Equilibrio | Características |
|---|--|------------------------------------|--|
| Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927) | Circulares | De fuerzas | Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos. |
| Bishop simplificado (Bishop 1955) | Circulares | De momentos | Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobredeterminada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela. |
| Janbú Simplificado (Janbú 1968) | Cualquier forma de superficie de falla. | De fuerzas | Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobredeterminada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección F_0 para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos. |
| Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970) | Cualquier forma de la superficie de falla. | De fuerzas | Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos. |
| Lowe y Karafiath (1960) | Cualquier forma de la superficie de falla. | De fuerzas | Asume que las fuerzas entre partículas están inclinados a un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas. Esta simplificación deja una serie de incógnitas y no satisface el equilibrio de momentos. Se considera el más preciso de los métodos de equilibrio de fuerzas. |
| Spencer (1967) | Cualquier forma de la superficie de falla. | Momentos y fuerzas | Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida. |
| Morgenstern y Price (1965) | Cualquier forma de la superficie de falla. | Momentos y fuerzas | Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria. |
| Sarma (1973) | Cualquier forma de la superficie de falla. | Momentos y fuerzas | Asume que las magnitudes de las fuerzas verticales siguen un sistema predeterminado. Utiliza el método de las dovelas para calcular la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla. Esto permite desarrollar una relación entre el coeficiente sísmico y el factor de seguridad. El factor de seguridad estático corresponde al caso de cero coeficiente sísmico. Satisface todas las condiciones de equilibrio; sin embargo, la superficie de falla correspondiente es muy diferente a la determinada utilizando otros procedimientos más convencionales. |
| Elementos finitos | Cualquier forma de la superficie de falla. | Analiza esfuerzos y deformaciones. | Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, pero no se obtiene un factor de seguridad. |
| Espiral logarítmica | Espiral logarítmica | Momentos y fuerzas. | Existen diferentes métodos con diversas condiciones de equilibrio. |

Anexo 5: Programas de software y aplicaciones para análisis de estabilidad de taludes. (Fuente: S. Azimi 2016).

| Nombre del Software | Detalles |
|--|---|
| <p>SLOPE/W (Slope Stability Analysis with SLOPE/W, 2016)</p>  | <p>Software generado por GEO-SLOPE International Ltd. Company, ubicada en Alberta, Canadá. Este software analiza la estabilidad de taludes calculando el factor de seguridad de los taludes de tierra y roca. Este programa puede estudiar de manera eficiente los mecanismos de falla simples y compuestos para una amplia gama de problemas. El software utiliza el equilibrio límite para modelar un problema en consideración mediante la aplicación de parámetros de entrada deterministas o probabilísticos. Además del equilibrio límite, este software puede utilizar el análisis de tensión de elementos finitos para generar un análisis más apropiado</p> |
| <p>Slope Stability Analysis Program (SSAP2010 (rel. 4.7.2 - 2016), 2016)</p>  | <p>Software gratuito que implementa una serie de características utilizando el LEM. El software incluye diferentes tipos de refuerzos, teniendo en cuenta sus efectos en los cálculos de seguridad.</p> |
| <p>GSTABL7 (GSTABL7 with STEDwin Gregory Geotechnical, 2016)</p> | <p>Este software, desarrollado por Gregory Geotechnical Software (2001), es un potente software de análisis de estabilidad que es una versión extendida del programa STABL diseñado en la Universidad de Purdue (1988). Este software utiliza el método de cortes en forma de un análisis de equilibrio de equilibrio en 2D para calcular el factor de seguridad utilizando cuatro procedimientos, incluido el Bishop modificado, el método simplificado de Janbú, Spencer y Morgenstern-Price, en el que se aplica el primer método para superficies de falla circulares y los tres últimos métodos se emplean para superficies de falla circular, aleatoria o de bloque deslizante.</p> |
| <p>ZSoil (Zace Services Ltd ZSoilPC software for geotechnics and geomechanics, 2016)</p>  | <p>Producido por Zace Services Ltd. Company en 1985, este software fue diseñado para modelar la mecánica de rocas y suelos, que incluye desplazamientos, flujo y dinámica. El software ZSoil está escrito para el entorno MS-Windows y logra un análisis de estabilidad de taludes basado en el método de elementos finitos.</p> |
| <p>midas GTS (midas GTS NX Geotechnical Analysis New Experience, 2016)</p>  | <p>Este programa fue desarrollado para aplicaciones de ingeniería geotécnica que emplean análisis de elementos finitos para manejar el análisis de estabilidad de taludes en 2D y 3D.</p> |
| <p>GEO5 (Geotechnical Software GEO5 Fine, 2016)</p> | <p>Este software emplea una técnica analítica y FEM para evaluar la estabilidad de taludes, con métodos analíticos que ayudan a los usuarios a diseñar estructuras de manera eficiente. La</p> |

| Nombre del Software | Detalles |
|--|--|
|  | <p>estructura planificada se puede ingresar en los cálculos de FEM para que se pueda realizar el análisis común de la estructura.</p> |
| <p>VERSAT-2D (Wu, 2013)</p>  | <p>Un paquete de software que comprende tres procesadores informáticos, incluidos VERSAT-D2D, VERSAT-2D y VERSAT-S2D. El programa VERSAT-2D se utiliza para generar datos de entrada para VERSAT-S2D y VERSAT-D2D. El programa utiliza el FEM para realizar análisis de estabilidad de taludes.</p> |
| <p>TAGAssoft</p>  <p>(Geotechnical Software - 3D Slope Stability – Geotechnical Software for a 3D World, 2016)</p> | <p>Esto fue desarrollado por Robert Pyke (1981), quien es un consultor de ingeniería geotécnica, en Berkeley, California.</p> |
| <p>TSLOPE (Geotechnical Software - 3D Slope Stability – Geotechnical Software for a 3D World, 2016)</p>  | <p>Este es un programa basado en el equilibrio límite, que puede manejar análisis de estabilidad de taludes en 2D o 3D.</p> |
| <p>SVSlope® (SoilVision Systems – Geotechnical Finite Element Software SVSLOPE®, 2016)</p>  | <p>Este es un programa basado en LEM que permite a los usuarios realizar análisis de taludes mediante el método de cortes o varios métodos basados en el estrés. Utiliza tanto el estrés como los LEM para el análisis de estabilidad de taludes. Para determinar la ubicación correcta de la superficie de deslizamiento crítica, el programa emplea métodos de búsqueda avanzados.</p> |
| <p>Slope (Oasys Software , 2015)</p>  | <p>Este software proporciona una serie de métodos establecidos, que incluyen el método horizontal de Bishop, Fellenius o el análisis de círculo de deslizamiento sueco, y el método de inclinación constante, para calcular las fuerzas intercaladas. Este programa emplea los métodos de Janbú equivalentes para analizar las superficies de deslizamiento no circulares.</p> |
| <p>Plaxis (PLAXIS - Essential for geotechnical professionals, 2016)</p>  | <p>Este es un programa basado en elementos finitos que tiene la intención de realizar análisis geotécnicos 2D y 3D.</p> |
| <p>FLAC/Slope (Engineering Consulting Geotechnical Software Earth Resources An Itasca International Company, 2016)</p>  | <p>Esto utiliza la interfaz gráfica para modelar problemas de estabilidad de taludes en una amplia variedad de condiciones del talud, que comprenden geometrías de taludes arbitrarias, capas múltiples, condiciones de presión de poros, propiedades heterogéneas del suelo, carga de superficie y refuerzo estructural (Itasca Consulting Group, 2015).</p> |

| Nombre del Software | Detalles |
|--|---|
| CandeCAD Pro (CandeCAD, 2016)  | (Análisis de alcantarilla y diseño dentro de AutoCAD) Este software se basa en el FEM que se desarrolló bajo el patrocinio de la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos. |
| XSLOPE (Slope stability - XSLOPE – Civil Engineering - The University of Sydney, 2016)  | Esto aplica el método simplificado de Bishop (1955) para superficies de falla circular y el análisis de Morgenstern y Price (1965, 1967) para superficies de falla no circular. Este programa es una versión desarrollada de la primera versión de DOS lanzada en 1982. |
| ReSSA (ReSSA (3.0), 2016) ReSSA (3.0) | Capaz de evaluar la estabilidad rotacional y traslacional de las pendientes, este programa fue desarrollado bajo el patrocinio de la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos. |
| LimitState:Geo (LimitState:GEO – Geotechnical Analysis Software LimitState, 2016)  | Este es un programa informático de análisis de estabilidad de taludes que determina rápidamente el mecanismo de falla. |
| GGU-STABILITY (GGU-STABILITY - Slope failure calculations and soil nailing, 2016)  | Este software puede usar no solo los métodos de Bishop o Krey para superficies de deslizamiento circular y el método de Janbu para superficies de deslizamiento poligonales, sino que también puede calcular las dimensiones del clavado del suelo (Geosysta, 2015). |
| SPECFEM3D GEOTECH (Computational Infrastructure for Geodynamics :: Software, 2016)  | Esto se basa en el método del elemento espectral para el análisis de estabilidad de taludes 3D. |
| GSLOPE (Mitre Software Corporation, 2016)  | Este utiliza el LEM para el análisis de estabilidad de taludes con refuerzo de suelo, taludes no reforzados fabricados y pendientes naturales. |
| ReActiv (Geocentrix ReActiv - overview, 2015)  | Este es un programa de computadora para diseñar taludes reforzados en una variedad de tipos de suelo, utilizando tierra reforzada o alfileres de suelo (Geosysta, 2015). |
| PCStabl (STABL -Slope Stability Analysis Software, 2016) | Esto aplica el proceso de geosintéticos para implementar la estabilidad de taludes y reforzar el análisis de taludes del suelo. |
| STAB-3D (Biodata - Dr.D.J.Petley, 2016) | Esto se basa en el LEM para el análisis de estabilidad de taludes 3D. Este programa es una versión de FORTRAN. |

| Nombre del Software | Detalles |
|---|--|
| CLARA-W (Slope Stability Analysis, 2016)  | Esto se lanzó en 2001, un programa de la versión de Windows, y tiene capacidades potentes para los análisis 3D y 2D. |
| GALENA (GALENA - Slope Stability Analysis, 2015)  | Este es un potente sistema de análisis de estabilidad de taludes desarrollado para ingenieros que prefieren resolver problemas geotécnicos a problemas informáticos (Scientific Software Group, 2015). |
| StrataSlope (StrataSlope System - Geogrid, 2016)  | Este es un programa informático interactivo que utiliza el método de Bishop (1955) para el análisis de estabilidad de taludes. |
| LISA (Level I Stability Analysis) (Soil and Water Engineering - Modeling Software, 2015).  | Esto utiliza la simulación de Monte Carlo de la ecuación de talud infinito para estimar una probabilidad de falla del talud para su uso en la evaluación de estabilidad relativa de taludes naturales. |
| XSTABL (XSTABL home page, 2016)  | Este software, desarrollado en la Universidad de Purdue, proporciona un entorno integrado para realizar análisis de estabilidad de taludes.. |
| Slide (Slide, 2016)  | Este es el software analítico más completo de estabilidad de taludes basado en el FEM. Este programa tiene la capacidad de realizar análisis de sensibilidad y probabilísticos. |
| QUAKE/W (Dynamic Earthquake Analysis with QUAKE/W - GEO-SLOPE International Ltd., 2016)  | Esto calcula un factor de seguridad al calcular la resistencia total al corte y el esfuerzo de corte movilizado al lado de toda la superficie de deslizamiento (www.geo-slope.com). Del mismo modo, el software utiliza el enfoque de Monte Carlo para calcular la probabilidad de falla. |
| CRISP (CRISP Geotechnical Finite Element Analysis Software, 2016)  | Este software, escrito en el estándar FORTRAN90, fue desarrollado originalmente por investigadores del Cambridge University Soil Mechanics Group a fines de los años 70. Este software implementa análisis de estabilidad mediante el uso de la técnica de elementos finitos. |
| GeoPIV (GeoPIV-RG, 2016)  | Este es un programa basado en MATLAB, que utiliza los principios del procesamiento de imágenes para recopilar datos de desplazamiento de un conjunto de imágenes digitales capturadas durante el proceso de pruebas geotécnicas y luego implementa el PIV para asignar el flujo de material. El software fue escrito por White (2002) y Take (2002) durante su investigación de doctorado. |

| Nombre del Software | Detalles |
|--|---|
| ABAQUS (Abaqus/CAE User's Guide (6.14), 2016) Abaqus 6.14 | Este es un programa basado en elementos finitos, diseñado para modelar estructuras tanto estáticas como dinámicas involucradas en el comportamiento del material. La característica única de ABAQUS es realizar una amplia variedad de análisis, como vibraciones, análisis de fallas/mecánica de fracturas, análisis de transferencia de calor, etc. Este programa se aplica para la optimización de procesos, el análisis de conformación general y las comparaciones de materiales, que ayudan a los usuarios a modelar un problema de una manera simple y fácil en comparación con las técnicas basadas en pruebas y errores. |

Anexo 6: Resultados de un análisis modal micro-petrográfico (Irfan – 1988)

| Material | Feldespatos inalterados % | Feldespatos alterados % | Cuarzo % | Biotita inalterada % | Biotita alterada % | Otros % | Vacios y microgrietas % | Minerales sanos % | Minerales alterados % | Total meteorización % | IMP |
|--------------|---------------------------|-------------------------|----------|----------------------|--------------------|---------|-------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|------|
| 1 | 10.2 | 40.5 | 24.3 | 0.1 | 1.9 | 0.1 | 22.9 | 34.7 | 42.4 | 65.3 | 0.53 |
| 2 | 9.4 | 41.4 | 21.5 | 0.8 | 3.0 | 0.0 | 23.7 | 31.7 | 44.4 | 68.1 | 0.47 |
| 3 | 2.7 | 55.6 | 25.2 | 0.0 | 3.0 | 0.0 | 13.5 | 27.9 | 58.6 | 72.1 | 0.39 |
| 4 | 10.2 | 28.9 | 32.9 | 0.0 | 4.2 | 0.0 | 23.6 | 43.1 | 33.1 | 56.7 | 0.76 |
| 5 | 9.4 | 46.2 | 18.7 | 0.2 | 1.6 | 0.0 | 24.0 | 28.3 | 47.8 | 71.8 | 0.39 |
| 6 | 7.0 | 46.2 | 22.7 | 0.0 | 4.4 | 0.0 | 19.5 | 29.7 | 50.6 | 70.1 | 0.42 |
| 7 | 5.5 | 47.2 | 22.9 | 0.0 | 0.9 | 0.0 | 23.6 | 28.4 | 48.1 | 71.6 | 0.40 |
| Granito sano | 68.2 | 2.0 | 28.0 | 0.7 | 0.3 | 0.1 | 0.6 | 97.0 | 2.3 | 2.9 | 33.4 |

Anexo 7: Características de algunos de los suelos tropicales, clasificados de acuerdo a la FAO (Wesley, 1988)

| Clasificación FAO | Nombre comunes | Minerales de arcilla dominantes | Características importantes |
|-------------------|--|--|---|
| Ferralsols | Suelos lateríticos Latosoles Arcillas rojas | Aloisita Caolinita Gibbsite Geotita | Un grupo muy grande con una gran variación de características |
| Andosols | Cenizas volcánicas | Alofanos Aloisita | Contenidos muy altos de agua y cambios irreversibles al secarse |
| Vertisols | Suelos negros tropicales. Suelos algodón negro. | Esmectita Montmorillonita | Alta expansión y baja resistencia. |

Anexo 8: Sistema de clasificación de suelos residuales (Wesley, 1997)

| Grupo | Subgrupo | Ejemplo | Identificación | Comentarios |
|---|---|---|---|--|
| A Suelos sin influencia mineralógica fuerte | (a) Influencia fuerte de la macroestructura | Suelos de rocas ígneas ácidas o intermedias y rocas sedimentarias muy meteorizadas. | Inspección visual | Este es un grupo muy grande de suelos, incluyendo los saprolitos, cuyo comportamiento en las laderas es dominado por la influencia de las discontinuidades, fisuras, etc. |
| | (b) Influencia fuerte de la microestructura | Suelos de rocas ígneas y sedimentarias completamente meteorizadas. | Inspección visual y evaluación de la sensibilidad e índice de liquidez. | Son suelos esencialmente homogéneos. Es importante la identificación de la naturaleza y papel de las discontinuidades heredadas, tanto primarias como secundarias para poder entender el comportamiento. |
| | (c) Poca influencia de la estructura | Suelos derivados de rocas muy homogéneas | Poca o ninguna sensibilidad y apariencia uniforme. | Se comportan en forma similar a los suelos moderadamente sobreconsolidados. |
| B Suelos fuertemente influenciados por minerales comunes | (a) Grupo de la Smectita y montmorillonita. | Suelos negros tropicales y suelos formados en condiciones pobremente drenadas. | Colores gris a negro y alta plasticidad. | Suelos problemáticos encontrados en zonas planas; son de baja resistencia, alta compresibilidad y características fuertes de expansión y contracción. |
| | (b) Otros minerales comunes | | | Subgrupo relativamente pequeño. |
| C Suelos fuertemente influenciados por minerales arcillosos propios solamente de los suelos residuales | (a) Grupo de los Alófanos | Suelos derivados de ceniza volcánica. | Contenidos de agua muy altos y cambios irreversibles al secarse. | Altos límites líquidos y plásticos. Las características de ingeniería son generalmente buenas, aunque en algunos casos la alta sensibilidad hace difícil el manejo y la compactación. |
| | (b) Grupo de la Aloysita | Suelos derivados de rocas volcánicas antiguas. Especialmente arcillas rojas tropicales. | Color rojo, topografía bien drenada. | Suelos finos de baja a media plasticidad, pero de baja actividad. Las propiedades de ingeniería son generalmente buenas. (Debe tenerse en cuenta que con frecuencia se traslapan los suelos alófanos y los aloysíticos). |
| | (c) Grupo de los Sesquioxidos | Suelos lateríticos o lateritas | Apariencia granular o nodular. | Es un grupo muy amplio que van desde arcillas limosas hasta gravas y arenas gruesas. Su comportamiento varía desde la baja plasticidad hasta la grava no plástica. |

Anexo 9: Valor experimental de ϕ^b (Fredlund and Morgenstern 1978)

| Soil type | c' (kPa) | ϕ' (°) | ϕ^b (°) | Test procedure | Reference |
|--|------------|-------------------|--------------|--|-------------------------------|
| Compacted shale; $w = 18.6\%$ | 15.8 | 24.8 | 18.1 | Constant water content triaxial | Bishop and Morgenstern (1960) |
| Boulder clay; $w = 11.6\%$ | 9.6 | 27.3 | 21.7 | Constant water content triaxial | Bishop and Morgenstern (1960) |
| Dhanauri clay; $w = 22.2\%$, $\rho_d = 1,580 \text{ kg/m}^3$ | 37.3 | 28.5 | 16.2 | Consolidated drained triaxial | Satija (1978) |
| Dhanauri clay; $w = 22.2\%$, $\rho_d = 1,478 \text{ kg/m}^3$ | 20.3 | 29.0 | 12.6 | Constant drained triaxial | Satija (1978) |
| Dhanauri clay; $w = 22.2\%$, $\rho_d = 1,580 \text{ kg/m}^3$ | 15.5 | 28.5 | 22.6 | Consolidated water content triaxial | Satija (1978) |
| Dhanauri clay; $w = 22.2\%$, $\rho_d = 1,478 \text{ kg/m}^3$ | 11.3 | 29.0 | 16.5 | Constant water content triaxial | Satija (1978) |
| Madrid grey clay; $w = 29\%$, | 23.7 | 22.5 ^a | 16.1 | Consolidated drained direct shear | Escario (1980) |
| Undisturbed decomposed granite; Hong Kong | 28.9 | 33.4 | 15.3 | Consolidated drained multistage triaxial | Ho and Fredlund (1982a) |
| Undisturbed decomposed rhyolite; Hong Kong | 7.4 | 35.3 | 13.8 | Consolidated drained multistage triaxial | Ho and Fredlund (1982a) |
| Tappen-Notch hill silt; $w = 21.5\%$, $\rho_d = 1,590 \text{ kg/m}^3$ | 0.0 | 35.0 | 16.0 | Consolidated drained multistage triaxial | Krahn et al. (1989) |
| Compacted glacial till; $w = 12.2\%$, $\rho_d = 1,810 \text{ kg/m}^3$ | 10 | 25.3 | 7–25.5 | Consolidated drained multistage direct shear | Gan et al. (1988) |

^a. Average value

Anexo 10: Empaque de ramas (Branch packing) (Fuente: USDA, 2000)



Anexo 11: Capas de cepillos con estacas vivas (Brush layering) (Fuente: Sotir para NCHRP, 2012)



Anexo 12: Colchón de cepillos (Brush Mattress) (Fuente: Sotir & Associates para USDA, 2000)



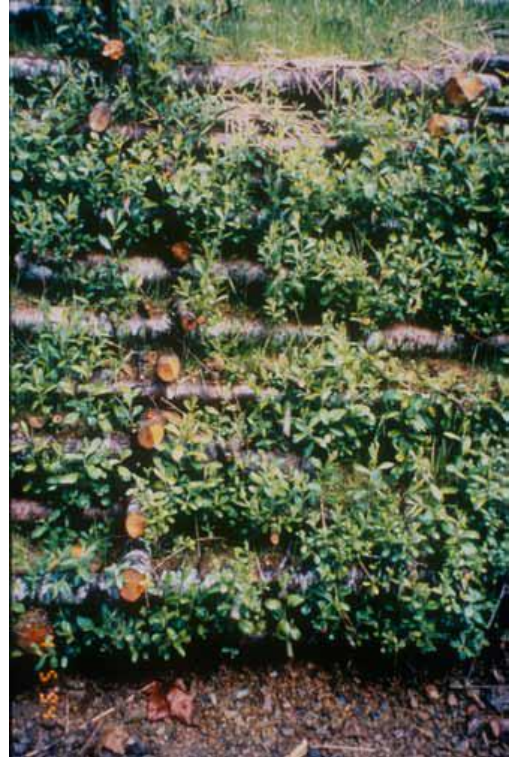
Anexo 13: Rollo de fibra de coco (Coconut Fiber Roll) (Fuente: Aussie Environmental, 2019)



Anexo 14: Siembra conjunta (Joint Planting) (Fuente: Sotir & Associates para USDA, 2000)



Anexo 15: Muro de cuna vivo o Live Cribwall (Fuente: Keller para NCHRP & USDA)



Anexo 16: Fajinas vivas o Live Fascines (Fuente: Keller para NCHRP, 2012)



Anexo 17: Árboles utilizados para cercas vivas y estabilización de taludes (CDBM 1989) (Fuente: Suárez, 1998)

| Nombre común | Nombre científico | Distancia de plantación |
|--------------------|---------------------------------|-------------------------|
| Aliso | <i>Alnus jorullensis</i> | 2 a 3 m. |
| Anaco | <i>Erythrina poeppigiana</i> | 2 a 3 m. |
| Aro | <i>Trichantera gigante</i> | 1.5 a 3 m. |
| Arrayán | <i>Myrcia popayanensis</i> | 1.5 a 3 m. |
| Balso | <i>Ochroma pyramidale</i> | 2 a 3 m. |
| Búcaro | <i>Erythrina fusca</i> | 2 a 3 m. |
| Casuarina | <i>Casuarina equisetifolia</i> | 2 a 3 m. |
| Chachafruto | <i>Erythrina edulis</i> | 1.5 a 3 m. |
| Ciprés | <i>Cupressus lusitanica</i> | 2 a 3 m. |
| Eucalipto globulus | <i>Eucalyptus globulus</i> | 2 a 3 m. |
| Eucalipto grandis | <i>Eucalyptus grandis</i> | 2 a 3 m. |
| Guacimo | <i>Guazuma ulmifolia</i> | 2 a 3 m. |
| Gualanday | <i>Jacaranda caucana</i> | 2 a 3 m. |
| Guamo macheto | <i>Inga densiflora</i> | 1.5 a 3 m. |
| Leucaena | <i>Leucaena leucocephala</i> | 1.5 a 3 m. |
| Mataratón | <i>Gliricidia sepium</i> | 1.5 a 3 m. |
| Melina | <i>Gmelina arborea</i> | 2 a 3 m. |
| Nauno | <i>Pseudosamanea guachapele</i> | 2 a 3 m. |
| Pino oocarpa | <i>Pinus oocarpa</i> | 2 a 3 m. |
| Pino Pátula | <i>Pinus patula</i> | 2 a 3 m. |
| Roble | <i>Quercus humboldtii</i> | 2 a 3 m. |
| Sauce | <i>Salix humboldtiana</i> | 2 a 3 m. |
| Urapán | <i>Fraxinus chinensis</i> | 2 a 3 m. |

Anexo 18: Estacas vivas o Live Stakes (Fuente: Sotir & Associates for USDA, 1992)



Anexo 19: Geomalla de vegetación o Vegetated Geogrid (Fuente: Naue Geosynthetics, 2019)



Anexo 20: Mantillo (Mulching) (Fuente: USDA, 2000)



Anexo 21: Distribución de semillas y fertilizante. (Fuente: USDA, 2000)

