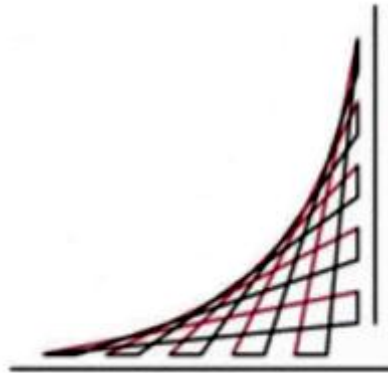


**EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE EN SUELOS
DE LADERA CUBIERTOS CON PASTO VETIVER (*CHRYSOPOGON
ZIZANIOIDES*) EN LA VÍA NEIVA-VEGALARGA DEPARTAMENTO DEL HUILA**

JESSIKA MAGRETH HERRERA PASSOS



**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA MAESTRIA EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2015**

**EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE EN SUELOS
DE LADERA CUBIERTOS CON PASTO VETIVER (*CHRYSOPOGON
ZIZANIOIDES*) EN LA VÍA NEIVA-VEGALARGA DEPARTAMENTO DEL HUILA**

JESSIKA MAGRETH HERRERA PASSOS

**Trabajo de grado para optar el grado de
Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia**

Director
ING. JOSE VICENTE AMORTEGUI

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA MAESTRIA EN INGENIERÍA CIVIL
Bogotá D.C
2015**

Nota de aceptación:

Jurado

Jurado

Director del trabajo de grado

Bogotá D.C., 13 de Mayo de 2015

DEDICATORIA

Este trabajo de grado está dedicado a mis padres **Jesús Ignacio** y **Flor**, quienes con su apoyo, comprensión, cariño, amor, confianza y ejemplo han afianzado mis valores para poder desenvolverme como persona y profesional.

A mis hermanos **Cristian Alexander** y **Brian Felipe** quienes me brindaron su compañía constante y apoyo incondicional, solo me resta decirles que cuando se quiere alcanzar algo en la vida, no hay tiempo ni obstáculo que lo impida.

Al Ingeniero **José Vicente Amórtegui Gil**, Director del trabajo de grado, quién con su amplia experiencia guío todo el proceso para la realización de ésta tesis.

A mis maestros que influyeron con sus lecciones y experiencias todo éste proceso formativo e investigativo, para estar preparada ante los retos profesionales que impone la vida.

A todas aquellas personas que de alguna manera contribuyeron para alcanzar este logro.

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia quiero agradecerle a **Dios** por brindarme salud, fortaleza, alegría, tranquilidad, sabiduría, entendimiento y humildad, para alcanzar los sueños, logros y metas propuestas en éste proyecto.

A la **Universidad Cooperativa de Colombia** sede Neiva, por facilitar el tiempo para realizar esta investigación y permitir el uso de sus equipos y laboratorios.

Al Ingeniero **José Vicente Amórtegui**, Director de esta investigación, quien con su permanente asesoría compartió sus conocimientos y permitió con ello lograr la culminación de este trabajo de grado.

A **Francisco Vargas**, auxiliar de laboratorio de la UCC sede Neiva, quien presto colaboración durante la realización de los ensayos.

A los ingenieros **Julio Estrada** y **Teófilo Avellaneda** por su colaboración en el suministro de información durante el desarrollo del proyecto.

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|-----------|
| RESUMEN _____ | 15 |
| ABSTRACT _____ | 16 |
| INTRODUCCIÓN _____ | 17 |
| 1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA _____ | 19 |
| 2. OBJETIVOS _____ | 20 |
| 2.1. <i>OBJETIVO GENERAL</i> _____ | 20 |
| 2.2. <i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i> _____ | 20 |
| 3. JUSTIFICACIÓN _____ | 21 |
| 4. MARCOS DE REFERENCIA _____ | 22 |
| 4.1. <i>MARCO GEOGRÁFICO</i> _____ | 22 |
| 4.2. <i>MARCO TEÓRICO</i> _____ | 26 |
| 4.2.1 Descripción del pasto vetiver. _____ | 26 |
| 4.2.2 Características especiales de la planta de vetiver. _____ | 28 |
| 4.2.2.1 Características morfológicas. _____ | 28 |
| 4.2.2.2 Características fisiológicas. _____ | 29 |
| 4.2.2.3 Características ecológicas. _____ | 29 |
| 4.2.2.4 Tolerancia de la planta de vetiver al frío. _____ | 30 |
| 4.2.2.5 Resumen del rango de adaptabilidad. _____ | 30 |
| 4.2.2.6 Características genéticas. _____ | 31 |
| 4.2.3 Métodos para propagar el vetiver. _____ | 33 |
| 4.2.3.1 Viveros de vetiver. _____ | 34 |
| 4.2.3.2 Métodos de propagación. _____ | 35 |
| 4.2.4 Preparación del material de siembra. _____ | 39 |
| 4.2.4.1 Bolsas de polietileno o tubetes. _____ | 39 |
| 4.2.4.2 Plantación en bandas _____ | 39 |
| 4.2.5 Ejemplos del sistema vetiver para la reducción de desastres naturales y la protección de infraestructura. _____ | 40 |
| 4.2.5.1 Tipos de desastres naturales que pueden ser reducidos mediante la aplicación del sistema vetiver (sv). _____ | 40 |
| 4.2.5.2 Principios generales de estabilidad de una pendiente y estabilización de pendientes. _____ | 42 |
| 4.2.6 Estabilización de pendientes usando el sistema vetiver. _____ | 47 |
| 4.2.6.1 Características del vetiver apropiadas para la estabilización de taludes. _____ | 47 |
| 4.2.6.2 Características del vetiver adecuadas para la mitigación de desastres asociados con el agua. _____ | 49 |
| 4.2.6.3 Tensión y fuerzas de corte de las raíces de vetiver. _____ | 50 |
| 4.2.6.4 Características hidráulicas. _____ | 52 |

| | |
|--|------------|
| 4.2.6.5 Presión de agua en los poros. | 53 |
| 4.2.6.6 Aplicaciones del SV en la mitigación de desastres naturales y protección de infraestructura. | 54 |
| 4.2.6.7 Ventajas y desventajas del Sistema Vetiver (SV). | 55 |
| 4.2.6.8 Combinación con otros tipos de remediación. | 57 |
| 4.2.6.9 Modelaje computarizado. | 57 |
| 4.2.7 Diseño y técnicas apropiadas. | 58 |
| 4.2.7.1 Precauciones. | 58 |
| 4.2.7.2 Momento de realizar la plantación. | 60 |
| 4.2.7.3 Vivero. | 60 |
| 4.2.7.4 Especificaciones del trazado. | 61 |
| 4.2.8 Usos del pasto vetiver en el mundo. | 65 |
| 4.2.9 Estabilidad de los taludes. | 68 |
| 4.2.9.1 Deslizamientos. | 68 |
| 4.2.9.2 Aspectos generales del papel de la vegetación en la estabilidad de laderas y taludes. | 77 |
| 4.2.10 Determinación de la resistencia al corte método de corte directo según norma Invias – 154 – | 10. |
| 4.2.10.1 Marco teórico y procedimiento. | 84 |
| 4.2.10.2 Procedimiento para ensayo de corte directo con muestra inalterada | 87 |
| 4.2.10.3 Procedimiento para ensayo de corte directo con muestra alterada. | 89 |
| 4.2.10.4 Esfuerzo cortante vs deformación. | 91 |
| 4.2.10.5 Cortante máximo vs esfuerzo normal. | 93 |
| 4.2.10.6 Resistencia al corte | 94 |
| 4.2.10.7 Envolvente de resistencia de Mohr Coulomb. | 95 |
| 4.2.10.8 Resistencia al corte de los materiales granulares. | 97 |
| 4.2.10.9 Factores que afectan la resistencia al corte. | 100 |
| 4.2.10.10 Aplicaciones prácticas de la resistencia al corte | 100 |
| 5. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOMORFOLÓGICA DE LA ZONA DE ESTUDIO | 103 |
| 5.1. METODO DE TRABAJO | 103 |
| 5.2. DESCRIPCIÓN DE CONDICIONES GENERALES DEL TERRENO | 105 |
| 5.3. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL | 105 |
| 5.3.1 Estratigrafía. | 106 |
| 5.3.2 Geología Local. | 109 |
| 5.4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL | 110 |
| 5.5. MARCO METODOLÓGICO DE GEOMORFOLOGÍA | 110 |
| 6. DISEÑO EXPERIMENTAL | 114 |
| 6.1. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL EN LA ZONA DE ESTUDIO | 114 |
| 6.1.1 Procedimientos del análisis granulométrico y resultados de ensayo. | 115 |
| 6.1.2 Análisis del sistema radicular del pasto vetiver y clasificación del vetiver. | 120 |
| 6.1.3 Desarrollo del vetiver en parcela en tierra y canal de tratamiento. | 130 |
| 6.1.3.1 Mediciones vetiver parcela en tierra. | 130 |
| 6.1.3.2 Mediciones vetiver en canal de tratamiento. | 130 |
| 6.1.3.3 Resultados obtenidos. | 132 |
| 6.2. EQUIPOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS PARA EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN | 138 |
| 6.3. METODO UTILIZADO EN EL ESTUDIO | 139 |

6.4. RESULTADOS Y ANÁLISIS _____ 141

6.4.1 ARENA LIMOSA (SM). _____ 142

6.4.1.1 Ensayo Consolidado Drenado _____ 142

6.4.1.2 Ensayo Consolidado No Drenado. _____ 152

6.4.1.3 Ensayo No Consolidado No Drenado. _____ 154

6.4.2 ARENA ARCILLO LIMOSA (SM-SC) _____ 156

6.4.2.1 Ensayo Consolidado Drenado _____ 156

6.4.2.2 Ensayo Consolidado No Drenado. _____ 159

6.4.2.3 Ensayo No Consolidado No Drenado. _____ 161

6.5. SIMULACIÓN _____ 162

6.5.1 Parámetros de Análisis. _____ 163

6.5.2 Análisis Sin Vetiver. _____ 163

6.5.3 Análisis Con Vetiver. _____ 164

CONCLUSIONES _____ 169

BIBLIOGRAFÍA _____ 174

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|--|------|
| Tabla 1 Datos Generales del Departamento del Huila _____ | 23 |
| Tabla 2 Veredas del Corregimiento de Vegalarga _____ | 24 |
| Tabla 3 Clasificación Científica Del pasto Vetiver _____ | 26 |
| Tabla 4 Rango de adaptabilidad de la planta de vetiver en Australia y en otros países. _____ | 30 |
| Tabla 5 Causas y consecuencias de la erosión _____ | 44 |
| Tabla 6 Fuerza de tensión de la raíz de algunas plantas _____ | 51 |
| Tabla 7 Diámetro y fuerza de tensión de la raíz de varias hierbas _____ | 52 |
| Tabla 8 Clasificación de Movimiento Predominantes _____ | 69 |
| Tabla 9 Resistencia de las raíces de algunas plantas a la tensión _____ | 81 |
| Tabla 10 Intervalo de valores tipicos del ángulo verdadero de fricción interna para varios suelos. _____ | 94 |
| Tabla 11 Valores típicos de ϕ' pico y ϕ' residual _____ | 99 |
| Tabla 12 Geomorfología y fisiografía, unidades geomorfológicas y procesos en el área de estudio. _____ | 112 |
| Tabla 13 Datos de Análisis Granulométrico para una Arena Limosa – SM _____ | 115 |
| Tabla 14 Valores totales mensuales de precipitación (mms) de la zona de estudio _____ | 128 |
| Tabla 15 Valores mensuales de temperatura (°C) de la zona de estudio _____ | 129 |
| Tabla 16 Cantidades y condiciones de los ensayos de Corte Directo _____ | 140 |
| Tabla 17 Tabla resumen de resultados obtenidos en el ensayo de corte directo en muestras sin Vetiver _____ | 145 |
| Tabla 18 Tabla resumen de resultados obtenidos en el ensayo de corte directo SM _____ | 150 |
| Tabla 19 Tabla resumen de resultados obtenidos en el ensayo de corte directo SM-SC _____ | 158 |
| Tabla 20 Parámetros de Análisis _____ | 163 |
| Tabla 21 Parámetros obtenidos de los ensayos de corte directo _____ | 170 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1 División Política del Huila _____ | 22 |
| Figura 2 Infraestructura vial del departamento del Huila _____ | 23 |
| Figura 3 Corregimiento de Vegalarga en el Municipio de Neiva _____ | 24 |
| Figura 4 Ubicación geográfica de la zona de estudio _____ | 25 |
| Figura 5 Vía Neiva-Vegalarga _____ | 25 |
| Figura 6 Como separar los hijos de vetiver _____ | 36 |
| Figura 7 Segmentos de culmos o cañas con nudos _____ | 37 |
| Figura 8 El Vetiver forma un biofiltro grueso y efectivo (izquierda) y debajo de a la superficie (derecha) _____ | 48 |
| Figura 9 Distribución del diámetro de las raíces _____ | 50 |
| Figura 10 Fuerzas de resistencia al corte de la raíz del vetiver _____ | 52 |
| Figura 11 Modelo hidráulico de una inundación atravesando barreras de vetiver _____ | 53 |
| Figura 12 Caidas _____ | 70 |
| Figura 13 Volcamientos _____ | 70 |
| Figura 14 Deslizamiento rotacional _____ | 71 |
| Figura 15 Deslizamiento traslacional _____ | 71 |
| Figura 16 Propagación lateral _____ | 72 |
| Figura 17 (a) Flujo plástico (creep o reptamiento) _____ | 74 |
| Figura 18 (b) Flujos de detritos y de tierra _____ | 75 |
| Figura 19 (c) Flujo de lodos _____ | 76 |
| Figura 20 Dispositivo para el ensayo del corte directo _____ | 86 |
| Figura 21 Curva esfuerzo cortante – deformación _____ | 91 |
| Figura 22 Eje de la falla predeterminada en el ensayo de Corte Directo _____ | 92 |
| Figura 23 Falla frágil _____ | 92 |
| Figura 24 Falla plástica _____ | 92 |
| Figura 25 Evolvente de falla _____ | 93 |
| Figura 26 Evolución de resistencia y posibles estados _____ | 95 |
| Figura 27 Envolvente de Mohr-Coulomb y Real _____ | 96 |
| Figura 28 Representación gráfica del plano de falla _____ | 97 |
| Figura 29 Comportamiento en Arenas del T vs σ _____ | 97 |
| Figura 30 Comportamiento en arenas densas y sueltas _____ | 98 |
| Figura 31 Cambio de la envolvente de resistencia en arenas según su densidad _____ | 99 |
| Figura 32 Geología, Planchas 323 Neiva y 324 Tello _____ | 104 |
| Figura 33 Curva granulométrica para Arena Limosa - SM _____ | 116 |
| Figura 34 Límites de Atterberg en Arena Limosa - SM _____ | 116 |

| | |
|--|-----|
| Figura 35 Levantamiento topográfico de la zona de estudio _____ | 119 |
| Figura 36 Plano topográfico de la zona de estudio según IGAC _____ | 119 |
| Figura 37 Geología de la zona de estudio INGEOMINAS _____ | 120 |
| Figura 38 Comportamiento de esfuerzo a la tracción vs diámetro del vetiver _____ | 124 |
| Figura 39 Representación gráfica de la Precipitación total mensual de la zona _____ | 128 |
| Figura 40 Representación gráfica de la Temperatura _____ | 129 |
| Figura 41 Evolución de la altura media de la macolla del Vetiver sembrado en tierra _____ | 133 |
| Figura 42 Evolución de la altura máxima de la macolla del Vetiver sembrado en tierra _____ | 134 |
| Figura 43 Evolución del área de la macolla del Vetiver sembrado en tierra _____ | 135 |
| Figura 44 Evolución del crecimiento de raíces del Vetiver en medio acuático _____ | 136 |
| Figura 45 Evolución del crecimiento máximo de raíces del Vetiver en medio acuático _____ | 137 |
| Figura 46 Evolución del área transversal de raíces del Vetiver en medio acuático _____ | 138 |
| Figura 47 Curvas de la envolvente de falla Morh Coulomb _____ | 141 |
| Figura 48 Envolvente de falla Arena Limosa muestra de Control–Ensayo A Consolidado Drenado _____ | 143 |
| Figura 49 Esfuerzo Cortante Vs Deformación Horizontal - Arena Limosa muestra de control – Ensayo A Consolidado Drenado _____ | 143 |
| Figura 50 Envolvente de falla Arena Limosa muestra de control – Ensayo B Consolidado Drenado _____ | 144 |
| Figura 51 Esfuerzo Cortante Vs Deformación Horizontal - Arena Limosa muestra de control – Ensayo B Consolidado Drenado _____ | 144 |
| Figura 52 Envolvente de falla Arena Limosa muestra con Vetiver – Ensayo A Consolidado Drenado _____ | 145 |
| Figura 53 Esfuerzo Cortante Vs Deformación Horizontal Arena Limosa muestra con Vetiver – Ensayo A Consolidado Drenado _____ | 146 |
| Figura 54 Envolvente de falla Arena Limosa muestra con Vetiver – Ensayo B Consolidado Drenado _____ | 146 |
| Figura 55 Esfuerzo Cortante Vs Deformación Horizontal Arena Limosa muestra con Vetiver – Ensayo B Consolidado Drenado _____ | 147 |
| Figura 56 Envolvente de falla Arena Limosa muestra con Vetiver – Ensayo C Consolidado Drenado _____ | 147 |
| Figura 57 Esfuerzo Cortante Vs Deformación Horizontal Arena Limosa muestra con Vetiver – Ensayo C Consolidado Drenado _____ | 148 |
| Figura 58 Envolvente de falla Arena Limosa muestra con Vetiver – Ensayo D Consolidado Drenado _____ | 148 |
| Figura 59 Esfuerzo Cortante Vs Deformación Horizontal Arena Limosa muestra con Vetiver – Ensayo D Consolidado Drenado _____ | 149 |
| Figura 60 Envoltentes de falla – Arena Limosa – Ensayo Consolidado Drenado _____ | 150 |
| Figura 61 Deformación Vertical y Esfuerzo Cortante en función de la deformación horizontal – Arena Limosa – Ensayo Consolidado Drenado _____ | 151 |

| | |
|--|-----|
| Figura 62 Envoltente de Falla en término de esfuerzos efectivos y en totales _____ | 152 |
| Figura 63 Envoltentes de falla – Arena Limosa – Ensayo Consolidado No Drenado _____ | 153 |
| Figura 64 Deformación Vertical y Esfuerzo Cortante en función de la deformación horizontal – Arena Limosa – Ensayo Consolidado No Drenado _____ | 153 |
| Figura 65 Envoltentes de falla – Arena Limosa – Ensayo No Consolidado No Drenado _____ | 155 |
| Figura 66 Deformación Vertical y Esfuerzo Cortante en función de la deformación horizontal – Arena Limosa – Ensayo No Consolidado No Drenado _____ | 155 |
| Figura 67 Envoltente de falla Arena Arcillo Limosa muestra Control – Ensayo A Consolidado Drenado _____ | 156 |
| Figura 68 Envoltente de falla Arena Arcillo Limosa muestra con Vetiver – Ensayo A Consolidado Drenado _____ | 157 |
| Figura 69 Esfuerzo Cortante Vs Deformación Horizontal Arena Limosa muestra con Vetiver – Ensayo A Consolidado Drenado _____ | 157 |
| Figura 70 Envoltentes de falla – Arena Arcillo Limosa – Ensayo Consolidado Drenado _____ | 158 |
| Figura 71 Deformación Vertical y Esfuerzo Cortante en función de la deformación horizontal – Arena Arcillo Limosa – Ensayo Consolidado Drenado _____ | 159 |
| Figura 72 Envoltentes de falla – Arena Arcillo Limosa – Ensayo Consolidado No Drenado _____ | 160 |
| Figura 73 Deformación Vertical y Esfuerzo Cortante en función de la deformación horizontal – Arena Arcillo Limosa – Ensayo Consolidado No Drenado _____ | 160 |
| Figura 74 Envoltentes de falla – Arena Arcillo Limosa – Ensayo No Consolidado No Drenado _____ | 161 |
| Figura 75 Deformación Vertical y Esfuerzo Cortante en función de la deformación horizontal – Arena Arcillo Limosa – Ensayo No Consolidado No Drenado _____ | 162 |
| Figura 76 Superficies de falla en el análisis de estabilidad _____ | 162 |
| Figura 77 Variación del factor de seguridad en función de la inclinación del talud- Sin Vetiver. _ | 164 |
| Figura 78 Corte transversal de pasto Vetiver con area de influencia de la planta _____ | 164 |
| Figura 79 Variación del factor de seguridad en función de la inclinación del talud- Con Vetiver- Superficie de falla Crítica _____ | 165 |
| Figura 80 Variación del factor de seguridad en función de la inclinación del talud- Con Vetiver- Superficie de falla Inicial _____ | 166 |
| Figura 81 Analogía del Vetiver con Micropilotes _____ | 166 |
| Figura 82 Análisis del Factor de Seguridad _____ | 167 |
| Figura 83 Aumento del factor de seguridad en función de la inclinación del talud _____ | 167 |
| Figura 84 Esfuerzo Cortante en función de la deformación horizontal _____ | 171 |
| Figura 85 Raíces en el Corte Directo _____ | 172 |

LISTA DE FOTOS

| | Pág. |
|--|------|
| Foto 1 Hojas de Vetiver, izquierda: <i>C. zizanioides</i> , derecha: <i>C. nemoralis</i> _____ | 32 |
| Foto 2 Brotes de Vetiver, izquierda: <i>C. zizanioides</i> , derecha: <i>C. nemoralis</i> _____ | 32 |
| Foto 3 Diferencias entre las raíces de <i>C. zizanioides</i> (arriba) y <i>C. nemoralis</i> (abajo) _____ | 33 |
| Foto 4 Izquierda: Siembra mecanizada; derecha: siembra manual _____ | 35 |
| Foto 5 Hijos a raíz desnuda listos para plantar (izquierda); sumergidos en barro de arcilla o licuado de estiércol (derecha) _____ | 36 |
| Foto 6 Hijos a raíz desnuda y material de contenedores (izquierda), y plantas en bolsas de polietileno listas para ser plantadas (derecha) _____ | 39 |
| Foto 7 Plantación en bandas (izq.) en contenedores y removidas de los contenedores (centro), y listas para la siembra (derecha) _____ | 40 |
| Foto 8 Flujo de detritos en talud de la vía que conduce de Neiva a Vegalarga _____ | 76 |
| Foto 9 Alto riesgo de la población de Vegalarga, (Huila), por inestabilidad del terreno _____ | 79 |
| Foto 10 Talud en la carretera Neiva-Vegalarga, flujos de tierra _____ | 80 |
| Foto 11 Trabajos de implantación del pasto Vetiver _____ | 82 |
| Foto 12 Trabajo de campo: Pasto Vetiver sembrado en el talud. Vía Neiva-Vegalarga _____ | 82 |
| Foto 13 Pasto Vetiver después de un año de sembrado _____ | 83 |
| Foto 14 Plantas en desarrollo sembrada en talud. Vía Neiva-Vegalarga _____ | 83 |
| Foto 15 Preparación de muestra para ensayo de corte directo y falla de la muestra _____ | 89 |
| Foto 16 Ejecución del ensayo de Corte Directo _____ | 89 |
| Foto 17 Análisis granulométrico y Límites de Atterberg _____ | 117 |
| Foto 18 Ensayos de Gravedad específica en arenas, Densidad máxima, y Contenido de materia orgánica _____ | 117 |
| Foto 19 Toma de densidades en campo, mediciones de la zona y permeabilidad del material _____ | 118 |
| Foto 20 Trabajo de campo para el levantamiento topográfico en la zona de estudio _____ | 118 |
| Foto 21 Estructura interna de las raíces del pasto Vetiver _____ | 120 |
| Foto 22 Estructura interna de las raíces del pasto Vetiver _____ | 121 |
| Foto 23 Microscopio NIKON utilizado para el análisis de la estructura de la raíz del pasto Vetiver _____ | 121 |
| Foto 24 Colocación de la raíz del pasto Vetiver y medición del diámetro para ensayo a tracción _____ | 123 |
| Foto 25 Ejecución ensayo a tracción de la raíz del pasto Vetiver en equipo Humboldt HM 3000 _____ | 123 |
| Foto 26 Medición de raíz del pasto Vetiver con seis meses de edad _____ | 124 |
| Foto 27 Ensayo de resistencia al corte con raíces de pasto Vetiver _____ | 125 |
| Foto 28 Visita del Ingeniero José Vicente Amortegui Director de la Tesis de Grado _____ | 125 |
| Foto 29 Panorama inicial de la zona de estudio _____ | 126 |
| Foto 30 Proceso final de plantación del pasto Vetiver, los trinchos y los drenes _____ | 127 |

| | |
|--|-----|
| Foto 31 Desarrollo y crecimiento de las plántulas de pasto Vetiver _____ | 127 |
| Foto 32 Medición de vetiver en tierra. Planta No.7 _____ | 130 |
| Foto 33 Medición de Vetiver en canal de tratamiento. Planta No.12 _____ | 131 |
| Foto 34 Montaje para crecimiento del Vetiver en tierra y en agua _____ | 131 |

RESUMEN

JESSIKA MAGRETH HERRERA PASSOS

jessika.herrera@mail.escuelaing.edu.co

DIRECTOR DEL TRABAJO DIRIGIDO:

ING. JOSE VICENTE AMORTEGUI

Profesor Asociado de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

jamorteg@gmail.com

Palabras claves: Vetiver, Raíces, Resistencia al Corte, Corte Directo

En lugares, donde las laderas están expuestas a procesos erosión superficiales y a subsecuentes procesos de inestabilidad debido a la pérdida de resistencia de los materiales térreos, disponer sistemas de refuerzo, que proyecten la protección de la capa superficial de suelo, favoreciendo la capa vegetal y usándola como un sistema de refuerzo, es viable.

El sistema Vetiver plantea una solución particular a este problema. Al ser dispuestos de manera sistemática en la ladera, no solo aumenta la cobertura vegetal superficial, controlando procesos erosivos superficiales sino que también mejora las condiciones de estabilidad de los materiales térreos en profundidad.

Esta investigación se centró en el estudio de la influencia de las raíces en la resistencia al corte del suelo, siguiendo el criterio de falla de Mohr Coulomb y en la simulación de estas condiciones en función de la estabilidad de la ladera. Los resultados obtenidos, muestran un claro aumento de las propiedades de resistencia del suelo y un efecto beneficioso en función de los análisis de estabilidad realizados. Concluyendo que el sistema Vetiver para el aumento de las propiedades de resistencia del suelo es eficiente en términos de las condiciones analizadas.

ABSTRACT

In places where superficial erosion has place and subsequent processes of instability due to loss of soil resistance, reinforcement systems that focus to protect the superficial soil, improving the topsoil layer and using it as a reinforcement system.

The Vetiver system proposes a particular solution to this problem. Being systematically arranged on the side not only increases the surface vegetation cover but controls the surface erosion and improves conditions influencing slope stability.

This research focused on the study of the influence of roots in the soil shear strength following the Mohr Coulomb failure criteria. The results of shear strength testes show a clear increase in the strength properties of the soil and a beneficial effect; it's depending on the stability analysis performed. Concluding that Vetiver system to increase the strength properties of the soil is efficient in terms of the conditions analyzed.

INTRODUCCIÓN

Los taludes o laderas en condición natural son propensos a la erosión ya que están expuestos a los agentes naturales tales como el agua, el viento, sismo entre otros. Las consecuencias de la erosión a gran escala son impredecibles y pueden causar muertes. En la mayoría de los casos, la estabilidad del talud se ve afectada por la pendiente o inclinación del talud, geología, tectónica, morfología, meteorización, por cargas puntuales o distribuidas en la corona del talud, y la tasa de precipitación. Además de considerarse que las zonas con alta precipitación anual, como en el caso del clima tropical húmedo básicamente se enfrentan a procesos de inestabilidad de taludes. La alta intensidad de las precipitaciones conduce a la saturación del suelo y pendientes saturadas que vuelven inestable los taludes llevando a que el factor de seguridad sea por lo general menor de 1,0 (Van Beek et al. 2005). Entre los factores considerados como fuerzas resistentes contra la erosión y deslizamiento de suelos en laderas se tiene la resistencia a la tracción de la raíz, la resistencia al corte de la raíz, la fuerza de arranque, y la fuerza compuesta que es la generada por el suelo y la raíz (Abe & Iwamoto 1986). Para prevenir o mejorar las causa de los efectos negativos que conllevan la inestabilidad de taludes se han venido utilizando métodos convencionales en el manejo y la restauración de la estabilidad de taludes, tales como: Terraceo de la superficie, inyecciones o uso de químicos, anclajes o pernos, pantallas ancladas, pilotes, muros de contención convencionales, de tierra armada entre otros estos a menudo se utilizan para resolver los problemas expuestos. Sin embargo, el uso de la vegetación en la restauración de la estabilidad de las laderas ha ganado el interes de muchos investigadores que reconocen el potencial y las ventajas de la vegetación en el mantenimiento de la estabilidad de taludes (Mitsch 1998) a largo plazo. Por otra parte, se ha aceptado como una solución de bajo costo, especialmente en las zonas tropicales húmedas (Collison et al., 1995).

Según los resultados obtenidos en este estudio se evidencia que el sistema vetiver refuerza mecánicamente el suelo mediante la transferencia de la resistencia al corte debido al aumento presente en los parámetros de la cohesión y fricción como consecuencia a la alta resistencia a la tensión que poseen las raíces. Además, el número y el tamaño de las raíces que atraviesan la superficie de deslizamiento son extremadamente importantes. Ya que la resistencia a la tracción disminuye con el aumento de diámetro de la raíz, lo que implica que el diámetro de la raíz más fino contribuye a la mayor resistencia a la tracción.

Este efecto combinado de suelo y las raíces, producen un material compuesto en el que las raíces son fibras con una alta resistencia a la tracción y la adherencia embebidas en una matriz de masa de suelo dando como resultando un suelo reforzado. Por lo tanto, es la resistencia a la tracción de las raíces la que

contribuye a la resistencia global del material compuesto de la raíz y del suelo. A pesar de que existen algunos estudios y recomendaciones sobre los efectos de las raíces, hay una falta de documentación disponible sobre las propiedades mecánicas de la raíz del pasto Vetiver en los suelos de las laderas colombianas, por tal motivo fue pertinente conocer de forma cuantitativa el efecto de la aplicación de la bioingeniería utilizando el sistema vetiver en los suelos de dichas laderas.

Esta investigación tuvo como objetivo estudiar y evaluar la influencia del sistema Vetiver en la resistencia al corte en muestras de suelo de ladera, analizar las propiedades geomecánicas en función de las características típicas de las muestras y simular dicho comportamiento con modelos de equilibrio límite para la obtención del valor del factor de seguridad en los suelos de laderas de la vía que comunica a Neiva con Vegalarga departamento del Huila; de esta zona se extrajeron muestras inalteradas que fueron ensayadas en el laboratorio. En donde se reconoció que el efecto del refuerzo de la raíz depende de las características morfológicas del sistema radicular, la resistencia a la tracción de las raíces individuales, la fuerza de cohesión del suelo por efecto de la raíz, y la distribución de raíces en el suelo del sistema vetiver.

En la práctica, la escasez de datos y enfoques analíticos y sistemáticos para aplicar la bioingeniería para fines de reforzamiento del suelo en laderas conduce a una consistente tendencia a favorecer medidas estructurales que tienen poco o nada de los valores ecológicos, a diferencia de los efectos que tiene el sistema vetiver utilizado en este proyecto.

El Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*), es una planta de la familia de las gramíneas, nativa de la India. Sus tallos erguidos alcanzan una altura de 0,5 a 1,5 m La hojas son relativamente rígidas, largas y angostas y tienen hasta 75 cm de largo y no más de 8 mm de ancho.

Esta planta crece con facilidad en distintos tipos de suelo, ya sean arenosos, arcillosos o incluso en zonas donde la capa vegetal es escasa. Siendo resistente a diferentes condiciones climáticas, inundaciones e incluso agentes contaminantes.

Una de las mayores virtudes del Vetiver son sus raíces, estas crecen verticalmente y su afectación en área se limita a menos de un metro de diámetro alrededor de la planta. Las raíces pueden llegar a alcanzar longitudes de 5 metros, generando una barrera en el subsuelo. El crecimiento de las raíces de la planta es bastante acelerado en comparación con el de otras plantas, en el primer año alcanza una profundidad de 4 metros debido a estas características, el Vetiver se ha utilizado para mejorar las condiciones de las laderas con resultados satisfactorios en muchos casos.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los problemas de remoción en masa y deslizamientos en suelos de laderas que conforman los taludes viales, vienen ocasionando en época invernal serios problemas de movilidad de las mercancías y productos agropecuarios en la vía que comunica la ciudad de Neiva con el municipio de Vegalarga (Huila), afectando la economía de la región y poniendo en riesgo la vida de quienes transitan en éste tramo de aproximadamente 70 kilómetros de recorrido. Este hecho es potenciado por la baja resistencia al corte de los suelos sin coberturas y expuestos a la erosión causada por el impacto y salpicadura generada por el agua proveniente de las precipitaciones, trayendo como consecuencia la degradación y lavado de manera acelerada de los materiales que se encuentran en la superficie de los taludes, especialmente durante los dos periodos invernales de Abril y Noviembre que caracterizan la zona, y que afectan la economía local, departamental y regional; ésta situación recurrente requiere la intervención técnica de especialistas de la Ingeniería Civil con profundización en la geotecnia para que implementen medidas apropiadas no tradicionales y conservacionistas como es el uso de la técnica pasto Vetiver, técnica de bioingeniería económicamente viable y que demandan a su vez el uso de mano de obra local en su establecimiento.

La situación descrita anteriormente ha traído efectos negativos en la vía Neiva-Vegalarga sobre suelos de ladera, donde se han producido cortes para la apertura de carreteras, debiendo implementarse medidas temporales que incrementan los costos de mantenimiento de las mismas.

Por consiguiente, éste problema genera las siguientes preguntas a las que se les dará respuesta a lo largo de esta investigación:

¿Puede el pasto Vetiver contribuir al aumento de la resistencia al corte en los suelos de taludes viales y evitar el desarrollo de problemas de mayor consideración?

¿Cuál es la ganancia de la resistencia al corte en suelos de taludes protegidos con cobertura de pasto Vetiver con periodos vegetativos de uno, dos y tres años?

¿El pasto Vetiver se podría considerar como una alternativa económica, ecológica y socialmente viable para el control de erosión en suelos de taludes viales?

¿Los resultados de los análisis de estabilidad y sus factores de seguridad, así como la resistencia al cizallamiento del suelo podrían demostrar la ganancia de resistencia ofrecida por las raíces de vetiver y así verificar que el vetiver es una técnica eficaz de estabilización de taludes?

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la resistencia al corte de los suelos en laderas cubiertos con pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides* en la vía Neiva-Vegalarga departamento del Huila.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las características mecánicas del suelo en taludes cubiertos con pasto Vetiver y sin pasto Vetiver.
- Estudiar la ganancia de la resistencia al corte con el establecimiento de pasto Vetiver como cobertura vegetal en el control de taludes mediante el ensayo de corte directo.
- Realizar modelos de comportamientos o simulaciones en taludes, con el objetivo de dar una visión general de la estabilidad mediante el empleo del método de equilibrio límite de la comprobación de pendiente infinita así como los factores de seguridad de taludes simulados.
- Determinar los resultados de los factores de seguridad, así como la resistencia al cizallamiento del suelo al ser comparados los resultados de los ensayos sobre muestras de suelo sin pasto y con pasto Vetiver cuantificar la ganancia de resistencia al corte ofrecido por las raíces y así verificar que el vetiver es una técnica eficaz estabilización de taludes.

3. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de la bioingeniería en la protección de taludes con el uso de coberturas vegetales vienen siendo utilizadas como una alternativa natural viable económicamente y estable ambientalmente para restaurar el suelo, controlar la erosión y estabilizar laderas; la popularidad que viene ganando esta técnica se demuestra por su aumento significativo en las últimas décadas, por presentar un menor costo en comparación con otros métodos de estabilización de taludes, exigencias técnicas relativamente simples para la instalación y mantenimiento de las áreas intervenidas y por guardar respeto por el medio ambiente.

La aplicación de coberturas vegetales en taludes de los sistemas viales, como acciones de mitigación y control de los procesos erosivos, al permitir ejercer aumento en la resistencia al corte de los suelos, lograr la interceptación de las precipitaciones por el follaje y reducir la erosión causada por la lluvia y la escorrentía, hacen del uso de las plantas una excelente alternativa para la estabilización de los suelos, al actuar sus raíces como un refuerzo natural que aumentan la resistencia al cizallamiento de los suelos.

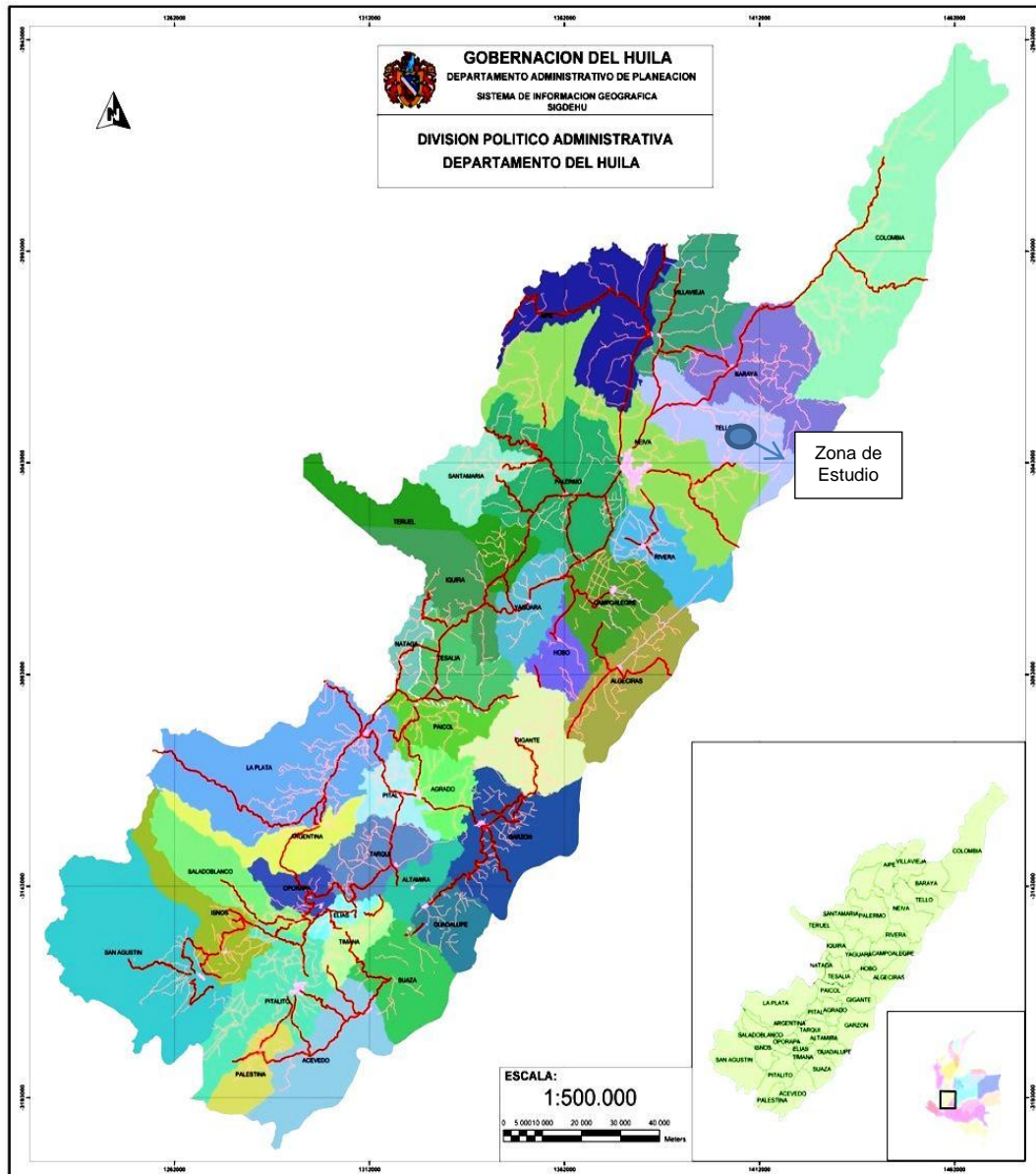
Estudios realizados en New Delhi por el Consejo de Investigación Científica e Industrial, han clasificado al pasto Vetiver como *Chrysopogon zizanioides*, resultando ser una planta eficiente en el control de la erosión de los suelos en los sitios en donde se han probado, al actuar esta como un refuerzo del suelo en la estabilización de taludes, sin embargo, se hace necesario evaluar el comportamiento de esta planta en otras latitudes y condiciones atmosféricas, sustentando sus análisis con mediciones cuantitativas y cualitativas.

4. MARCOS DE REFERENCIA

4.1. MARCO GEOGRÁFICO

La vía objeto de estudio se encuentra localizada en el departamento del Huila, situado en la Región Andina de Colombia:

Figura 1 División Política del Huila



Fuente: Gobernación del Huila.

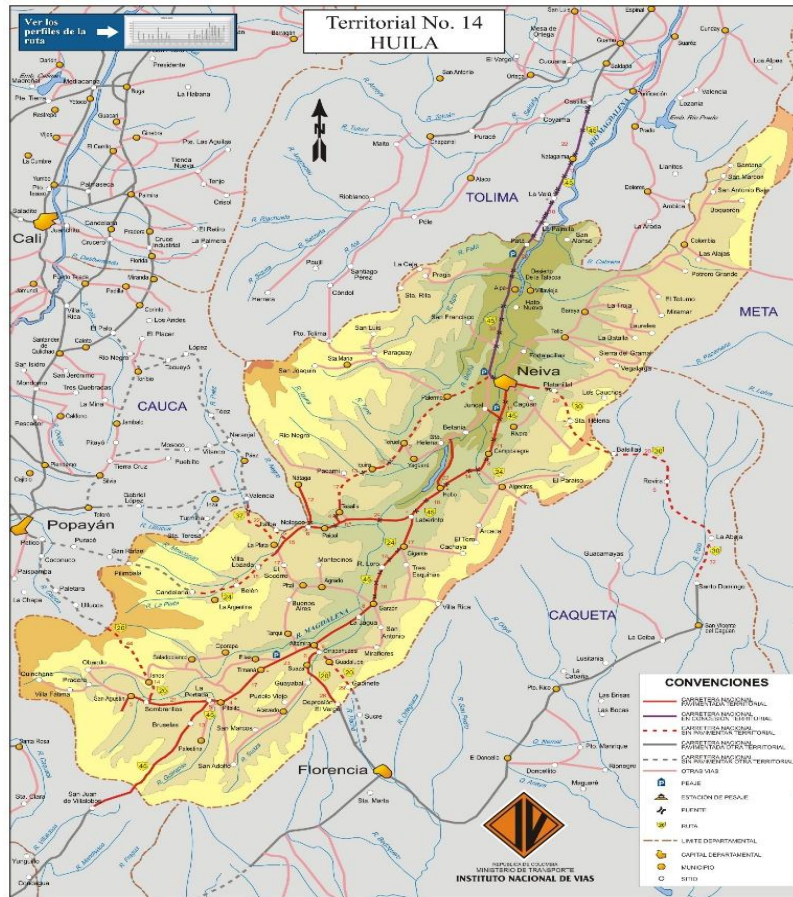
El Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC-, presenta la siguiente información:

Tabla 1 Datos Generales del Departamento del Huila

| | |
|--------------|--|
| Población: | 1'011.418 habitantes |
| Superficie: | 19.890km ² |
| Capital: | Neiva |
| Municipios: | 37 |
| Límites: | Por el norte con los departamentos de Tolima y Cundinamarca, por el oriente con Meta y Caquetá, por el sur con Caquetá y Cauca y por el occidente con Cauca y Tolima |
| Hidrografía: | Los principales ríos son: Cabrera, Fortalecillas, Páez, Villavieja, Magdalena, La Plata; y la laguna del Magdalena. |
| Clima: | Se encuentra en los pisos térmicos templado (39,6%), frío (32,5%), cálido (18.4%), muy frío a extremadamente frío (9.4%) y nival (0,1%) |

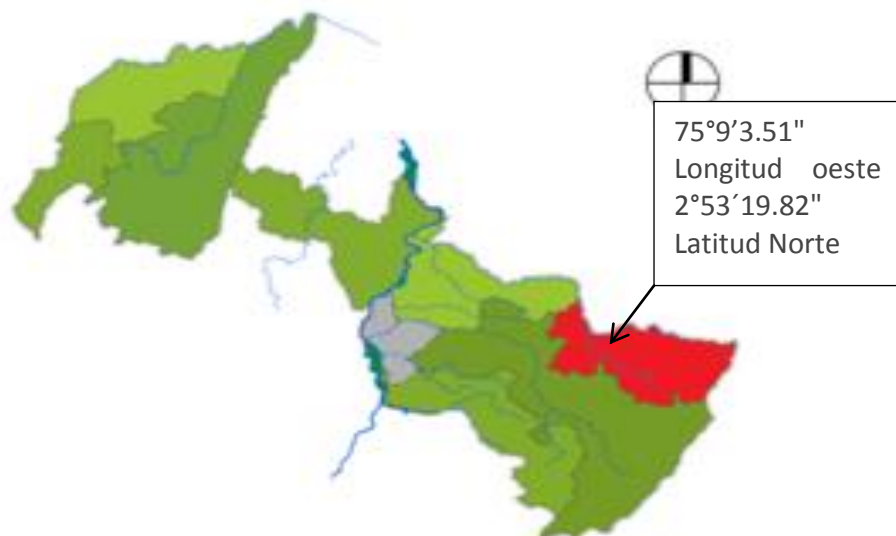
Fuente: IGAC, (p. 501), Sociedad Geográfica de Colombia, 2007, DANE, Censo General, 2005.

Figura 2 Infraestructura vial del departamento del Huila



Fuente: Instituto nacional de INVIAS.

Figura 3 Corregimiento de Vegalarga en el Municipio de Neiva



Fuente: Alcaldía de Neiva

Vegalarga es un corregimiento del municipio de Neiva. Limita al norte con el municipio de Tello, al oeste con el corregimiento de Fortalecillas, al sur con el corregimiento de Río de las Ceibas, y al este con el Departamento de Caquetá. Es un corregimiento que ha sido golpeado por el conflicto armado en Colombia¹. El corregimiento Vegalarga se divide en 10 veredas²:

Tabla 2 Veredas del Corregimiento de Vegalarga

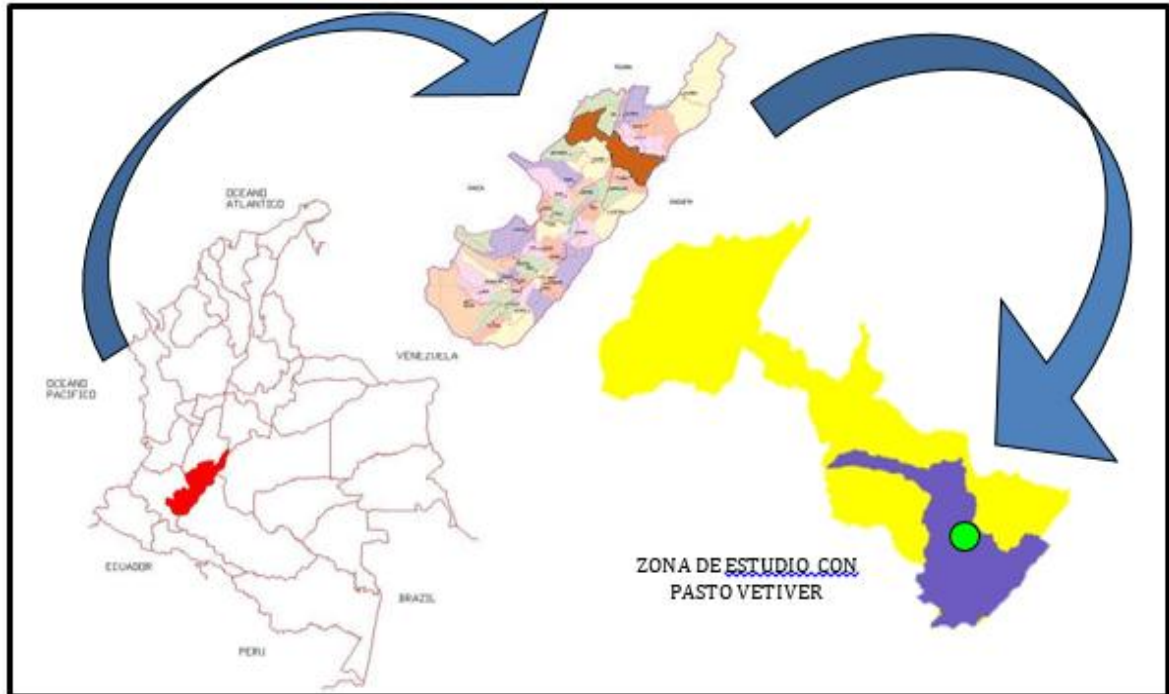
| VEREDA | SECTOR |
|---------------|-----------|
| Cedral | |
| Ahuyamales | Tabor |
| Piedramarcada | Yucales |
| Vegalarga | |
| Colegio | |
| San Antonio | Las Pavas |
| Santa Lucía | |
| Santa Librada | El Roblal |
| Palacios | |
| San José | La Espiga |

Fuente: Alcaldía de Neiva.

¹ EL TIEMPO

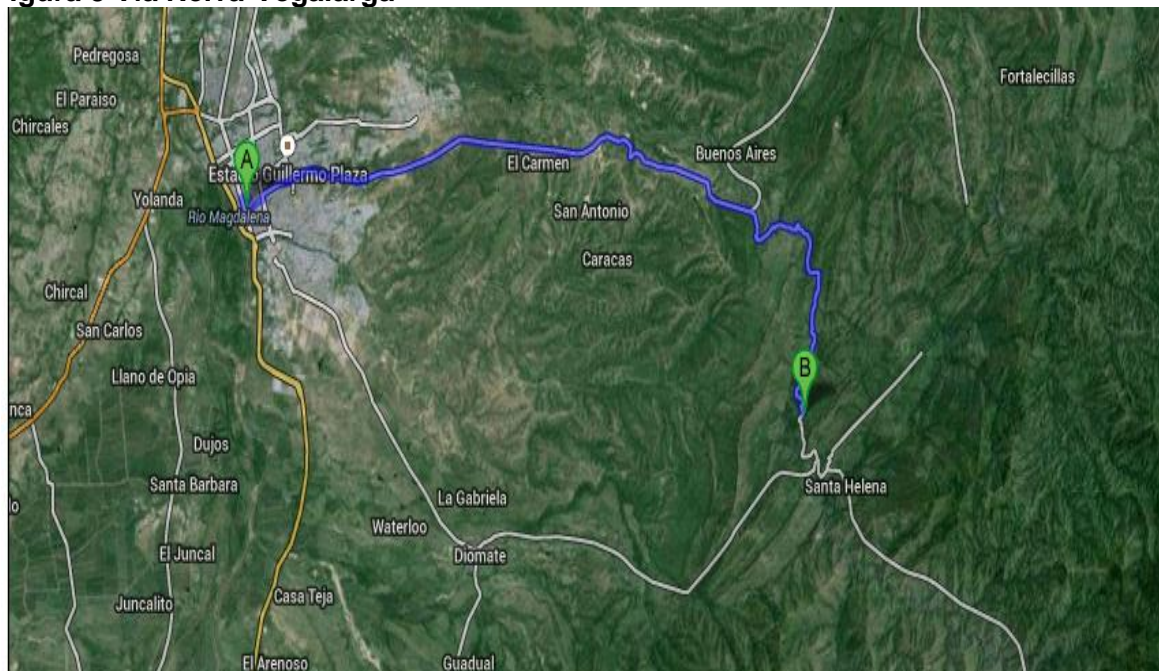
² ALCALDÍA DE NEIVA. Acuerdo 026 de 2009, por el cual se revisa y ajusta el Acuerdo 016 de 2000 que adopta el Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Neiva. Publicado el 15 de abril de 2011- [En línea] [http://es.wikipedia.org/wiki/Vegalarga.\(Neiva\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Vegalarga.(Neiva)).

Figura 4 Ubicación geográfica de la zona de estudio



Fuente: (Bermúdez y otros, 2012, p. 46).

Figura 5 Vía Neiva-Vegalarga



Fuente: Google Earth.

4.2. MARCO TEÓRICO

4.2.1 Descripción del pasto vetiver.

El *Chrysopogon zizanioides*, conocido en el mundo como pasto Vetiver, es una planta perenne nativa de la India, perteneciente a la familia de las gramíneas. El nombre de vetiver es originario del idioma tamil, se encuentran registros en la literatura tamil de usos del pasto Vetiver con propósitos medicinales.

Esta planta presenta alta adaptabilidad a diferentes tipos de suelos y climas, además posee numerosas características que la convierten en una valiosa alternativa en muchas partes del mundo, para la conservación de los suelos, el tratamiento de aguas, la protección y la estabilización de infraestructura, la prevención de desastres naturales por deslizamientos, la restauración y la protección del ambiente, la retención de la humedad del suelo, la biorremediación y la bioingeniería, los forrajes para animales, la agroforestería, el uso medicinal, la fabricación de artesanía y como fuente energética.

Existen cerca de 10 especies de gramíneas comunes de la Tribu Antropogoneae que se encuentran en las regiones tropicales del mundo y que pertenecen a la familia Gramínea, subfamilia Panicoideae y dentro de estas el pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) ha demostrado ser la ideal para los usos antes mencionados (Ver Tabla 1).

Tabla 3 Clasificación Científica Del pasto Vetiver

| CLASIFICACIÓN CIENTÍFICA | |
|--------------------------|---------------------------------------|
| Reino: | <u>Plantae</u> |
| División: | <u>Magnoliophyta</u> |
| Clase: | <u>Liliopsida</u> |
| Subclase: | <u>Liliidae</u> |
| Orden: | <u>Poales</u> |
| Familia: | <u>Poaceae</u> |
| Subfamilia: | <u>Panicoideae</u> |
| Tribu: | <u>Andropogoneae</u> |
| Subtribu: | <u>Andropogoninae</u> |
| Género: | <u>Vetiveria</u> |
| Especie: | <u><i>Chrysopogon zizanioides</i></u> |
| Nombre binomial | |
| | <u><i>Chrysopogon zizanioides</i></u> |

Fuente: Autor.

Dicha planta, es parecida a la hierba luisa de tupidos penachos, con inflorescencia y semillas estériles que no permiten su reproducción sexualmente, sino que se hace necesario una reproducción sexual mediante el corte y siembra de un rizoma

radicular o haces enraizados. La planta crece en grandes macollas a partir de una masa radicular muy ramificada y esponjosa.

En Australia, los tallos erguidos del pasto Vetiver en forma recta alcanzan una altura que oscila entre 0,50 m a 1,50 m. Las hojas son relativamente rígidas, largas y angostas y tienen hasta 0,75 m de largo y no más de 8 mm de ancho. Las raíces han alcanzado hasta 3.00 m de longitud. La panícula, en donde se desarrolla la inflorescencia, tiene entre 0,15 m a 0.40 m de largo (Orihuela & Barriga, 2007).

La planta ha demostrado que se desarrolla con facilidad en suelos margosos, arenosos y profundos; pero también crece en suelos con altos niveles de contaminación, además, aguanta inundaciones por largos periodos (3 meses o más) después de estar bien establecida. También crece bien en suelos poco profundo. Terranova (citado por BERMUDEZ, 2012).

La planta puede soportar sequías extremas, debido a su alto contenido de sales en la savia de sus hojas, así como inundaciones por largos periodos.

Con un manejo adecuado, la planta aguanta las sequías extremas, pero normalmente requiere una época de lluvias que dure por lo menos de 3 meses, sin embargo, la condición ideal es cuando las lluvias caen regularmente durante el año y crece mejor bajo condiciones húmedas, pero también se comporta bien bajo condiciones de poca humedad.

Crece en un rango amplio de suelos y con diferentes niveles de fertilidad y puede resistir temperaturas desde -15° a más de 44° C y desde alturas que oscilan desde el nivel del mar hasta los 2.500 m.s.n.m., aunque en algunos sitios del Perú se han plantado hasta los 3.500 m.s.n.m., pero todavía se encuentran en fase de evaluación. Para obtener buen desarrollo, es preferible que se encuentre directamente en contacto con la luz del sol, pero soporta hasta un 30% de sombra (Orihuela & Barriga, 2007).

Las raíces del vetiver, son una de sus mayores virtudes, generalmente crecen verticalmente y no compite con los cultivos adyacentes. En buenas condiciones de suelos, las raíces de la planta en doce meses pueden crecer hasta una profundidad de 4.00 m, y bajo la superficie del suelo se forma una barrera de suelo reforzado, resistente a la erosión. Terranova (citado por Bermúdez, 2012).

Es importante reseñar que el vetiver crece "desde la base", haciéndolo muy resistente a posibles daños al recuperarse muy rápidamente y formándose una barrera bajo la superficie del suelo, razón por la cual se utiliza para estabilizar los bordes de los caminos e impedir totalmente la erosión durante años.

El pasto vetiver es una planta con un sistema fotosintético tipo C4, con fotosíntesis modificada respecto a las plantas más comunes C3, es importante

anotar que más de un 90% de especies de plantas presentes en el planeta pertenece a la clase C3. En la fotosíntesis de las plantas C3, el CO₂ se incorpora en una combinación de tres átomos de carbono. Las plantas C4 como el Vetiver presentan una fotosíntesis modificada donde el CO₂ está incorporado en una combinación de cuatro átomos de carbono, por lo que las C4 son mucho más eficientes que las tradicionales C3 en el proceso fotosintético, debido a que absorben un 30% más de CO₂ de la atmósfera. En las plantas C3 se produce la respiración y la foto-respiración que puede reducir en un 50% la fotosíntesis y la fotosíntesis se neutraliza con temperatura y luminosidad muy alta.

Las plantas C4, son más eficaces en el proceso fotosintético debido a: la ausencia de fotorespiración, pérdida de agua insignificante, gran resistencia a los climas áridos, elevada tolerancia a la salinidad de los suelos, rápido crecimiento en situaciones prohibitivas para C3 y la fotosíntesis no se neutraliza con temperatura y luminosidad elevada (Truong, P. N, 2001).

Dentro de los principales atributos del vetiver en su comportamiento con el agua se tienen:

- Es una planta nativa de un ambiente higroscópico (humedales, lagunas y pantanos) y es extremadamente tolerante a sequías e a inundaciones, incluso bajo y condiciones sumergidas.

- Es efectiva para el control de la erosión de los suelos, al tener una alta capacidad de retención del suelo y absorción de agua contenida en el mismo.

- Tiene excelentes características biológicas para la reducción de la contaminación de las aguas residuales y mitigación de la polución por su capacidad de absorber y tolerar altos niveles de minerales pesados. La absorción de altos niveles de contaminantes o metales pesados es un proceso en que la planta los almacena.

- Puede reducir las altas cargas de nutrientes presentes en los cuerpos de aguas que son tóxicas para los cultivos y pueden usarse para irrigación una vez sean tratadas con esta planta.

4.2.2 Características especiales de la planta de vetiver.

4.2.2.1 Características morfológicas.

- La planta de vetiver no tiene estolones ni rizomas funcionales. Su sistema de raíces finas y compactas crece muy rápido, en algunas aplicaciones puede alcanzar entre 3 y 4 m de profundidad en el primer año. Este profundo sistema de raíces hace que la planta de vetiver sea extremadamente tolerante a las sequías y difícil de arrancar por fuertes corrientes.

- Tallos firmes y erguidos, que pueden soportar flujos de agua relativamente profundos.
- Muy resistente a plagas, enfermedades y al fuego.
- Forma una barrera densa cuando es plantado a corta distancia actuando como un filtro muy efectivo de los sedimentos y como un dispersor del agua de escorrentía.
- Nuevos brotes se forman desde la corona subterránea haciendo al vetiver resistente al fuego, heladas, tráfico y alta presión de pastoreo.
- Cuando es enterrado por los sedimentos atrapados, crecen nuevas raíces desde los nudos. El vetiver continuará creciendo hacia arriba con los sedimentos depositados formando eventualmente terrazas, si el sedimento atrapado no es removido.

4.2.2.2 Características fisiológicas.

- Tolerancia a variaciones climáticas extremas como sequía prolongada, inundaciones, sumersión y temperaturas extremas de -15°C a +55°C.
- Habilidad para rebrotar rápidamente después de haber sido afectado por sequías, heladas, salinidad y otras condiciones adversas al mejorar las condiciones del tiempo o se añadan correctivos al suelo.
- Tolerancia a un amplio rango de pH desde 3.3 a 12.5 sin enmiendas del suelo.
- Alto nivel de tolerancia a herbicidas y plaguicidas.
- Alta eficiencia en absorber nutrientes tales como N y P y metales pesados en aguas contaminadas.
- Muy tolerante a medios de crecimiento altos en acidez, alcalinidad, salinidad, o ricos en sodio y Mg.
- Alta tolerancia al Al, Mn y metales pesados tales como As, Cd, Cr, Ni, Pb, Hg, Se y Zn en los suelos.

4.2.2.3 Características ecológicas.

Aunque el vetiver es muy tolerante a ciertas condiciones extremas de suelo y clima mencionadas arriba, como pasto tropical es muy intolerante a la sombra. La sombra reduce su crecimiento y en casos extremos, puede incluso eliminar el vetiver en el largo plazo. Por lo tanto el vetiver crece mejor en espacios abiertos y

libres de malezas, siendo necesario el control de malezas en la etapa de establecimiento. En terrenos erosionables e inestables el vetiver primero reduce la erosión, estabiliza el terreno, luego debido a la conservación de humedad y nutrientes, mejora el microambiente y otras especies espontáneas o cultivadas, pueden establecerse. Debido a esto se considera al vetiver una planta nodriza en tierras degradadas.

4.2.2.4 Tolerancia de la planta de vetiver al frío.

Aunque el Vetiver es una planta que soporta las altas temperatura del sol, puede sobrevivir y desarrollarse en condiciones de frío extremo. Bajo condiciones de escarcha o helada su parte aérea muere o entra en latencia y se torna color púrpura pero sus puntos de crecimientos subterráneos sobreviven. En Australia, el vetiver no se afectó por una severa helada a -14°C y sobrevivió por un corto período a -22°C en el norte de China. En Georgia (EEUU), el vetiver sobrevivió a una temperatura del suelo de -10°C pero no resistió a -15°C . Recientes estudios demuestran que el crecimiento óptimo de raíces se presenta a temperaturas del suelo de 25°C , pero las raíces continúan creciendo hasta 13°C . Aunque un crecimiento muy pequeño ocurre a temperaturas del suelo en el rango entre 15°C (día) y 13°C el crecimiento de la raíz continúa a una velocidad de 12.6cm/día, indicando que el pasto vetiver no entra en latencia a esta temperatura y por extrapolación se estima que la latencia ocurre a 5°C .

4.2.2.5 Resumen del rango de adaptabilidad.

Un resumen del rango de adaptabilidad de la planta de vetiver se muestra en el cuadro.

Tabla 4 Rango de adaptabilidad de la planta de vetiver en Australia y en otros países.

| Característica o Condición | Australia | Otros países |
|--|------------------------------|--|
| Condiciones de suelo adversas | | |
| Acidez (pH) | 3,3-9,5 | 4,2-12,5 (altos niveles de Al soluble) |
| Salinidad (50% reducción rendimientos) | 17,5 mScm ⁻¹ | |
| Salinidad (sobrevivió) | 4755 mScm ⁻¹ | |
| Nivel de saturación con Aluminio (Sat. Al %) | Entre 68% - 87% | |
| Nivel de Manganeso > 578 mgkg ⁻¹ | > 578 mgkg ⁻¹ | |
| Sodicidad | 48%(Na intercambiable) | |
| Magnesicidad | 2400 mgkg ⁻¹ (Mg) | |
| Fertilizante | | |
| El vetiver se puede establecer en suelos de baja fertilidad debido a su fuerte asociación con micorrizas | N y P (300 kg/ha FDA) | N y P, estiércol de granja |
| Metales pesados | | |
| Arsénico (As) | 100 - 250 mgkg ⁻¹ | |
| Cadmio (Cd) | 20 mgkg ⁻¹ | |

| Característica o Condición | Australia | Otros países |
|------------------------------------|---|---|
| Cobre (Cu) | 35 - 50 mgkg-1 | |
| Cromo (Cr) | 200 - 600 mgkg-1 | |
| Níquel (Ni) | 50 - 100 mgkg-1 | |
| Mercurio (Hg) | > 6 mgkg-1 | |
| Plomo (Pb) | > 1500 mgkg-1 | |
| Selenio (Se) | > 74 mgkg-1 | |
| Zinc (Zn) | >750 mgkg-1 | |
| Localidad | 15° S to 37° S | 41° N – 38° S |
| Clima | | |
| Precipitación anual (mm) | 450 - 4000 | 250 - 5000 |
| Heladas (temperatura del suelo) | -11°C | -22°C |
| Olas de calor | 55°C | 55°C |
| Sequía (precipitación no efectiva) | 15 meses | |
| Palatabilidad | Vacas lecheras, ganado, caballos, conejos, ovejas | Vacas, ganado, ovejas, cerdos, carpas |
| Valor nutricional | N = 1,1 % P = 0,17% K = 2,2% | Proteína cruda 3,3% Grasa cruda 0,4% Fibra cruda 7,1% |

Fuente: Fuente: Banco Mundial.

4.2.2.6 Características genéticas.

Son utilizadas dos especies de vetiver con propósitos de protección ambiental.

✓ *Chrysopogon zizanioides*

Existen dos especies de vetiver que se originaron en el subcontinente de la India: *Chrysopogon zizanioides* y *Chrysopogon lawsonii*. *Chrysopogon zizanioides* posee muchas accesiones. Generalmente las provenientes del sur de India han sido cultivadas y tienen un sistema de raíces largo y fuerte. Estas accesiones tienden a la poliploidía y muestran un alto nivel de esterilidad y no se consideran. Las accesiones del norte de India, comunes en las cuencas de los ríos Ganges e Indo, son silvestres y tienen un sistema de raíces débil. Estas accesiones son diploides y son conocidas por ser malezas invasoras, aunque no necesariamente invasoras. Las accesiones del norte de la India no se recomiendan bajo el sistema Vetiver. Debe resaltarse que la mayoría de la investigación con diferentes aplicaciones del vetiver y las experiencias de campo ha sido realizada con los cultivos del sur de la India y que están estrechamente relacionados (mismo genotipo) como lo son el Monto y el Sunshine.

Estudios del ADN confirman que cerca del 60% del *Chrysopogon zizanioides* utilizado para bioingeniería y fitorremediación en países tropicales y subtropicales son del genotipo Monto/Sunshine.

✓ ***Chrysopogon nemoralis***

Estas especies nativas se distribuyen ampliamente en las tierras bien drenadas de Tailandia, Laos, y Vietnam y muy probablemente en Camboya y Myanmar. Es muy utilizado en Tailandia para hacer techados. Esta especie no es estéril, la principal diferencia entre *C. nemoralis* y *C. zizanioides*, es que esta última es más alta y tiene tallos más firmes y gruesos, *C. zizanioides* tiene un sistema de raíces más grueso y profundo y sus hojas son más anchas y poseen un área verde claro a lo largo de las estrías de la hoja, como se muestra en la Foto 1 y Foto 2.

Foto 1 Hojas de Vetiver, izquierda: *C. zizanioides*, derecha: *C. nemoralis*



Foto 2 Brotes de Vetiver, izquierda: *C. zizanioides*, derecha: *C. nemoralis*



Foto 3 Diferencias entre las raíces de *C. zizanioides* (arriba) y *C. nemoralis* (abajo)



Aunque *C. nemoralis* no es tan efectivo como *C. zizanioides*, los agricultores han reconocido también la utilidad de *C. nemoralis* en la conservación de suelos; por tanto lo han usado en las planicies centrales así como en provincias de la costa de Vietnam Central tales como Quang Ngai para estabilizar diques en campos de arroz.

En conclusión debido al poco crecimiento de *C. nemoralis* y más importante, debido a su pequeño sistema de raíces, este no es apto para los trabajos de estabilización en taludes inclinados. Adicionalmente, no se han desarrollado investigaciones en esta especie sobre la disposición y el tratamiento de aguas residuales, o sobre su capacidad de fitorremediación por lo cual se recomienda utilizar solamente *C. zizanioides* para las aplicaciones y usos indicados en este documento.

4.2.3 Métodos para propagar el vetiver.

Debido a que las principales aplicaciones requieren un gran número de plantas, la calidad del material de siembra es importante para una exitosa aplicación del Sistema Vetiver. Para ello se requieren viveros capaces de producir grandes cantidades de plantas de alta calidad y de bajo precio. El uso exclusivo de cultivos estériles únicamente (*C. zizanioides*) evitará la aparición de plantas de vetiver estableciéndose en un ambiente nuevo.

Pruebas de ADN han probado que los cultivos estériles usados alrededor del mundo son genéticamente similares a los cultivos Monto y Sunshine, ambos originados en el sur de la India. Debido a su esterilidad, estos deben propagarse vegetativamente.

4.2.3.1 Viveros de vetiver.

Los viveros proveen material para la propagación vegetativa o el cultivo de tejidos de plantas de vetiver. Los siguientes criterios deben facilitar el establecimiento de viveros productivos y fáciles de manejar:

- **Tipo de suelo:** Camas de propagación franco arenosas aseguran cosechas más fáciles y menores daños a las raíces y corona de las plantas. Franco arcillosas serían aceptables, pero arcillosas no.

- **Topografía:** Terrenos ligeramente inclinados evitan el encharcamiento en caso de excesos de agua.

Sitios planos son aceptables pero debe controlarse el drenaje ya que el encharcamiento puede afectar a las plantas muy jóvenes aunque las adultas toleran las condiciones de saturación.

- **Sombra:** Se recomiendan espacios abiertos, ya que la sombra afecta el desarrollo del vetiver. La sombra parcial es aceptable. El vetiver es una planta C4 y requiere mucho sol.

- **Trazado de la plantación:** El Vetiver debe ser plantado en hileras largas y ordenadas en contorno para facilitar la cosecha.

- **Método de cosecha:** La cosecha de plantas maduras puede ser realizada manual o mecánicamente. Un implemento debe cortar las raíces de plantas maduras a 20-25cm (8-10”) por debajo de la superficie.

Para evitar daños a la corona usar arados de vertedera o de disco con ajustes especiales.

- **Método de riego:** El riego por aspersión distribuye el agua uniformemente en los primeros meses de la plantación. Las plantas más maduras pueden regarse por inundación.

- **Entrenamiento del personal de operaciones:** Personal entrenado es esencial para el éxito.

- **Plantación mecánica:** Una sembradora modificada o una transplantadora mecánica puede sembrar grandes cantidades de hijos en el vivero.

- **Disponibilidad de maquinaria en el vivero:** Se requiere de maquinaria agrícola básica para la preparación del terreno, las camas de siembra, control de malezas, corte y cosecha de las plantas.

Foto 4 Izquierda: Siembra mecanizada; derecha: siembra manual



4.2.3.2 Métodos de propagación.

Las cuatro maneras de propagar vetiver son:

- Separando brotes maduros de la macolla de vetiver o plantas madre, obteniendo hijos (“esquejes”) a raíz desnuda para ser plantados de forma inmediata en el campo o en contenedores.
- Usando varias partes de las plantas madre de vetiver.
- Multiplicación de yemas o micropropagación in vitro para propagación a gran escala.
- Cultivo de tejido, usando una pequeña parte de la planta para propagación a gran escala.

• Separación de plantas para producir hijos (“esquejes”) a raíz desnuda

La separación de brotes de una macolla madre requiere cuidado, de manera que cada hijo incluya al menos dos a tres brotes y una parte de la corona. Después de la separación, los hijos deben ser cortados de 20 cm (8”) de largo (Figura 6). Los hijos (“esquejes”) resultantes pueden ser sumergidos en varios tratamientos, incluyendo hormonas de enraizamiento, estiércol líquido, lodo de arcilla, o simplemente en recipientes llenos con agua.

Para acelerar el crecimiento mantener los hijos húmedos y a la luz hasta plantarlos- Foto 5.

• Propagación del vetiver de partes de la planta

Para la propagación del vetiver son usadas tres partes de la planta:

- Brotes o vástago.
- Corona (cormo), la parte dura de la planta entre las raíces y los brotes o vástago.
- Culmo, tallo o caña.

Figura 6 Como separar los hijos de vetiver



Foto 5 Hijos a raíz desnuda listos para plantar (izquierda); sumergidos en barro de arcilla o licuado de estiércol (derecha)



El culmo es el tallo o caña de un pasto. El tallo del vetiver es sólido, duro y firme; presenta nudos prominentes con yemas laterales que pueden formar raíces y brotes cuando son expuestos al humedecimiento. Cortes de tallos o cañas, acostados o parados, bajo neblina o en arena húmeda, promoverá el rápido desarrollo de raíces y brotes en cada nudo. Le Van Du, de la Universidad de Agroforestería en la ciudad de Ho Chi Minh, desarrolló los siguientes cuatro pasos de propagación de esquejes:

- Preparar los esquejes de vetiver o cortes de tallos.
- Asperjar los esquejes con una solución al 10% de jacinto de agua.
- Usar bolsas de plástico para cubrir los esquejes completamente y dejar por 24 horas.

- Sumergir en barro de arcilla o estiércol líquido, y plantar en una cama de propagación adecuada.

- ***Preparación de esquejes de vetiver***

Culmos o cañas de Vetiver.

Seleccionar cañas viejas, las cuales tienen más yemas y más nudos que las jóvenes. Hacer cortes de 30-50mm (1-2 pulgadas) de largo, incluyendo 10-20mm (4-8 pulgadas) debajo de los nudos, separando la cobertura de hojas viejas. Los nuevos brotes deben emerger una semana después de plantados.

Hijos de Vetiver (“esquejes”):

- Seleccionar hijos maduros con al menos tres a cuatro hojas bien desarrolladas.
- Separar los hijos cuidadosamente, y asegurarse de incluir la base y algunas raíces.

Corona o corno del Vetiver:

La corona (corno) es la base de las plantas maduras de vetiver de la cual emergen los nuevos brotes. Usar solo la parte superior de la corona madura.

Figura 7 Segmentos de culmos o cañas con nudos



✓ ***Preparación de la solución de jacinto de agua***

La solución de jacinto de agua contiene muchas hormonas y reguladores del crecimiento, incluyendo ácido giberélico y muchos componentes del ácido indolacético (AIA). Para preparar hormona de enraizamiento con jacinto de agua:

- Conseguir plantas de jacinto de agua en lagos y canales
- Poner las plantas en bolsas de plástico de 20 litros y cerrarlas amarrándolas.
- Dejar la bolsa por un mes hasta que el material vegetal se descomponga
- Deseche las partes sólidas y conserve solo la solución.
- Filtre la solución y manténgala en un lugar fresco hasta usarla.

✓ ***Ventajas de usar hijos a raíz desnuda y esquejes***

Ventajas:

- Una manera eficiente, económica y rápida de preparar material de propagación.
- Los menores volúmenes implican menores costos de transporte.
- Fácil de plantar a mano.
- Grandes cantidades pueden ser plantadas mecánicamente.

Desventajas:

- Vulnerable a la deshidratación y a las temperaturas extremas.
- Tiempo de almacenamiento limitado.
- Requiere ser plantado en suelo húmedo.
- Necesita de riego frecuente en las primeras semanas.
- Se recomienda en buenos sitios de vivero con acceso al agua de riego.

✓ ***Multiplicación de yemas o micropropagación***

El Dr. Le Van Be de la Universidad Can Tho, en la ciudad de Can Tho, Vietnam ha desarrollado un método sencillo y práctico para multiplicar yemas (Lê Van Bé et al, 2006). Su procedimiento consiste en cuatro etapas de micropropagación, todas en un medio líquido:

- Inducir el desarrollo de yemas laterales.
- Multiplicar los nuevos brotes.
- Promover el enraizamiento de los nuevos brotes.
- Promover el crecimiento en umbráculos o cobertores.

✓ ***Cultivo de tejido***

El cultivo de tejido es otra forma de propagar material de plantación de vetiver en grandes cantidades, usando tejidos especiales (punta de la raíz, flores jóvenes de la inflorescencia, tejidos de yemas de los nudos) de la planta de vetiver. El procedimiento es usado con frecuencia por la industria hortícola internacional.

Aunque los protocolos de laboratorios particulares varían, el cultivo de tejido involucra una pequeña porción de tejido en un medio especial bajo condiciones

asépticas, y plantando las microplantas obtenidas en medios apropiados hasta que se desarrollen completamente en pequeñas plantas. Más detalles se pueden consultar en Truong (2006).

4.2.4 Preparación del material de siembra.

Para incrementar las tasas de establecimiento en condiciones adversas, cuando las plantas producidas por los métodos mencionados o los hijos a raíz desnuda están listos, se pueden preparar para plantar en los sitios o terrenos planeados mediante:

- Bolsas de polietileno o tubetes.
- Plantación en bandas.

4.2.4.1 Bolsas de polietileno o tubetes.

Plántulas e hijos a raíz desnuda se plantan en pequeños potes o bolsas plásticas que contengan una mezcla mitad suelo y mitad compost o mezcla de sustrato y se dejan en los contenedores entre tres y seis semanas, dependiendo de las temperaturas. Cuando aparecen a lo menos tres brotes, las plantas están listas.

Foto 6 Hijos a raíz desnuda y material de contenedores (izquierda), y plantas en bolsas de polietileno listas para ser plantadas (derecha)



4.2.4.2 Plantación en bandas

La plantación en bandas es una modificación de las plantas en bolsas. En vez de usar bolsas individuales, los hijos o esquejes se plantan muy cerca en surcos recubiertos con plástico especialmente alineados. Este método ahorra trabajo al plantar en sitios difíciles como taludes muy inclinados, y goza de una alta tasa de sobrevivencia ya que las raíces se mantienen juntas.

Foto 7 Plantación en bandas (izq.) en contenedores y removidas de los contenedores (centro), y listas para la siembra (derecha)



Ventajas y desventajas de las bolsas de polietileno y de las plantas en bandas

Ventajas:

- Las plantas son fuertes y no son afectadas por la exposición a altas temperaturas y poca humedad.
- Menor frecuencia de riego después de plantadas.
- Establecimiento y desarrollo más rápido después de plantar.
- Las plantas pueden permanecer más tiempo en el sitio antes de sembrarse.
- Se recomiendan para condiciones adversas y hostiles.

Desventajas:

- Más costosas de producir.
- Se requiere un período de preparación más prolongado, de cuatro a cinco semanas o más.
- El transporte de grandes volúmenes y el mayor peso incrementa los costos.
- Incrementos en los costos de mantenimiento luego del despacho si no se plantan en una semana.

4.2.5 Ejemplos del sistema vetiver para la reducción de desastres naturales y la protección de infraestructura.

4.2.5.1 Tipos de desastres naturales que pueden ser reducidos mediante la aplicación del sistema vetiver (sv).

Además de la erosión, el Sistema Vetiver (SV) puede reducir e incluso eliminar muchos tipos de desastres naturales, incluyendo deslizamientos, coladas de barro,

inestabilidad de taludes de carreteras, y erosión (banco de río, canales, líneas costeras, diques, represas con taludes de tierra).

Cuando las rocas y los suelos se saturan debido a lluvias de gran intensidad, en muchas zonas montañosas de Vietnam ocurren deslizamientos y derrumbes (movimientos en masa). Son ejemplos representativos los deslizamientos, derrumbes e inundaciones súbitas ocurridas en el distrito Muong Lay, provincia Dien Bien (1996), y los deslizamientos en Hai Van Pass (1999) que interrumpieron el tráfico Norte-Sur por más de dos semanas y costó más de un millón US \$ para remediarlo. Los mayores deslizamientos en Vietnam, aquellos mayores a un millón de metros cúbicos (entre ellos el de Thiet Dinh Lake, distrito Hoai Nhon, provincia Binh Dinh, en las comunas de An Nghiêp y de An Linh, distrito Tuy An, provincia Phu Yen), han causado pérdidas de vidas humanas y daños a las propiedades.

Fallas en los bancos de río, diques y la erosión de las costas ocurren frecuentemente en todo Vietnam. Ejemplos típicos incluyen: erosión de banco de río en Phu Tho, Hanoi, y en diversas provincias centrales de Vietnam (incluyendo Thua Thien Hue, Quang Nam, Quang Ngai y Binh Dinh); erosión costera en el distrito Hai Hau, provincia Nam Dinh, y; erosión de banco de río y costera en el delta del Mekong. Aunque estos eventos desastrosos de inundaciones/tormentas ocurren usualmente en la temporada de lluvias, algunas veces la erosión de banco de río ocurre en la época seca, cuando el agua desciende a su nivel más bajo. Esto ha ocurrido en la villa Hau Vien, distrito Cam Lo, en la provincia de Quang Tri.

Los derrumbes y deslizamientos son más comunes en aquellas áreas donde las actividades humanas desempeñan un papel decisivo. Casi el 20 por ciento o 200 km (124 millas) de más de 1000 km (621 millas) de la sección Ha Tinh - Kon Tum de la autopista Ho Chi Minh es muy susceptible a movimientos en masa e inestabilidad en los taludes, debido principalmente a prácticas de construcción inadecuadas y a un problema subyacente de desconocer las condiciones geológicas desfavorables. Los deslizamientos recientes en las ciudades de Yen Bai, Lao Cai, y Bac Kan fueron seguidos por decisiones municipales para expandir el urbanismo permitiendo cortes en taludes de mayor pendiente.

Los grandes terremotos también han generado movimientos en masa en Vietnam, incluyendo el deslizamiento de 1983 en el distrito Tuan Giao, y en 2001 en la vía que va de la ciudad Dien Bien al distrito Lai Chaut.

Desde un punto de vista estrictamente económico, el costo de resolver estos problemas es alto, y el presupuesto del Estado para estos trabajos nunca es suficiente. Por ejemplo, el revestimiento de bancos de río normalmente tiene un costo entre 200,000 - 300,000 US \$/km, y a veces puede llegar a tanto como 700,000- \$1 millones US \$/km. El terraplén Tan Chau en el delta del Mekong Delta es un caso extremo que costó cerca de \$7 millones US \$/km. La protección de bancos de río sólo en la provincia Quang Binh se estima que requiere una

inversión de más de 20 millones US \$ pero el presupuesto anual es de solo 300,000 US \$.

La construcción de diques marinos cuesta entre 700,000 - 1,000,000 US \$/km, pero las secciones más costosas pueden tener costos superiores de 2,5 millones US \$/km, y no son poco comunes. Después de que la tormenta No. 7 en Septiembre de 2005 arrastró muchas secciones de dique mejoradas algunos gestores de diques concluyeron que incluso aquellas secciones protegidas con obras de ingeniería para soportar tormentas de nivel 9 eran demasiado débiles, y comenzaron a considerar seriamente la construcción de diques capaces de soportar tormentas de nivel 12 que costarían entre 7-10 millones US \$/km.

Las limitaciones presupuestarias siempre existen, lo que reduce las medidas de protección con estructuras rígidas a las secciones más críticas, nunca a todo lo largo del banco de río o de toda la línea costera. Este enfoque por bandas compensa los problemas.

Cada uno de estos eventos representa una falla en un talud o un movimiento en masa, siendo que el desplazamiento cuesta abajo de los detritos de roca y de los suelos es una respuesta a las fuerzas gravitacionales. Estos movimientos pueden ser muy lentos, casi imperceptibles, o devastadoramente rápidos y ocurrir en minutos. Son muchos los factores que afectan los desastres naturales de tipo climático, por lo que debemos entender las causas así como los principios básicos de la estabilización de pendientes o taludes. Esta información nos va a permitir emplear efectivamente los métodos de bioingeniería para reducir su impacto.

4.2.5.2 Principios generales de estabilidad de una pendiente y estabilización de pendientes.

Perfil de la pendiente.

Algunas pendientes son gradualmente curvas, y otras son extremadamente inclinadas. El perfil de una pendiente erosionada de forma natural depende principalmente del tipo de roca y suelo, el ángulo natural de reposo del suelo y del clima. Para las rocas/suelos resistentes al deslizamiento, especialmente en zonas áridas, la meteorización química es muy lenta comparada con la física. La cresta de la pendiente es ligeramente convexa a angular, la cara del escarpe es casi vertical, y se presenta una pendiente de detritos con un ángulo de reposo de 30-35° en la cual el material suelto de un tipo específico de suelo es estable. Las rocas/suelos no resistentes, especialmente en zonas húmedas, se meteorizan rápidamente y se erosionan fácilmente. La pendiente resultante posee una capa gruesa de suelo. La cresta es convexa y la base es cóncava.

Estabilidad de la pendiente

✓ *Pendientes naturales, taludes de corte, taludes de carretera, etc.*

La estabilidad de tales pendientes se basa en el equilibrio entre dos fuerzas, las fuerzas motoras y las fuerzas de resistencia. Las fuerzas motoras promueven los movimientos pendiente abajo y las fuerzas de resistencia lo impiden. Cuando las fuerzas motoras superan las fuerzas de resistencia, la pendiente se hace inestable³.

✓ *Fuerzas motoras.*

Aunque la gravedad es la principal fuerza motora, esta no actúa sola. El ángulo de la pendiente, el ángulo de reposo del suelo particular, el clima, el material de la pendiente, y especialmente el agua, contribuyen en su efecto:

- Las fallas ocurren más frecuentemente en pendientes muy inclinadas que en las menos inclinadas.
- El agua ejerce un papel clave en producir una falla a las pendientes, en particular en la base:
 - En el flujo de ríos o por acción de las olas, el agua erosiona la base de las pendientes, removiendo el apoyo, lo que incrementa las fuerzas motoras.
 - El agua también incrementa las fuerzas motoras por carga, es decir, llenando los poros previamente vacíos y las fracturas, lo que añade a la masa total sujeta a las fuerzas de la gravedad.
 - La presencia del agua implica presión en los poros, lo que reduce las fuerzas de corte o de resistencia del material del talud. Muy importante, los cambios abruptos (incrementos y decrementos) en la presión de los poros pueden tener un papel decisivo en la ocurrencia de una falla.
 - La interacción con la superficie de la roca y el suelo (meteorización química) lentamente debilita el material de la pendiente, reduciendo la resistencia al corte. Esta interacción reduce las fuerzas de resistencia.

✓ *Fuerzas de resistencia.*

Las principales fuerzas de resistencia son la resistencia al corte de los materiales, una función de la cohesión (capacidad de las partículas de atraerse y mantenerse juntas unas con otras) y de la fricción interna (fricción entre los granos de un

³ BANCO MUNDIAL. Vetiver. La barrera contra la erosión. ISBN 0-8213-1706-7. Washington, 1995.-p. 19.

material) que se oponen a las fuerzas motoras. La relación entre las fuerzas de resistencia y las fuerzas motoras es el factor de seguridad (FS). Si el $FS > 1$ la pendiente es estable. Si no, se considera inestable.

Comúnmente, un FS de 1.2-1.3 es marginalmente aceptable. Dependiendo de la importancia de la pendiente y el potencial de pérdidas asociadas con la falla, se debe garantizar un mayor FS. En resumen, la estabilidad de la pendiente es una función de: tipo de roca/suelo y su resistencia, geometría de la pendiente (altura y ángulo), clima, vegetación y el tiempo. Cada uno de estos factores puede tener un papel significativo en controlar las fuerzas motoras o de resistencia.

✓ ***Tipos de fallas en pendientes.***

Dependiendo del tipo de movimiento y la naturaleza del material involucrado, pueden producirse diferentes tipos de fallas en las pendientes:

Tabla 5 Causas y consecuencias de la erosión

| Tipo de movimiento | | Material involucrado | |
|--------------------|--|--------------------------|-------------------------------------|
| | | Roca | Suelo |
| Desprendimientos | | -Desprendimiento de roca | -Desprendimiento de suelo |
| Deslizamientos | Rotacional | -Caída de bloque de roca | -Caída de bloque de suelo |
| | <u>Traslacional</u> | -Deslizamiento de roca | -Deslizamiento de detritos |
| Flujos | Lento | -Flujo de roca | -Soliflucción |
| | | | -Material saturado y no consolidado |
| | | | -Flujos de tierra |
| | | | -Colada de barro (hasta 30% agua) |
| | Rápido | | -Flujo de detritos |
| | | | -Avalancha de detritos |
| Complejo | Combinación de dos o más tipos de movimiento | | |

Fuente: Banco Mundial.

En roca, usualmente ocurren desprendimientos y deslizamientos traslacionales que involucran uno o más planos de debilidad. Debido a que los suelos son más homogéneos y carecen de un plano de debilidad visible, son más frecuentes los deslizamientos rotacionales y los flujos. En general, los movimientos en masa involucran más de un tipo de movimiento, por ejemplo un desprendimiento superior y un flujo en la parte basal, o un deslizamiento de suelo en la parte superior y un deslizamiento de roca en la parte inferior.

✓ ***Influencia humana en las fallas de una pendiente.***

Los deslizamientos son procesos naturales conocidos como erosión geológica. Los movimientos en masa o las fallas en las pendientes ocurren independientemente de la presencia del ser humano. Sin embargo, en los procesos que ocurren en las pendientes, las prácticas de uso de la tierra derivadas de las actividades humanas, desempeñan un papel primordial. La combinación de eventos naturales incontrolables (terremotos, tormentas intensas, etc.) y la alteración artificial de las tierras (excavaciones en pendientes, deforestación, urbanismo, etc.) puede generar fallas desastrosas de las pendientes.

✓ ***Mitigación de fallas en pendientes.***

Minimizar las fallas en las pendientes requiere de tres pasos: la identificación de áreas potencialmente inestables, la prevención de fallas en las pendientes y, la implementación de medidas correctivas en el caso de fallas en las pendientes. Una comprensión a fondo de las condiciones geológicas es crítica para decidir acerca de la mejor práctica de mitigación.

Identificación.

Técnicos entrenados pueden identificar fallas potenciales en pendientes mediante el estudio de fotografías aéreas para localizar sitios donde ocurrieron movimientos en masa o donde se presentan actualmente, y llevando a cabo investigaciones de campo de pendientes potencialmente inestables. Las áreas con mayor potencial para la ocurrencia de movimientos en masa se pueden identificar por la ocurrencia de altas pendientes, planos de inclinación orientados en dirección a la base de los valles, topografía irregular y de superficies sinuosas cubiertas de árboles jóvenes, filtraciones de agua, y áreas donde previamente han ocurrido estos procesos. Esta información se emplea para generar mapas de riesgo de las áreas con predisposición a la ocurrencia de movimientos en masa.

Prevención.

La prevención de los movimientos en masa y de la inestabilidad de las pendientes es mucho más eficiente en costos que su corrección. Los métodos de prevención incluyen el control de los drenajes, reducción del ángulo de la pendiente y su altura, el establecimiento de cobertura vegetal, paredes de retención, pernos anclados en roca, y concreto pulverizado de rápida solidificación entre otros. Estos métodos de soporte deben ser aplicados correctamente y apropiadamente asegurándose primero de que la pendiente es estable interna y estructuralmente. Esto requiere de una buena comprensión de las condiciones geológicas.

Corrección.

Algunos movimientos en masa pueden ser corregidos mediante la instalación de un sistema de drenaje para reducir la presión del agua en la pendiente, y prevenir movimientos futuros. La inestabilidad de las pendientes que bordean las carreteras y otros sitios importantes generalmente requiere de tratamientos muy costosos. Realizados a tiempo y apropiadamente, los drenajes superficiales y sub-superficiales son muy efectivos. Sin embargo, debido a que este tipo de acciones de mantenimiento son frecuentemente postergadas o ignoradas, se deben aplicar medidas más rigurosas y costosas cuando ocurran los problemas.

Estabilización vegetativa de pendientes.

La vegetación ha sido utilizada por siglos como una herramienta natural en bioingeniería para la rehabilitación y saneamiento de tierras, control de erosión y estabilización de taludes, y su popularidad se ha incrementado marcadamente en las últimas décadas. Esto, debido parcialmente al hecho de que hay más información disponible para los ingenieros sobre la vegetación, y en parte también debido a su relación costo/efectividad ser amigable al ambiente y considerarse, consecuentemente, un enfoque de ingeniería “ligera”.

Considerando los impactos de los diversos factores presentados anteriormente, una pendiente se hace inestable debido a: (a) erosión superficial o “erosión laminar”; y (b) debilidad estructural interna. La erosión laminar cuando no es controlada, a menudo se convierte en erosión en surcos y cárcavas, que en el tiempo, desestabilizarán la pendiente; la debilidad estructural causará finalmente movimientos en masa como deslizamientos.

Debido a que la erosión laminar también puede causar fallas en las pendientes, la protección de la superficie debe ser considerada tan importante como otras medidas estructurales de refuerzo, pero su importancia es a menudo ignorada. La protección de las pendientes es una medida preventiva efectiva, económica y esencial. En muchos casos, la aplicación de algunas medidas preventivas va a asegurar la estabilidad permanente de la pendiente, y siempre van a costar mucho menos que las medidas correctivas.

La cobertura vegetativa que provee la siembra de hierbas, la hidrosiembra o el hidromulch, son por lo general efectivas contra la erosión laminar, y las plantas con raíces profundas como árboles y arbustos pueden proveer cierto reforzamiento estructural al terreno. Sin embargo, en taludes recién construidos, las capas superficiales no están bien compactadas, por lo que incluso en superficies bien vegetadas no es posible prevenir la formación de surcos y cárcavas. En estos casos, los ingenieros resaltan la ineficiencia de la cobertura vegetal e instalan refuerzos estructurales inmediatamente después de la construcción. En resumen, la protección tradicional provista por vegetación

herbácea y leñosa local no puede, en muchos casos, asegurar la estabilidad necesaria.

4.2.6 Estabilización de pendientes usando el sistema vetiver.

4.2.6.1 Características del vetiver apropiadas para la estabilización de taludes.

Los atributos únicos del Vetiver han sido investigados, evaluados y desarrollados en el mundo tropical, confirmando que realmente el vetiver es una herramienta muy efectiva en la bioingeniería:

- Aunque técnicamente es un pasto, las plantas de vetiver usadas en la estabilización de terrenos se comportan más bien como árboles o arbustos de rápido crecimiento. Las raíces del vetiver son, por unidad de área, más fuertes y profundas que las raíces de los árboles.
- El sistema de raíces del Vetiver es extremadamente profundo y forma una masa finamente estructurada que se extiende hacia abajo dos a tres metros (seis a nueve pies) en el primer año. En pendientes de relleno, muchos experimentos muestran que este pasto puede alcanzar 3.6m (12 pies) en 12 meses. (Nótese que el vetiver no penetra profundamente en la masa de agua freática. por lo tanto, en sitios con masa de agua alta, su sistema de raíces no se extiende tan largamente como en los suelos secos). El sistema de raíces grueso y extenso, amarra el suelo y lo hace muy difícil de remover, y también extremadamente tolerante a la sequía.
- Las raíces del Vetiver, tan fuertes o más fuertes que las de muchas especies leñosas, tienen una fuerza de tensión alta, lo que ha demostrado ser positivo para el reforzamiento por las raíces de pendientes inclinadas.
- Estas raíces tienen una fuerza de tensión promedio probada de alrededor de 75 MPa, que es equivalente a 1/6 del reforzamiento con acero blando, y un incremento de la resistencia al corte de 39% a una profundidad de 0.5m (1.5 pies).
- Las raíces del Vetiver pueden penetrar un perfil de suelo compactado como un "hardpan" o una capa de arcilla blocosa dura, muy comunes en suelos tropicales, proporcionando un buen anclaje para rellenos y material de suelo superficial.
- Cuando se plantan juntas y muy cercanas, las plantas de vetiver forman una barrera densa que reduce la velocidad del flujo superficial, y desvía la escorrentía, conformando un filtro muy eficiente que controla la erosión. Las barreras detienen el flujo y lo dispersan, permitiendo un mayor tiempo para que infiltre en el terreno.

- Al actuar como un filtro muy efectivo, las barreras de vetiver reducen la turbidez del escurrimiento superficial. Debido a que brotan nuevas raíces de los nudos que quedan enterrados en el sedimento, el vetiver se adapta continuamente al nuevo nivel del terreno. Se van formando terrazas en la cara superior de la barrera, este sedimento no debe ser removido nunca. El sedimento fértil usualmente contiene semillas de plantas locales, lo que facilita su restablecimiento.
- El Vetiver tolera variaciones climáticas y ambientales extremas, incluyendo sequías prolongadas, inundaciones y sumersión, y temperaturas extremas en un rango entre -14°C y 55°C (7° F a 131°F)⁴.
- Este pasto rebrota muy rápido después de exponerse a sequías, heladas, salinización y otras condiciones de suelo adversas cuando cesan o son eliminados los efectos adversos.
- El Vetiver presenta un alto nivel de tolerancia a la acidez del suelo, salinidad, sodicidad y condiciones sulfato ácidas⁵.
- El Vetiver es muy efectivo cuando se planta junto a corta distancia sobre hileras en contorno en las pendientes, formando barreras vivas.

Figura 8 El Vetiver forma un biofiltro grueso y efectivo (izquierda) y debajo de a la superficie (derecha)



Izquierda: principios de estabilización de pendientes con el vetiver; derecha: las raíces de Vetiver refuerzan esta pared de dique protegiéndola de ser arrastrada por las crecidas e inundaciones.

Fuente: The Vetiver Network International. p. 27.

⁴ TRUONG, P. N. (1998). Vetiver Grass Technology as a bio-engineering tool for infrastructure protection. Proceedings of North Region Symposium. Queensland Department of Main Roads, Cairns 1998. Citado en The Vetiver Network International, p. 27).

⁵ LE VAN DU and TRUONG, P.. Vetiver grass for sustainable agriculture on adverse soils and climate in South Vietnam. Proc. Fourth International Vetiver Conf. Venezuela, Octubre 2006 (Citados en: The Vetiver Network International).

También se observó que el vetiver puede crecer verticalmente en pendientes con inclinaciones mayores a 150% (~56°). Su crecimiento rápido y reforzamiento sobresaliente lo hacen un mejor candidato para la estabilización de pendientes que otras plantas. Otra característica menos obvia que lo diferencia de los árboles es la capacidad de penetración de sus raíces. Su fuerza y vigor le permiten penetrar suelos difíciles, capas endurecidas, y capas rocosas con puntos débiles. Puede atravesar incluso pavimentos de asfalto y concreto. El mismo autor caracteriza las raíces de vetiver como “pilotes vivientes” de 2-3m (6-9 pies) usados comúnmente en “enfoques duros” en trabajos de estabilización de pendientes. Combinado con su capacidad de establecerse rápidamente en condiciones de suelo difíciles, todas estas características hacen al vetiver una planta más apropiada para la estabilización de taludes en comparación con otras.

4.2.6.2 Características del vetiver adecuadas para la mitigación de desastres asociados con el agua.

Para reducir el impacto de desastres asociados con el agua tales como las inundaciones, erosión de banco de río y costera, inestabilidad de diques y represas, el vetiver se siembra en hileras ya sea paralelas a o cruzando la dirección del flujo del agua o de las olas. Sus características adicionales únicas son muy útiles:

- Dada la extraordinaria profundidad y fortaleza de sus raíces, el vetiver maduro es extremadamente resistente a ser arrastrado por flujos de alta velocidad. El vetiver plantado en el norte de Queensland (Australia) ha soportado velocidades de flujos superiores a 3,5m/s (10 pies/s) en ríos bajo situaciones de inundación y, en el sur de Queensland, hasta de 5m/s (15 pies/s) en un canal de drenaje inundado.
- En situaciones de flujos superficiales o de baja velocidad, los tallos erguidos y firmes del vetiver actúan como una barrera que reduce la velocidad del flujo (p. ej. incrementando la resistencia hidráulica) y atrapa el sedimento erosionado. De hecho, él puede mantener su follaje erecto en un flujo con profundidades de 0,6-0,8m (24-31 pulgadas).
- Las hojas del vetiver se desprenden con flujos más profundos y veloces, suministrando una protección extra a la superficie del suelo y a la vez reduciendo la velocidad del flujo.
- Cuando se planta en estructuras que retienen agua como diques y represas, las barreras de vetiver ayudan a reducir la velocidad del flujo, disminuyen el nivel máximo de las olas y la erosión que éstas causan, y reducen el volumen de agua cuando ésta sobrepasa la estructura o la que pudiese entrar en las áreas protegidas por la misma. Estas barreras también ayudan a reducir la erosión

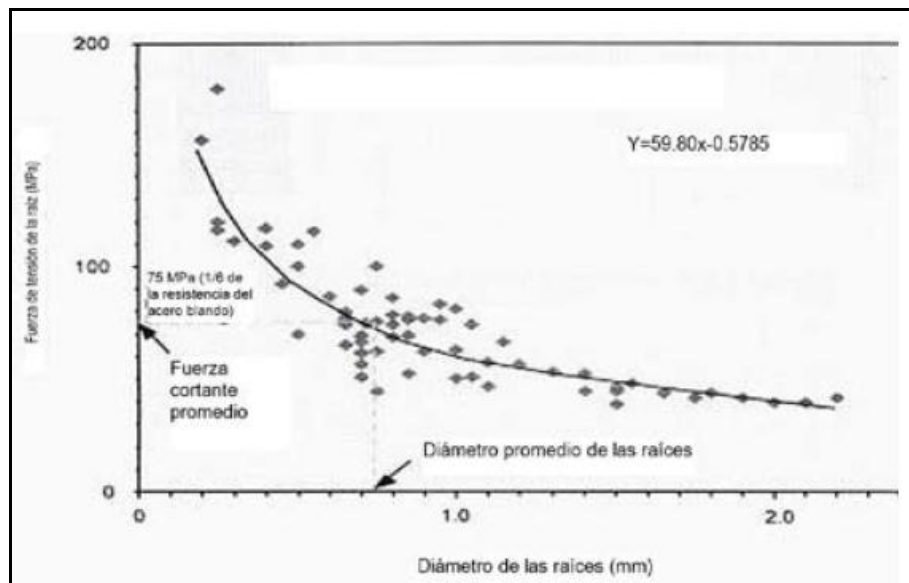
regresiva que ocurre a menudo cuando el flujo del agua o el de las olas se retira, luego de haber subido sobre la estructura

- Como planta de pantanos, el vetiver resiste sumersión prolongada. Experiencias en China demuestran que el vetiver sobrevivió más de dos meses bajo aguas claras.

4.2.6.3 Tensión y fuerzas de corte de las raíces de vetiver.

Hengchaovanich y Nilaweera (1996) encontraron que la fuerza de tensión de las raíces de vetiver se incrementa con una reducción en el diámetro de las raíces, lo que implica que las raíces fina, más fuerte, suministran mayor resistencia que las raíces gruesas. La fuerza de tensión de las raíces del vetiver varía entre 40-180 MPa en un rango de diámetro de raíces entre 0,2 - 2,2 mm (0,008-0,08 pulgadas). La fuerza de tensión promedio de diseño es de 75 MPa para diámetros de raíz de 0,7- 0,8 mm (0.03 pulgadas), que es el tamaño más común de raíces de vetiver, y es equivalente aproximadamente a un sexto del acero blando. Por lo tanto, las raíces de vetiver son tan fuertes o más fuertes que las de muchas especies leñosas que han sido probadas positivamente para el refuerzo de pendientes (Figura 9 y Tabla 6)

Figura 9 Distribución del diámetro de las raíces



Fuente: Banco Mundial.

En una prueba de resistencia al corte en un bloque de suelo, Hengchaovanich y Nilaweera (1996) también encontraron que la penetración de raíces de una barrera

de vetiver de dos años de establecida con una separación entre plantas de 15cm (6 pulgadas) se puede aumentar la resistencia al corte del suelo en los 50 cm (20”) de la anchura de la franja adyacente en un 90% a 0,25 m (10 pulgadas) de profundidad. El incremento fue del 39% a 0,50 m (1,5 pies) de profundidad y gradualmente se redujo a 12,5% a un metro (3 pies) de profundidad. Además, el sistema de raíces denso y masivo del vetiver ofrece un mayor incremento de la resistencia al corte por unidad de concentración de fibra (6-10 kPa/kg de raíz por metro cúbico de suelo) en comparación con 3,2-3,7 kPa/kg de raíz de árboles (Fig.4). Los autores explican que cuando las raíces de las plantas atraviesan el plano de una superficie potencial de corte en un perfil de suelo, distorsión de la zona de corte desarrollándose una tensión en las raíces. El componente de esta tensión tangencial a la zona de corte resiste directamente al corte, mientras que el componente de la normal incrementa la presión de confinamiento en el plano de corte.

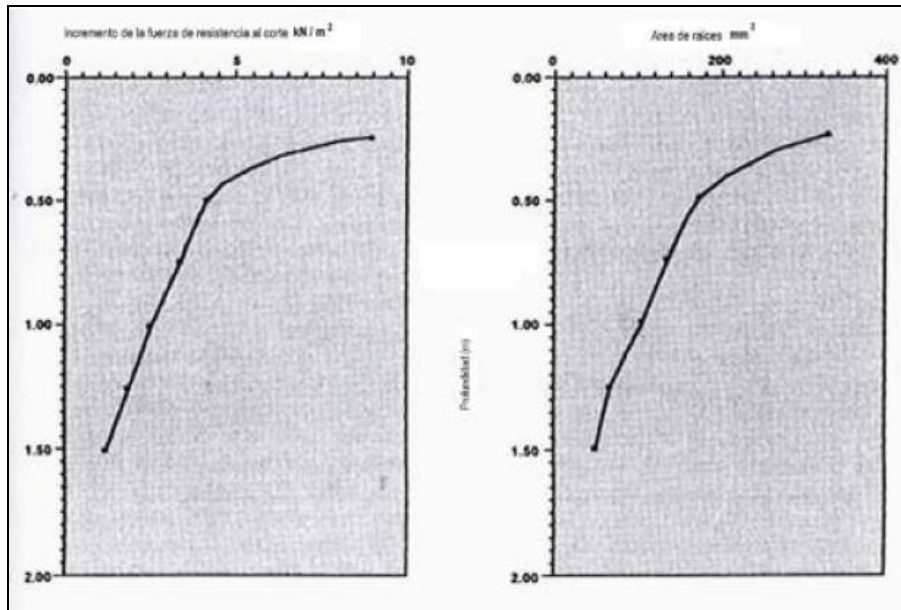
Cheng et al (2003) complementaron las investigaciones sobre resistencia de la raíz realizadas por Diti Hengchaovanich conduciendo ensayos posteriores en otros pastos –Tabla 7. Aunque el vetiver tiene las raíces más finas en segundo lugar, su fuerza de tensión es casi tres veces mayor que la del resto de las plantas evaluadas.

Tabla 6 Fuerza de tensión de la raíz de algunas plantas

| Nombre botánico | Nombre común | Fuerza de tensión (MPa) |
|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| <i>Salix spp</i> | Sauce | 9-36 |
| <i>Populus spp</i> | Poplars | 5-38 |
| <i>Alnus spp</i> | Alisos | 4-74 |
| <i>Pseudotsuga spp</i> | Abeto de Douglas | 19-61 |
| <i>Acer sacharinum</i> | Arce plateado ó Arce del azúcar | 15-30 |
| <i>Tsuga heterophylla</i> | Hemlock occidental o Tsuga Hemlock | 27 |
| <i>Vaccinum spp</i> | Arándano | 16 |
| <i>Hordeum vulgare</i> | Cebada | 15-31 |
| | Pastos, Hierbas | 2-20 |
| | Musgos | 2-7 kPa |
| <i>Chrysopogon zizanioides</i> | Pasto Vetiver | 40-120 (promedio 75) |

Fuente: Banco Mundial.

Figura 10 Fuerzas de resistencia al corte de la raíz del vetiver



Fuente: Banco Mundial.

Tabla 7 Diámetro y fuerza de tensión de la raíz de varias hierbas

| Pasto, grama o hierba | Diámetro promedio de la raíz (mm) | Fuerza de tensión promedio(MPa) |
|--|-----------------------------------|---------------------------------|
| Juncia (Juncellus serotinus) | 0,38±0,43 | 24,50±4,2 |
| Pasto miel, grama de agua (Paspalum dilatatum) | 0,92±0,28 | 19,74±3,00 |
| Trébol blanco (Trifolium repens) | 0,91±0,11 | 24,64±3,36 |
| Vetiver | 0,66±0,32 | 85,10±31,2 |
| Gramma cienpiés (Eremochioa ophiuroides) | 0,66±0,05 | 27,30±1,74 |
| Pasto Bahía (Paspalum notatum) | 0,73±0,07 | 19,23±3,59 |
| Gramma de Manila (Zoysia) | 0,77±0,67 | 17,55±2,85 |
| Pasto Bermuda (Cynodon dactylon) | 0,99±0,17 | 13,45±2,18 |

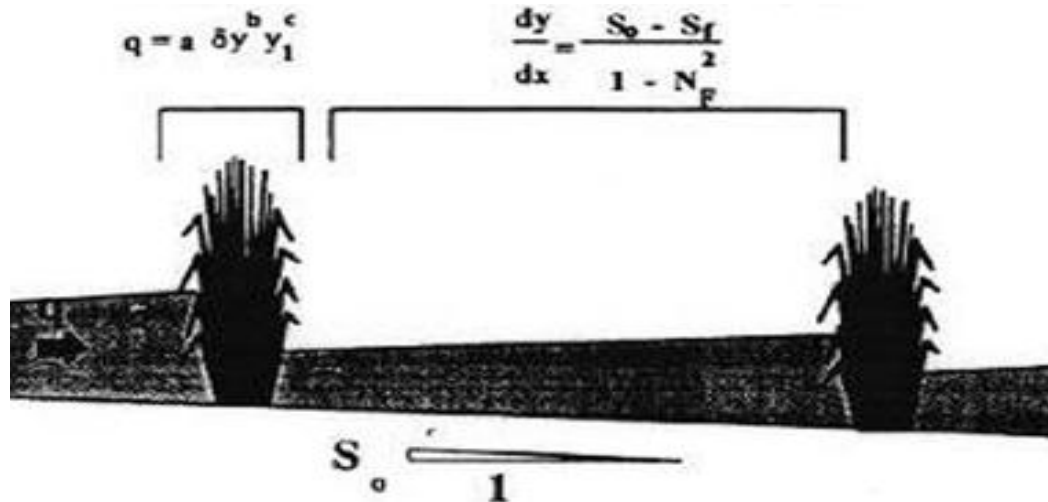
Fuente: Banco Mundial.

4.2.6.4 Características hidráulicas.

Al sembrarse en hileras, las plantas de vetiver forman barreras densas; sus tallos firmes permiten que estas densas barreras se mantengan erguidas por encima de los 0,6-0.8m (2-2,6') al menos, formando una barrera viva que hace más lenta la escorrentía y la dispersa. Cuando se planifican apropiadamente, estas barreras son estructuras muy efectivas que dispersan y derivan el agua

de escorrentía hacia áreas estables o drenajes apropiados para una descarga segura.

Figura 11 Modelo hidráulico de una inundación atravesando barreras de vetiver



Fuente: Banco Mundial.

Dónde:

q = descarga por unidad de ancho y = profundidad del flujo y_1 = profundidad aguas arriba
 S_0 = pendiente del terreno S_f = energía de la pendiente N_F = el número Froude del flujo

Ensayos con canales de flujo conducidos en la Universidad del Sur de Queensland para estudiar el diseño y la incorporación del vetiver en un trazado entre franjas de cultivo para la mitigación de inundaciones, confirmaron las características hidráulicas de las barreras de vetiver en flujos profundos (Figura 11). Las barreras redujeron sucesivamente la velocidad de las inundaciones y limitaron el movimiento del suelo; franjas en barbecho sufrieron muy poca erosión, y un cultivo de sorgo joven fue protegido completamente del daño de la inundación (Dalton et al, 1996).

4.2.6.5 Presión de agua en los poros.

La cobertura vegetal en las tierras en pendientes incrementa la infiltración del agua. Existe la preocupación de que el excedente de agua incrementa la presión de agua en los poros del suelo y promueve la inestabilidad de la pendiente. Sin embargo, observaciones de campo muestran en realidad una mejora. Primero, al plantar en líneas en contorno o líneas de patrones modificados que atrapan y dispersan el agua de escorrentía en la pendiente, el sistema de raíces del vetiver y el efecto de flujo de paso distribuye el agua excedente más uniformemente y de manera gradual, ayudando a prevenir acumulaciones locales.

Segundo, el probable incremento de la infiltración es compensado por una tasa de agotamiento mayor y más gradual del agua del suelo por el pasto. Investigaciones sobre la competencia por el agua en el suelo en cultivos en Australia (Dalton et al, 1996) muestran que, bajo unas condiciones de poca precipitación, el agotamiento de la humedad del suelo puede alcanzar hasta 1,5m (4,5 pies) desde las barreras. Esto incrementa la infiltración de agua en esa zona, promoviendo la reducción del agua de escorrentía y las tasas de erosión. Desde una perspectiva geotécnica, estas condiciones ayudan a mantener la estabilidad de la pendiente. En pendientes muy inclinadas (30-60°), el espacio vertical entre barreras de 1m (3 pies) IV (Intervalo Vertical) es muy corto. Por lo tanto, el agotamiento de la humedad será mayor y mejorará aún más el proceso de estabilización de la pendiente. Sin embargo, para reducir los efectos potencialmente dañinos en pendientes inclinadas en zonas de alta precipitación, las barreras de vetiver deben ser plantadas con un gradiente de 0,5% como se hace con las terrazas de drenaje para desviar el agua excedente hacia drenajes de salida estables (Hengchaovanich, 1998).

4.2.6.6 Aplicaciones del SV en la mitigación de desastres naturales y protección de infraestructura.

Debido a sus características únicas, el vetiver es generalmente muy útil en controlar la erosión en taludes de corte y relleno y en otras pendientes asociadas con la construcción de carreteras, y particularmente efectivo en suelos altamente erosionables y separables, tales como los sódicos, alcalinos, ácidos y sulfato ácidos.

Las siembras de Vetiver han sido muy efectivas en el control de la erosión o estabilización en las siguientes condiciones:

- Estabilización de pendientes a lo largo de autopistas y vías férreas. Especialmente efectivo en trayectos montañosos de carreteras rurales, donde las comunidades carecen de suficientes fondos para la estabilización de las carreteras y donde frecuentemente toman parte en la construcción de la vía.
- La estabilización de taludes en diques y represas, la reducción de la erosión en bancos de río, canales y líneas costeras y la protección de estructuras rígidas propiamente (ej. enrocados, muros de contención de concreto, gaviones, etc.).
- Pendientes sobre la entrada y la salida de las alcantarillas (cunetas, alcantarillas, y sus bases).
- La interfaz entre estructuras de cemento y roca y superficies de suelo erosionables.
- Como franja filtrante en la entrada de alcantarillas.

- Para reducir la energía en la salida de las alcantarillas.
- Para estabilización de la erosión de cabecera en cárcavas, sembrando las barreras de vetiver en contorno sobre ellas.
- Para eliminar la erosión causada por la acción de las olas, plantando unas pocas hileras de vetiver en el borde de la línea o cota de agua más alta en taludes de grandes diques en tierras agrícolas y en bancos de río.
- En plantaciones forestales, para estabilizar los hombros de las carreteras de acceso en pendientes muy inclinadas así como las cárcavas (en senderos/caminos) que se desarrollan después de las cosechas.

Debido a sus características únicas, el vetiver controla efectivamente desastres asociados con el agua como inundaciones, erosión de banco de río y de líneas costeras, erosión de diques y represas, y en general la inestabilidad. También protege puentes, bases de alcantarillas y la interfaz entre estructuras de cemento /roca y el suelo. El Vetiver es particularmente efectivo en áreas donde el relleno del terraplén es altamente erosionable y separable, como en el caso de suelos sódicos, alcalinos, y ácidos (incluyendo los suelos sulfatos ácidos).

4.2.6.7 Ventajas y desventajas del Sistema Vetiver (SV).

Ventajas:

- La mayor ventaja del SV sobre medidas convencionales de ingeniería es su bajo costo y larga duración. Para la estabilización de taludes en China, por ejemplo, el ahorro está por el orden de 85-90% (Xie, 1997 y Xia et al, 1999). En Australia, la ventaja en costos del SV sobre los métodos de ingeniería convencionales está en el rango de 64% a 72%, dependiendo del método usado (Bracken y Truong 2001). En resumen, sus máximos costos son sólo 30% de los costos de las medidas tradicionales. Adicionalmente, los costos anuales de mantenimiento son reducidos significativamente una vez que las barreras de vetiver se han establecido.
- Como en otras tecnologías de la bioingeniería, el SV es una manera natural, ambientalmente amigable de controlar erosión y estabilizar los terrenos. Suaviza la apariencia dura de medidas de ingeniería convencionales como las estructuras de concreto y de roca, lo cual es muy importante en zonas urbanas y semirurales donde las comunidades locales rechazan la apariencia desagradable de las obras de infraestructura.
- Los costos de mantenimiento a largo plazo son bajos. En contraste con las obras de ingeniería convencionales, la tecnología verde mejora en la medida que madura la cobertura vegetal. El SV requiere un sistema de mantenimiento en los primeros dos años; sin embargo, una vez establecido, será virtualmente libre de

mantenimiento. Por lo tanto, el uso del vetiver es particularmente apropiado para áreas remotas donde los costos de mantenimiento son altos y las condiciones difíciles.

- El vetiver es muy efectivo en suelos pobres y muy erosionables y separables.
- El SV es muy apropiado en áreas donde la mano de obra es de bajo costo.
- Las barreras de vetiver son naturales, una técnica de bioingeniería suave, y ecoamigable en comparación con estructuras rígidas y duras.

Desventajas:

- La principal desventaja de las aplicaciones del SV es su intolerancia a condiciones de sombra, específicamente en la etapa de establecimiento. La sombra parcial afecta su crecimiento; la sombra severa puede eliminar el vetiver al reducir su capacidad de competir con otras especies más tolerantes a la sombra. Sin embargo, esta debilidad puede ser deseable en situaciones donde la estabilización inicial requiere de plantas pioneras que creen un micro ambiente que hospede la introducción espontánea o planeada de especies nativas endémicas.
- El Sistema Vetiver es efectivo sólo cuando las plantas están bien establecidas. Una planificación efectiva debe considerar un período de establecimiento de 2-3 meses en clima cálido y 4-6 meses en tiempos de clima frío. Para evitar retrasos, la siembra puede hacerse plantando con antelación, en la época seca si se dispone de riego.
- Las barreras de Vetiver son efectivas plenamente sólo cuando forman una barrera densa. Los huecos entre plantas deben ser replantados a tiempo.
- Es difícil plantar y regar vegetación en pendientes muy inclinadas y altas.
- El vetiver requiere protección del ganado durante sus fases de establecimiento

Basado en estas consideraciones, las ventajas de usar el SV como una herramienta en bioingeniería superan las desventajas, en especial cuando el vetiver es usado como una planta pionera.

Hay evidencia a nivel mundial que sustenta el uso del SV para estabilizar taludes. El vetiver ha sido usado exitosamente para estabilizar bordes de carreteras, entre otros, en Australia, Brasil, América Central, China, Etiopía, Fiji, India, Italia, Madagascar, Malasia, Filipinas, Sur África, Sri Lanka, Venezuela, Vietnam, y las Indias Orientales. Usado en conjunto con otras aplicaciones geotécnicas, el vetiver ha sido utilizado para estabilizar taludes en Nepal y Sur África.

4.2.6.8 Combinación con otros tipos de remediación.

El vetiver es efectivo por sí mismo y combinado con otros sistemas tradicionales. Por ejemplo, en una sección dada de un banco de río o de un dique, una cobertura con rocas o concreto puede reforzar la parte que va sumergida, y el vetiver puede reforzar la parte superior. Esta aplicación en paralelo crea un factor de estabilidad y seguridad (que no siempre son ciertas y/o necesarias). El vetiver también puede ser plantado con bambú, una planta usada tradicionalmente para proteger los bancos de río. Las experiencias han demostrado que usar sólo bambú tiene muchos inconvenientes que se pueden superar al añadir el vetiver. Como se dijo anteriormente, cuando el bambú es arrastrado puede crear serios problemas en los ríos con puentes que presentan un nivel bajo.

4.2.6.9 Modelaje computarizado.

Los programas (software) desarrollados por Prati Amati, Srl (2006) en colaboración con la Universidad de Milán determinan el porcentaje o cantidad de las fuerzas de resistencia al corte que las raíces del vetiver añaden a varios suelos con barreras de vetiver. El programa ayuda a evaluar la contribución para estabilizar taludes inclinados, particularmente diques de tierra. En condiciones promedio de pendiente y suelo, la instalación de las barreras de vetiver incrementa la estabilidad de la pendiente en un 40%.

La utilización del programa requiere que el operador introduzca los siguientes parámetros geotécnicos relacionados con un sitio particular:

- Tipo de suelo.
- Grado de la pendiente.
- Máximo contenido de humedad
- Cohesión del suelo en su valor mínimo.

El programa indica el número de plantas por metro cuadrado requeridas así como el distanciamiento entre hileras, considerando el grado de la pendiente. Por ejemplo:

- una pendiente de 30° requiere seis plantas por metro cuadrado (p.ej. 7-10 plantas por metro lineal) y una distancia entre hileras alrededor de 1,7 m (5,7 pies).
- una pendiente de 45° requiere 10 plantas por metro cuadrado (p.ej. 7-10 plantas por metro lineal) y una distancia entre hileras cercana a 1 m (3 pies).

4.2.7 Diseño y técnicas apropiadas.

4.2.7.1 Precauciones.

EL SV es una tecnología nueva, y como tal, sus principios deben ser estudiados y aplicados apropiadamente para obtener los mejores resultados. No seguir los fundamentos básicos puede acarrear frustraciones, y peor aún, resultados adversos. Como una técnica de conservación de suelos, y más recientemente, como una herramienta en bioingeniería, la aplicación efectiva del SV requiere un conocimiento de la biología, ciencias del suelo, hidráulica, hidrología, y principios geotécnicos. Por lo tanto, para proyectos de mediana a gran escala, que involucran diseños y construcciones de ingeniería significativos, es mejor que el SV sea aplicado por especialistas con experiencia más que por los lugareños. Sin embargo, el conocimiento de enfoques participativos y de manejo apoyado en las comunidades locales es también muy importante. Por ello, la tecnología debe ser diseñada e implementada por expertos en el uso del vetiver, en asociación con un agrónomo y un ingeniero geotécnico, y con la asistencia de los campesinos y agricultores locales.

Además, aunque es un pasto, el vetiver se comporta más como un árbol, debido a su extenso y profundo sistema de raíces. Para añadir más a la confusión, el SV puede explotar y aprovechar diferentes características del vetiver para diferentes aplicaciones. Por ejemplo, sus raíces profundas estabilizan el terreno, su denso follaje atrapa sedimentos y dispersa el agua, y su extraordinaria tolerancia a condiciones hostiles le permite rehabilitar suelos y agua contaminados.

Las fallas del SV pueden, en la mayoría de los casos, ser atribuidas a malas aplicaciones más que a la planta en sí misma o a la tecnología recomendada. Por ejemplo, en un caso, el vetiver fue utilizado en Filipinas para estabilizar taludes en una autopista nueva. Los resultados fueron muy decepcionantes y ocurrieron fallas. Luego se supo que los ingenieros que especificaron el SV, el vivero que suministró las plantas, y los supervisores de campo y obreros que ejecutaron la siembra, carecían de experiencia o entrenamiento previo en el uso del SV para la estabilización de pendientes inclinadas.

La experiencia en Vietnam demuestra que el vetiver ha sido empleado muy exitosamente cuando este es aplicado correctamente. No es de sorprenderse, que aplicaciones incorrectas puedan fallar. Trabajos en las Tierras Altas Centrales de Vietnam demuestran que el vetiver ha protegido efectivamente taludes de carreteras. Sin embargo, entre las masivas aplicaciones en pendientes muy altas e inclinadas sin terraceamiento, a lo largo de la autopista Ho Chi Minh, se han producido algunas fallas. En resumen, para asegurar el éxito, los políticos, diseñadores e ingenieros que planean el uso del Sistema Vetiver para la protección de infraestructura deben considerar las siguientes precauciones:

Precauciones técnica:

- Para asegurar el éxito, el diseño debe ser realizado o supervisado por personas entrenadas.
- Al menos por los primeros meses, mientras las plantas se establecen, el sitio debe ser estable internamente en contraposición a la ocurrencia de fallas. El vetiver manifiesta sus plenas capacidades cuando madura, y las pendientes pueden fallar durante el período de establecimiento.
- El SV es aplicable sólo a pendientes de tierra con inclinaciones que no deben nunca exceder 45-50°.
- El vetiver crece muy pobremente en la sombra, por lo que plantarlo directamente debajo de un puente u otro tipo de estructura que cause sombra debe evitarse.

Precauciones para los políticos, planificadores y organizaciones:

- Tiempo: la planificación debe considerar las estaciones o temporadas y el tiempo que le toma crecer a los materiales plantados.
- Mantenimiento y reparación: en etapas tempranas, hay un período durante el cual todavía el vetiver no es efectivo. La planificación y el presupuesto deben anticipar el remplazo de algunas plantas.
- Suministros: Todos los insumos pueden y deben ser suministrados localmente (mano de obra, estiércol, material de plantación, contratos de mantenimiento). Las oportunidades de empleo dan un incentivo a las comunidades locales para proteger las plantas durante su infancia y adolescencia, y para mantener la calidad y sustentabilidad de los trabajos.
- Participación de la Comunidad: tanto como sea posible, las comunidades locales deben ser incluidas en el diseño, mantenimiento, suministro de materiales, y etapas de mantenimiento. Los contratos con personas de la localidad deben ser definidos, señalando viveros, especificaciones de calidad/ cantidad, y mantenimiento/protección.
- Oportunidad: Los que toman las decisiones deben estar listos para innovar y considerar el SV en la planificación y el presupuesto. Para ello, se necesitan incentivos para incluir esos métodos eficientes en los costos de sus planes, tal como se tienen incentivos, justificables o no, para adoptar métodos convencionales más costosos.

- Integración: Los políticos deben recomendar el Sistema Vetiver como parte de un enfoque integral de la protección de infraestructuras, aplicado a una escala de suficiente tamaño que asegure un incremento tangible en experticia y un efecto gradual de diseminación. El vetiver no debe ser considerado meramente como un estabilizador para sitios localmente comprometidos, a pesar de su habilidad de generar un efecto conciso e inmediato.

4.2.7.2 Momento de realizar la plantación.

La instalación de las plantas de vetiver es crítica para el éxito y el costo del proyecto. Plantar en la época seca requiere de riego abundante y costoso. La experiencia en Vietnam Central demuestra que se requiere un riego diario o dos veces al día para establecer vetiver en las condiciones extremadamente difíciles de las dunas de arena.

El crecimiento se retrasa en la ausencia de agua. Debido a que es difícil seleccionar el mejor momento para plantar grandes cantidades de plantas en taludes de corte a lo largo de la autopista Ho Chi Minh, por ejemplo, el riego mecánico es necesario diariamente durante los primeros meses.

El vetiver generalmente necesita de 3-4 meses para llegar a establecerse, algunas veces hasta 5-6 meses en condiciones adversas. Debido a que el vetiver es efectivo plenamente a la edad de 9-10 meses, las plantaciones masivas deben ocurrir al principio de la estación lluviosa por tanto el desarrollo y producción de plantas en el vivero debe planificarse para satisfacer el cronograma de plantación masivo.

En el Norte de Vietnam en particular, es posible plantar durante el período de invierno-primavera. Cuando las temperaturas descienden por debajo de 10°C (50°F) en el Norte de Vietnam, el pasto no crece. Sin embargo, en este período, las plantas pueden sobrevivir al clima frío y reactivar el crecimiento inmediatamente cuando las lluvias de invierno comienzan y el clima se calienta.

En Vietnam Central, donde la temperatura del aire normalmente está sobre los 15°C (59°F), la plantación masiva de vetiver se efectúa al principio de la primavera. Los viveros requieren más cuidado para asegurar un buen crecimiento y multiplicación de los esquejes o hijos.

4.2.7.3 Vivero.

El éxito de cualquier proyecto depende de la buena calidad y suficiente número de hijos de vetiver. Por lo general, no se requieren grandes viveros para suministrar suficiente material para la siembra. En su lugar, los agricultores individuales pueden instalar y supervisar pequeños viveros (unos pocos cientos de metros

cuadrados cada uno). Los mismos serán contratados y pagados por el proyecto de acuerdo al número de hijos que puedan proveer de acuerdo con los pedidos.

Preparación para la siembra de vetiver

En aquellos casos en que las siembras masivas de vetiver involucren la participación de los lugareños, una campaña de siembra efectiva debe incluir las siguientes etapas:

- Etapa 1: Los expertos visitan los sitios, y llevan a cabo un inventario para identificar los problemas
- Etapa 2: Discutir los problemas y las soluciones alternativas con la comunidad local;
- Etapa 3: Utilizar talleres y cursos de entrenamiento para introducir la nueva tecnología;
- Etapa 4: Organizar ensayos demostrativos, mediante el establecimiento de viveros, realizar los contratos de compra de plantas, mantenimientos, etc.;
- Etapa 5: Hacer seguimiento a la ejecución;
- Etapa 6: Discutir los resultados de las pruebas, talleres de seguimiento, visitas de intercambio en campo, etc.;
- Etapa 7: Organizar la siembra en masa.

En aquellos casos en que las siembras en masa son realizadas por compañías especializadas, se recomiendan las etapas 1, 4, 5. Sin embargo, la participación local es todavía recomendable para aumentar la conciencia, evitar el vandalismo y asegurar que los hijos o “esquejes” de vetiver sean protegidos de los animales.

4.2.7.4 Especificaciones del trazado.

Pendientes naturales, pendientes de corte, taludes de carreteras.

Para estabilizar pendientes naturales, pendientes de corte y taludes de carretera, aplican las siguientes especificaciones:

- Los taludes de la pendiente no deben exceder 1(H) [horizontal]:1(V) [vertical] o 45°, se recomienda un gradiente de 1.5:1.0 Gradientes menores son deseables siempre que sean posibles, especialmente en suelos erosionables y/o en zonas de alta precipitación.
- El vetiver debe ser plantado en sentido contrario a la pendiente en líneas de contorno aproximadas con un intervalo vertical (IV) entre 1,0-2,0m (3-6 pies), medido pendiente abajo. El espaciamiento de 1.0m (3') debe ser utilizado en suelos muy erosionables, que puede incrementarse hasta 1,5-2,0m (4,5-6 pies) en suelos más estables.

- La primera hilera debe sembrarse en el borde superior del talud. Esta barrera debe colocarse en todos los taludes con alturas mayores a 1,5m (4,5 pies).
- La hilera de abajo debe sembrarse en el fondo, al pie del talud. En taludes de corte a lo largo de la cuneta de drenaje.
- Entre estas hileras, el vetiver debe sembrarse como se especificó arriba.

Bancos de río, erosión costera, y estructuras de retención de agua inestables

Para la mitigación de desastres y la protección de las costas, bancos de río y diques/terraplenes, se recomiendan las siguientes especificaciones de trazado:

- La máxima pendiente del banco no debe exceder 1,5(H):1(V). La pendiente recomendada para el banco es de 2,5:1. Por ejemplo: los sistemas de diques marinos en Hai Hau (Nam Dinh) están contruidos con una pendiente del banco de 3:1 a 4:1.
- El vetiver debe plantarse en dos direcciones:
 - Para la estabilización de bancos, el vetiver debe sembrarse en hileras paralelas a la dirección del flujo (horizontal), en líneas de contorno aproximadas 0,8-1,0m (2,5-3 pies) de separación (medido en dirección de la pendiente). Un trazado reciente en el sistema de diques de Hai Hau (Nam Dinh) incluyó especificaciones que redujeron el espaciamiento a 0,25 m (0,8 pies).
 - Para reducir la velocidad del flujo, el vetiver debe sembrarse en hileras normales (ángulo recto) al flujo y espaciadas 2,0m (6 pies) en suelos erosionables y 4,0m (12 pies) en suelos estables. Como protección suplementaria, las hileras normales se sembraron 1,0m (3 pies) separadas del dique del río en Quang Ngai, por ejemplo.
- La primera línea horizontal debe sembrarse en la cresta del banco y la última hilera debe plantarse en la línea más baja del nivel del agua del banco. Ya que el nivel del agua en algunas localidades cambia por temporadas, el vetiver puede sembrarse más abajo en el banco, cuando el momento sea propicio.
- El vetiver debe plantarse en contorno a lo largo de la longitud del banco entre las hileras superior e inferior a la distancia especificada arriba.
- Debido a los altos niveles del agua, las hileras de abajo pueden establecerse más lentamente que las de arriba. En esos casos, las hileras inferiores deben sembrarse cuando el suelo está más seco. En algunas aplicaciones del SV, se

protegen diques anti salinidad. En estos casos, el agua puede encontrarse más salada en ciertas épocas del año, lo que puede afectar el crecimiento del vetiver. Las experiencias en Quang Ngai muestran que el vetiver puede ser remplazado por algunas especies locales tolerantes a la salinidad, incluyendo el helecho mangle.

- Para todas las aplicaciones, el SV puede ser usado en combinación con otras medidas estructurales tradicionales tales como recubrimientos con roca o concreto, y muros de retención. Por ejemplo, la parte inferior del dique /terraplén puede ser cubierta por una combinación de roca y concreto y geotextiles mientras la mitad superior es protegida con barreras de vetiver.

Especificaciones de siembra

- Cavar zanjas que sean de 15 a 20cm (6-8 pulgadas) de ancho y profundidad.
- Localizar plantas bien enraizadas (con 2 a 3 brotes) en el centro de cada hilera a intervalos de 100 a 120mm (4 a 5 pulgadas) en suelos erosionables, y a 150mm (6 pulgadas) para suelos normales.
- Debido a que los suelos en las pendientes, taludes de carreteras y rellenos en diques/terraplenes no son fértiles, se recomienda el uso de plantas producidas en contenedores (bolsas, tubetes) para siembras de gran escala y lograr un establecimiento rápido. La adición de un poco de buena mezcla de suelo-estiércol es recomendable. Para proteger los bancos de río donde el suelo es usualmente fértil y donde el agua de riego es de fácil acceso, las plantas a raíz desnuda son apropiadas.
- Cubra las raíces con 20 a 40mm (1 a 2 pulgadas) de suelo y compáctelo firmemente.
- Fertilice con Nitrógeno y fósforo cómo el FDA (Fosfato Di Amónico) o NPK (nótese que por experiencia el vetiver no responde significativamente a las aplicaciones de potasio) a 100g (3.5oz) por metro de hilera. La misma cantidad de cal puede ser necesaria cuando se planta en suelos sulfatos ácidos.
- Riegue el mismo día de la siembra.
- Para reducir el control de malezas durante la etapa de establecimiento, puede utilizarse un herbicida pre-emergente como la Atrazina.

Mantenimiento

Riego

- En clima seco, riegue diariamente durante las dos primeras semanas después de la siembra y luego un día de por medio.
- Riegue dos veces por semana hasta que las plantas se establezcan completamente.
- Las plantas adultas no requieren más riego.

Resiembra

- Durante el primer mes después de la siembra, reponga todas las plantas que fallen en su establecimiento o hayan sido arrastradas.
- Continúe las inspecciones hasta que las plantas se hayan establecido apropiadamente.

Control de malezas

- Controle las malezas, especialmente las trepadoras, durante el primer año.
- No usar el herbicida Round Up (glifosato). El vetiver es muy sensible al glifosato, por lo que este no debe ser usado para controlar las malezas entre las hileras.

Fertilización

En suelos infértiles, FDA o fertilizante NPK debe aplicarse al principio de la segunda temporada de lluvias.

Poda

Después de cinco meses, las podas regulares son muy importantes. Las barreras deben ser cortadas a unos 15 o 20 cm (6 o 8") sobre el nivel del terreno. Esta técnica simple promueve el desarrollo de nuevos brotes desde la base y reduce el volumen de hojas secas que de otra manera pueden sombrear los brotes jóvenes. La poda es también importante para mejorar la apariencia de las barreras secas y para disminuir el riesgo de incendios.

Las hojas frescas cortadas pueden ser usadas como forraje para el ganado, para artesanías, e incluso para hacer techos. Por favor, note que el vetiver empleado para reducir desastres naturales no debe ser sobre utilizado para otros fines

secundarios. Se pueden realizar podas sucesivas dos a tres veces al año. Se debe tener cuidado de que la planta tenga largas hojas durante la temporada de tifones¹. El vetiver puede ser podado inmediatamente después que termine la temporada de tifones. Otra época apropiada para la poda podría ser unos tres meses antes del inicio de la temporada de tifones.

Cercado y cuidados

Durante los meses del período de establecimiento, puede ser necesario cercar y cuidar el vetiver para protegerlo del vandalismo y del ganado. Los viejos tallos del vetiver maduro son suficientemente duros para desalentar al ganado. Cuando sea necesario, se recomienda cercar el área para proteger el vetiver durante los meses iniciales después de la siembra.

4.2.8 Usos del pasto vetiver en el mundo.

Las variadas aplicaciones del pasto Vetiver y la utilización de sus partes cosechadas en diversos escenarios del desarrollo sustentable en proyectos de protección ambiental, albergues comunitarios, protección de infraestructuras y mitigación de desastres, tratamiento de aguas residuales, producción artesanal e industrial y paisajismos, entre otros, se ven fortalecidos por los conocimientos y experiencias aportados en las investigaciones realizadas a nivel mundial.

Las características morfológicas y fisiológicas exclusivas del pasto vetiver, lo hacen muy idóneo para la protección del medio ambiente en zonas de biorreparación, filtración y rehabilitación, es así como a nivel mundial, muchos países la han utilizado para solucionar y remediar daños ambientales provocados por desastres naturales sobre infraestructuras y suelos agrícolas, razón por la cual existe una “Red Mundial del Vetiver” apoyada por el Banco Mundial, el Gobierno de Tailandia y otras organizaciones que fomentan el uso de esta planta y difunde sus múltiples beneficios. PEREZ (citado por BERMUDEZ, 2012).

Anónimo (citado por Bermúdez, 2012), comento que el vetiver es extremadamente resistente a condiciones climáticas adversas, pero tiene algunas limitaciones como son:

- Tolera muy poco la sombra, ya que bajo esta condición crece más lento y con dificultad haciéndolo más sensible a factores adversos; razón por la cual, no se pueden establecer plantaciones de vetiver bajo árboles muy densos, ya que no puede competir con los árboles.
- Pese a ser muy resistente al ataque de plagas y enfermedades, cuando por factores externos no crece bien se ve afectado en condiciones de debilidad. Por

ejemplo la combinación de suelos muy poco profundos con sequía prolongada o sombra puede favorecer el ataque de algunos insectos en su follaje y hongos en la raíz.

- Las termitas pueden ser un problema, ya que estos insectos son atraídos por las partes secas de la planta, y sus nidos forman montículos que pueden sofocar las plantas. El control es sencillo, simplemente hay que eliminar el material muerto mediante una quema anual y controlada de las barreras.

- La falta de temperaturas altas limita su desarrollo, por condiciones extremas de frío en invierno (suelo congelado) y la altitud (por encima de 2.500), además en los trópicos y subtropicos no crece bien.

El establecimiento del cultivo de vetiver como delimitación física en los canteros o como delimitación física entre las diferentes unidades de producción agrícola, es positivo ya que este no compite con otros cultivos, incluso el rendimiento de ellos aumenta; este aumento en el rendimiento del cultivo obedece a que cuando está presente el vetiver como barrera viva, aumenta la retención de humedad beneficiando al cultivo y además funciona como control biológico de fauna entomológica; permitiendo así preservar la salud del cultivo, además de que el vetiver no compite ni por agua ni por nutrientes con los otros cultivos con los cuales se asocia. (Orihuela, J.A., 2005).

Según Agrodesierto (citado por Bermúdez, 2012), las investigaciones realizadas en el mundo con relación al uso del vetiver en algunos países, concluyeron que:

• **India:** Las barreras de vetiver potencian la recarga de acuíferos, superando en un 30% con respecto a otras zonas con vegetación, pero sin barreras de vetiver.

La relación entre las barreras de vetiver y la recarga de acuíferos subterráneos se pudo apreciar en análisis comparativos sobre el terreno en donde se pudo apreciar un aumento en el nivel del agua en pozos y nacimientos, junto con una disminución de sedimentos en cursos de agua superficiales.

• **China:** Las barreras de Vetiver intercaladas en plantaciones de cítricos favorecieron en el suelo una disminución de su densidad, aumentando su porosidad y la presencia de aminoácidos y oligoelementos, incrementando la materia orgánica de un 0.4 % a un 1.8 %.

• **Costa Rica:** Las Barreras de Vetiver en plantaciones de cítricos mostraron una gran utilidad en la retención de suelo, incremento de materia orgánica, disminución de las escorrentías y erosión laminar, incremento de la fertilidad del suelo y protección contra el viento, lo que repercutió en un incremento en la calidad de la producción.

• **Centroamérica:** En los últimos desastres naturales que han azotado Centroamérica (Huracán Nitz, El niño, etc.) se ha constatado fehacientemente la capacidad de las barreras de vetiver para mantener sujeta la tierra, previniendo deslizamientos que han sido muy frecuentes y dañinos en las áreas sin cobertura vegetal apropiada.

• **El Salvador, Filipinas y Tanzania:** Tras una evaluación de los resultados del uso del vetiver como barrera contra la erosión, más del 80% de los granjeros que efectuaron plantaciones de prueba con el vetiver continuaron usándolo después de tres años.

• **Australia:** Plantaciones combinadas de reforestación de plantas autóctonas en zonas previamente estabilizadas con vetiver fueron totalmente exitosas, apreciándose al cabo de dos años una disminución en el desarrollo del que empezaba a ser desplazado y reemplazado por la vegetación autóctona.

En resumen los usos dados al vetiver a nivel mundial, se pueden resumir en los siguientes:

- Barrera contra la Erosión.
- Barrera Anti - Fuego.
- Barrera para Control de avalanchas de agua.
- Barrera visual y acústica.
- Barrera antipolución atmosférica.
- Tratamiento de suelos y aguas en el retiro de contaminantes agrícolas químicos.
- Delimitación de áreas.
- Creación de presas de tierra de bajo costo.
- Prevención de Desastres Naturales.
- Mantenimiento de Taludes de Tierra.
- Control de Sedimentos.
- Formación de bancales vivos y naturales.
- Prevención de corrimientos de tierras y desastres naturales.
- Control polución del agua al ser muy eficiente en la absorción de N, P, Hg, Cd y Pb.
- Fabricación de artesanías con sus hojas muy resistentes.
- Protección y refugio de flora y fauna.
- Material de construcción económico para fabricación de techos.
- Extracción de aceites aromático empleado en la industria del perfume (del 1 a 1.5% del peso en seco de la raíz es aceite aromático).
- Fuente de materia prima para la fabricación de extractos medicinales y aromaterápicos.

- Fuente de Mulch (restos vegetales, en este caso hojas cortadas) para protección del suelo.
- Materia Prima para la fabricación de Pasta de Papel.
- Repelente de insectos.
- Rehabilitación de áreas contaminadas y degradadas.
- Protección medioambiental.
- Especie pionera para reforestación de áreas problemáticas o difíciles.
- Creación, conservación y potenciación de sistemas agroforestales.
- Recarga de acuíferos y aguas subterráneas.
- Protección de cultivos.
- Protección y delimitación de vías y caminos.
- Protección y defensa de acequias y cursos de agua.

4.2.9 Estabilidad de los taludes.

El moderno desarrollo de las actuales vías de comunicación, tales como canales, caminos y ferrocarriles, así como el impulso de la construcción de presas de tierra, y el desenvolvimiento de obras de protección contra la acción de ríos han puesto al diseño y construcción de taludes en un plano de importancia ingenieril de primer orden.

Tanto por el aspecto de inversión, como por las consecuencias derivadas de su falla, los taludes constituyen hoy una de las estructuras de ingeniería que exigen mayor cuidado por parte del proyectista. No fue sino hasta el advenimiento de la Mecánica de Suelos cuando fue posible aplicar al diseño de taludes normas y criterios.

Estas normas y criterios apuntan directamente a la durabilidad del talud, esto es a su estabilidad a lo largo del tiempo.

Por otro lado para continuar con este capítulo es fundamental tener claro las diferencias que tienen las siguientes definiciones.

Ladera: Falda o vertiente de las montañas, formada en condiciones naturales de geología y clima, alteradas por las actividades humanas. También se designa como talud natural.

Talud: Se da el nombre de talud a toda superficie inclinada, que presenta una cierta pendiente respecto de la horizontal. Puede ser el talud natural, o el resultante de actividades de excavación y relleno.

4.2.9.1 Deslizamientos.

El término deslizamiento se refiere a uno de los tipos particulares de falla de taludes, en el cual la masa de suelo o roca se mueve hacia abajo y hacia afuera

de la pendiente topográfica, como resultado de una falla por corte en los límites o bordes de la masa.

En la geotecnia se prefiere hablar de movimientos de falla de taludes; estos pueden estar constituidos de suelo natural o rellenos artificiales, detritos o escombros de la meteorización (predominio de gruesos) y roca.

Los taludes pueden fallar en una variedad de formas o modos de movimiento y se puede dividir o clasificación en seis grupos predominantes según Varnes (1978):

Tabla 8 Clasificación de Movimiento Predominantes

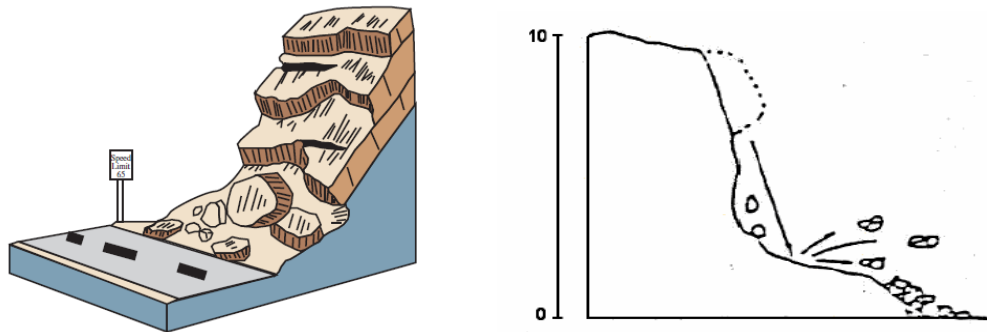
| No. Grupo | TIPO DE MOVIMIENTOS PREDOMINANTES | |
|-----------|-----------------------------------|--------------|
| I | CAÍDAS | |
| II | VOLCAMIENTOS | |
| III | DESLIZAMIENTOS | ROTACIONAL |
| | | TRASLACIONAL |
| IV | PROPAGACIÓN LATERAL | |
| V | FLUJOS | ROCAS |
| | | SUELOS |
| VI | MOVIMIENTOS COMPLEJOS | |

Fuente: Autor.

Los cinco primeros son básicos o simples, mientras que el sexto se refiere a casos que consisten de una combinación de dos o más de los anteriores, o de repetición de uno de ellos, como en la retrogresión. Los materiales se dividen en dos clases: **roca** y **suelo**; este último se subdivide en **detritos** y **tierra**, correspondiendo a los primeros con un contenido de gruesos mayor del 50%.

I) Caídas. En este tipo de movimiento una masa rocosa de cualquier tamaño se desprende de un talud empinado o un acantilado, a lo largo de una superficie sobre la cual ocurre muy poco o ningún desplazamiento, descendiendo principalmente a través del aire por caída libre, a saltos, rebote así como el rodado de fragmentos de roca a suelos (Figura 12).

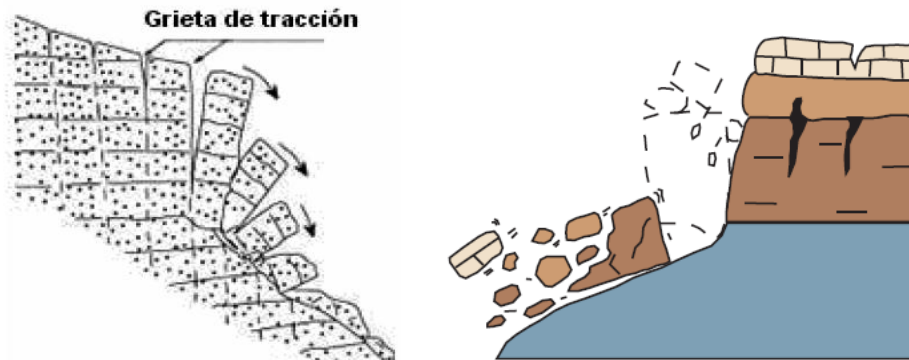
Figura 12 Caidas



Fuente: USGS, 2004 y Varnes, 1978.

II) Volcamientos: Es un movimiento debido a fuerzas que causan un momento de volcamiento alrededor de un punto de pivote situado bajo el centro de gravedad de la unidad. La superficie de rotura es cóncava hacia arriba (Figura 13).

Figura 13 Volcamientos



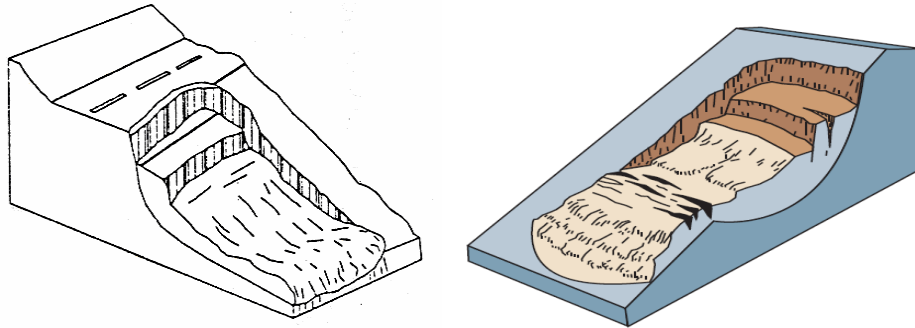
Fuente: USGS, 2004 y Margielewski, 2006.

III) Deslizamiento. Este movimiento consiste en deformación por corte y desplazamientos, a lo largo de una o varias superficies que son visibles o pueden inferirse razonablemente. Este grupo se divide en deslizamientos rotacionales y traslacionales.

a) **Movimientos rotacionales o hundimientos:** Son deslizamientos de masas de suelo, a lo largo de una superficie cóncava bien definida. El movimiento es en esencia de rotación alrededor de un eje paralelo al talud, y es por lo general profundo en suelos cohesivos relativamente homogéneos de gran espesor, como en coluviones, capas arcillosas gruesas, rellenos,

terraplenes y botaderos, aunque pueden ser superficiales en los mantos de suelo residual (Figura 14).

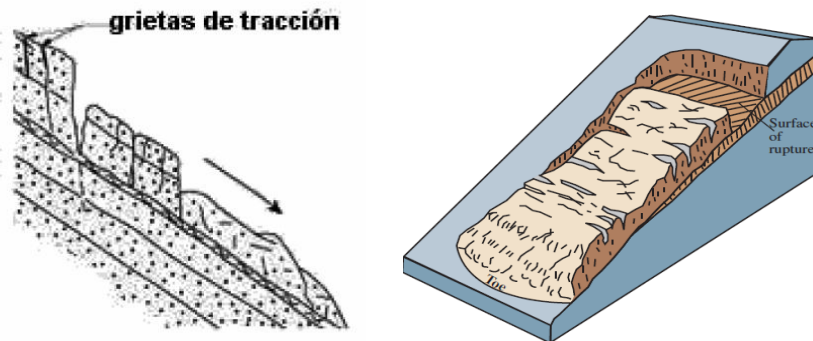
Figura 14 Deslizamiento rotacional



Fuente: García, 1996 y USGS, 2004

- b) **Deslizamientos trasnacionales:** Consiste en el movimiento de cualquier tipo de material a lo largo de superficies casi planas, conformadas por discontinuidades de cualquier tipo, ya sea estratificación, diaclasamiento, perfil de meteorización, o cualquier cambio en las propiedades mecánicas o en la continuidad del material. Es más común en taludes en roca, o en perfiles de meteorización (Figura 15).

Figura 15 Deslizamiento traslacional



Fuente: Margielewski, 2006 y USGS, 2004

- IV) Propagación lateral:** El movimiento se distribuye extendiéndose lateralmente en una masa fracturada. por lo general ocurren en pendientes muy suaves o terreno plano.

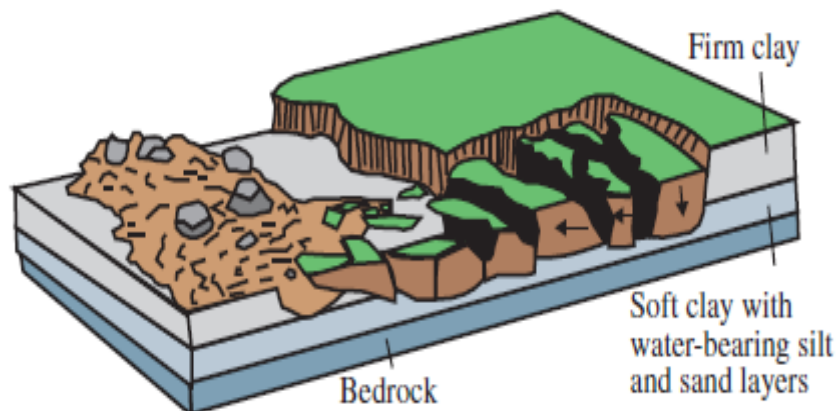
La falla es causada por licuefacción, el proceso mediante el cual se satura y se afloja, sedimentos cohesivos (generalmente arenas y limos), es decir se transforman de un sólido en un estado licuado. La falla por lo general es provocada por movimiento de tierra rápida, por ejemplo cuando se tiene un

sismo, pero también puede ser inducida artificialmente. Cuando el material coherente, o bien la roca madre o el suelo, se apoya en materiales licuables, las unidades superiores pueden sufrir fractura y extensión y luego puede disminuir, rotar, desintegrar o licuar y fluir.

La falla comienza de repente en un área pequeña y se propaga rápidamente. A menudo, la falla inicial es una depresión, pero en algunos materiales de movimiento ocurre sin razón aparente.

- a) Sin una superficie basal de corte o zona de flujo plástico bien definida (predominante en roca).
- b) La extensión en roca o suelo se produce por licuación o flujo plástico del material subyacente.

Figura 16 Propagación lateral



Fuente: USGS, 2004

V) Flujos: De acuerdo con Varnes (1978), un flujo es un movimiento espacialmente continuo, en el que la distribución de velocidades dentro de la masa se asemeja a la de un líquido viscoso; el límite inferior de la masa desplazada puede ser una superficie a lo largo de la cual tiene lugar un movimiento diferencial considerable o una zona alterada de gran espesor.

Los flujos pueden ser de las siguientes clases:

- Reptación.
- Flujos de tierra.
- Flujos de detritos.
- Flujos de lodo.

- Avalanchas.
- Lahares.

Entre los atributos de los flujos tiene importancia fundamental la tasa de movimiento, que puede fluctuar entre “extremadamente lento”, de unos pocos centímetros/año en la reptación, hasta “extremadamente rápido”, de varios metros/segundo en las cuatro últimas clases.

Otros atributos que se utilizan como criterios para identificación y clasificación son los siguientes:

- ✓ La localización geográfica del caso típico.
- ✓ La clase de material involucrado (rocas, detritos, suelos).
- ✓ El grado de meteorización de los materiales.
- ✓ La geometría del área del deslizamiento y del depósito resultante.
- ✓ La edad.
- ✓ Las causas.
- ✓ El grado de alteración de la masa desplazada.
- ✓ La existencia de una relación entre la geometría del deslizamiento y la estructura geológica.
- ✓ El grado de desarrollo.
- ✓ El estado de actividad

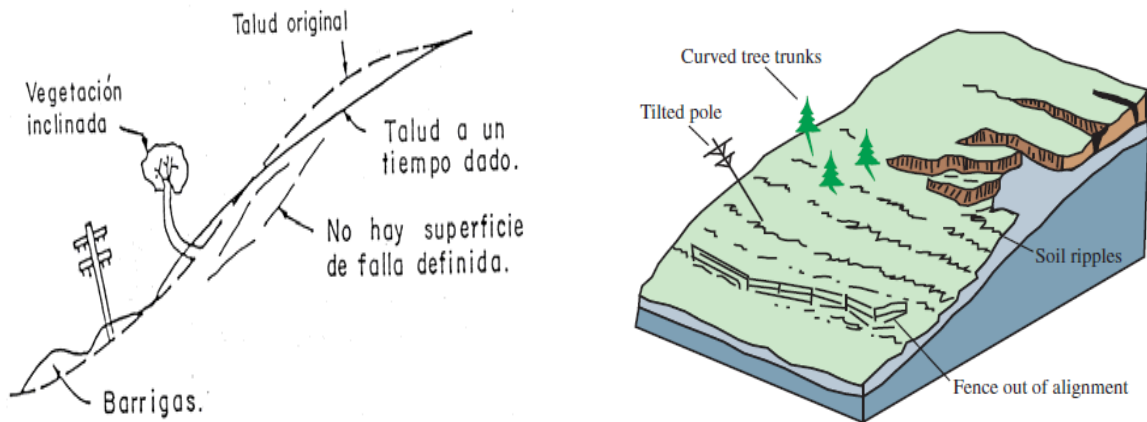
A continuación se describen los principales tipos de flujos⁶.

- a) **Movimientos lentos, de reptación o flujo plástico:** Se manifiestan como un desplazamiento muy lento de la parte superficial del terreno, aún en taludes con pendiente moderada y con cobertura vegetal. El movimiento llega a evidenciarse por la deformación del terreno, la formación de pliegues en las formaciones rocosas o de arrugas y escalones en las masas de suelo, la inclinación de árboles, la separación del suelo en contacto con grandes rocas, la migración de éstas, el corrimiento de líneas férreas y carreteras, el tensionamiento de cercas y raíces de árboles, etc.

En general, existen tres tipos de reptamiento: a) Estacional, donde el movimiento está dentro de la profundidad de los suelos afectados por los cambios estacionales en la humedad del suelo y la temperatura del suelo; a) donde la tensión de cizallamiento continuo, continuamente supera la resistencia del material; y c) progresiva, donde las pendientes están llegando el punto de falla como otros tipos de masas movimientos.

⁶ GARCÍA LÓPEZ, Manuel. Manual de estabilidad de taludes. Instituto Nacional de Vías. 1996

Figura 17 (a) Flujo plástico (creep o reptamiento)

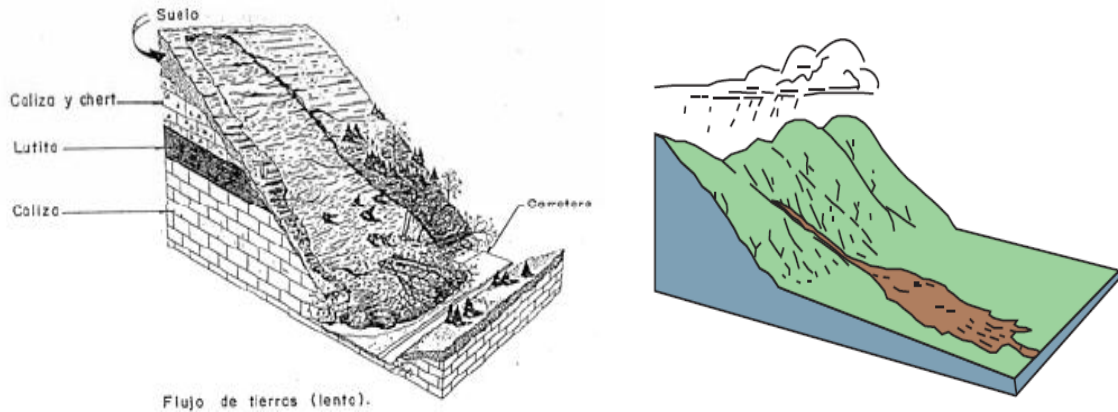


Fuente: USGS, 2004

b) Flujos de detritos y flujos de tierra: Por lo general son movimientos de velocidad variable entre rápido o muy rápido para los detritos y lentos de carácter viscoso en los flujos de tierra. Se forman en suelos o materiales provenientes de meteorización de las rocas, que pierden su estabilidad estructural por efecto del agua, originando desplazamientos con formas alargadas, lobuladas en su extremo inferior, también se pueden desarrollar a partir del cuerpo de otros tipos de deslizamiento, conformando movimientos complejos. El flujo en sí es alargado y por lo general ocurre en materiales de grano fino o rocas portadoras de arcilla en laderas moderadas.

En suelos residuales es frecuente que se originen los flujos como fallas de laderas en pequeños hundimientos sucesivos, o en series de movimiento traslacionales retrogresivos, dejando casi siempre en la corona una superficie cóncava típica. Abundan en regiones de Colombia los casos de flujos de detritos o de tierra en forma de una sección transversal oblicua de un reloj de arena, donde la parte superior está constituida por el deslizamiento de material meteorizado, seguido de un cuello angosto por el cual fluye el material, que en la base del talud se desplaza a la manera de abanico o cono de deyección. Con mucha frecuencia estos conos sepultan alcantarillas y pontones o desbordan muros de contención y se extienden sobre la calzada, o la atraviesa para crear problemas adicionales de arrastre de la banca y el talud exterior en sección a media ladera.

Figura 18 (b) Flujos de detritos y de tierra

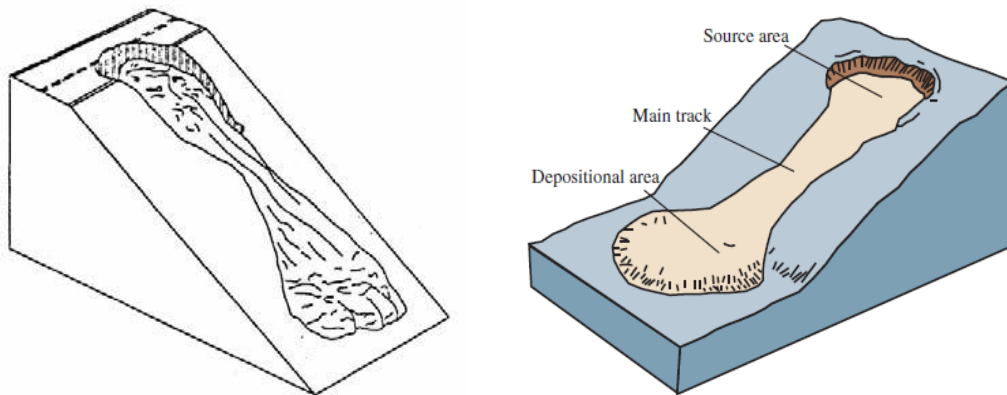


Fuente: USGS, 2004

c) Flujos de lodo: Se forman cuando una masa de detritos pierde resistencia por acción del agua hasta tener una consistencia blanda y fluida, generándose movimientos rápidos, dependiendo de la intensidad y duración de las lluvias y de la pendiente del terreno. El movimiento de los flujos de lodo es debido por completo a la gravedad y su velocidad depende en alto grado de la pendiente del terreno sobre el cual se mueven y de la viscosidad del lodo, con influencia de las dimensiones y la rugosidad del canal. Un flujo de lodo contiene al menos 50 por ciento arena y partículas de tamaño de arcilla, limos. Estos flujos tienen forma de lengüeta e inclinación que varía entre 5 y 15 grados en la superficie de los cuerpos de acumulación. En zonas de pendiente fuerte pueden alcanzar alta velocidad y grandes longitudes (distancias de recorrido), arrastrando e incorporando a su paso materiales sueltos de las paredes y fondo de cañadas. Se deduce que pueden adquirir enorme poder destructivo, y arrasar o cubrir con lodo y escombros las instalaciones que se hallen en su trayectoria. Los sitios de cruce de corrientes susceptibles de encauzar flujos de lodo, merecen especial cuidado.

En algunos casos, por ejemplo en muchos periódicos o informes, flujos de lodo y flujos de detritos son comúnmente denominados "deslizamientos de tierra."

Figura 19 (c) Flujo de lodos



Fuente: García, 1996 y USGS, 2004

VI) Movimientos complejos. Es posible que ocurra una combinación de los tipos básicos de movimiento. De acuerdo con García, (1996), en Colombia son comunes el hundimiento-flujo de tierras y la caída de rocas-avalancha de detritos. Los primeros se presentan casi siempre en deslizamientos rotacionales que adquieren una componente traslacional, en los cuales la masa se deforma y disgrega bastante por el corrimiento. El segundo tipo se presenta cuando lajas o bloques de roca se desprenden de laderas muy empinadas; estos bloques se desintegran al caer, arrastrando a su paso material alterado y vegetación, evolucionando en avalanchas debido a su alta energía cinética y a la pendiente del terreno.

Foto 8 Flujo de detritos en talud de la vía que conduce de Neiva a Vegalarga



Fuente: Autor.

4.2.9.2 Aspectos generales del papel de la vegetación en la estabilidad de laderas y taludes.

La vegetación tiene que ver con algunos de los siguientes aspectos (Gray y Leiser, 1982):

- **Intercepción:** El follaje y los residuos de las plantas absorben la energía de la lluvia y previenen la compactación del suelo por el impacto de sus gotas directamente sobre la superficie.
- **Retención:** físicamente, el sistema de raíces amarra o retienen las partículas del suelo, además, las partes aéreas funcionan como trampas de sedimentos.
- **Retardación:** Sobre la superficie, los residuos incrementan su aspereza, o dicho en otras palabras, aumentan el coeficiente de rugosidad del terreno, disminuyendo así la velocidad de escorrentía.
- **Infiltración:** las raíces y los residuos de las plantas ayudan a mantener la porosidad y permeabilidad del suelo.
- **Transpiración:** El agotamiento de la humedad del suelo por las plantas retrasa la saturación y con ello la aparición de escorrentía superficial; (Gonzales 1995) anota la importante función que cumple la vegetación en la regulación de humedad del suelo: arboles grandes individuales pueden absorber 100 a 150 litros de agua por día soleado.

Por otra parte, de forma ya no genérica sino aplicada, la vegetación cumple un importante papel en términos de la prevención de movimientos en masa, de manera especial con relación a los deslizamientos superficiales en laderas. A este respecta, las posibles formas en que la vegetación afecta el balance de fuerzas son (Gray y Leiser, 1982):

- **Refuerzo de las raíces:** Mecánicamente las raíces refuerzan el suelo al transferirle resistencia a la cizalladura con tensiones de resistencia en la raíz.
- **Modificación del contenido de humedad del suelo:** La evapotranspiración y la interceptación por el follaje limitan la aparición de esfuerzos en el suelo por humedad.
- **Apuntalamiento:** El anclamiento y embebimiento de las raíces hacen que estas actúen como pilares – puntales o contrafuertes – en las laderas, contrarrestando las tensiones por cizalladura; se dice que las raíces

actúan como anclas rígidas, favoreciendo el sostenimiento o restricción lateral contra el movimiento superficial del talud.

- **Peso de la vegetación:** Ejerce dos tipos de esfuerzos, uno desestabilizante hacia debajo de la pendiente y uno que es el componente perpendicular a la pendiente el cual tiende a incrementar la resistencia al deslizamiento.
- **Cuñamiento de raíces:** Tendencia de las raíces a invadir grietas, fisuras y canales y causar con ello inestabilidad local, especialmente en masas rocosas.
- **Remolinos:** Serpenteo del viento a través de los troncos de los arboles generando influencia deslizante por creación de montones de remolinos al chocar el viento con el tallo: el viento corre serpenteando por entre la vegetación.

Los tres primeros efectos incrementan la estabilidad de las laderas; el cuarto puede causar un impacto beneficioso o adverso dependiendo de las condiciones de suelo y de la pendiente; los dos últimos son efectos adversos a la estabilidad. El serpenteo del viento o remolinos, se dice que afecta especialmente a arboles de edades maduras o enfermos, caso de ventarrones bajos, los cuales corren paralelos a la superficie y crean disturbios sobre su capa superficial. (Hawley y Dymond 1988) exponen que el refuerzo por raíces y la transpiración tienden a reducir la incidencia de deslizamientos más que otros efectos de los árboles, tales como el peso y concentración de agua lluvia durante las tormentas, las cuales tendrían a incrementarla.

El refuerzo de las raíces es el mecanismo más obvio de influencia de la vegetación en la estabilización de vertientes; la entremezcla de raíces laterales tienden a unir el suelo con una masa única (Gray y Leiser 1982). En las vertientes las raíces principales pueden penetrar a través del suelo dentro de estratos firmes, anclándose e incrementando la resistencia a deslizarse.

Gonzales (1995) con relación a la resistencia que confiere las raíces al suelo, expone que el incremento en la resistencia al corte por la acción de ellas puede alcanzar el doble de su valor cuando estas no están presentes. Sin embargo, el refuerzo debido a la vegetación puede ser limitado por la conformación y distribución de los sistemas radicales, ya que no se puede garantizar en un posible movimiento en masa que las raíces atraviesen la superficie de falla, donde se da el efecto de refuerzo; si las raíces no la cruzan, sus efectos en la estabilidad del talud se limitan al control de la humedad del suelo y a la sobrecarga, pudiendo ser esta última desfavorable.

Gray y Leiser (1982), exponen que un suelo reforzado por raíces o fibras se comporta como un material compuesto en el cual las fibras relativamente elásticas con fuertes tensiones, se encuentran embebidas en una matriz y el material fibroso (raíces). Esto significa que esfuerzos de tensión en el suelo generan resistencia al suelo. Sin embargo, el papel que la vegetación puede cumplir en la prevención de movimientos en masa, está centrado principalmente en movimientos someros a medianamente profundos.

Aplicaciones del Vetiver:

- Considerando toda la bibliografía encontrada y los resultados obtenidos de los ensayos de corte directo sobre muestras sin y con Vetiver, en esta investigación; se puede considerar que la técnica de bioingeniería con Vetiver es una alternativa de control de erosión que previene el desarrollo de procesos transnacionales superficiales tales como: Propagación lateral, fallas planares, flujos plásticos (reptamiento) y pequeños desplazamientos.
- Funciona eficientemente en suelos residuales de comportamiento granular y cohesivo; sin embargo no se puede trabajar como una alternativa definitiva a la estabilidad, ya que este debe estar acompañado con obras de contención de corto tiempo como trinchos, muros de gaviones o terraceos que garanticen la estabilidad inicial del talud hasta el desarrollo necesario de la planta.

A continuación se evidencia la denudación de la ladera, la cual tiene una pendiente alta (50° a 60°), lo que ha activado un proceso de flujo que provoca la pérdida de recubrimiento vegetal, lo que infiere una profundización en la falla afectando un volumen mayor que pueden afectar las viviendas aledañas en la población de Vegalarga, objeto de estudio, como se puede apreciar en la siguiente Foto 9.

Foto 9 Alto riesgo de la población de Vegalarga, (Huila), por inestabilidad del terreno



Fuente: <http://www.rcnradio.com/noticias/habitantes-de-vegalarga-huila-se-encuentran-en-peligro-121201> (Publicado el 3 de marzo de 2014. Periódico digital).

Foto 10 Talud en la carretera Neiva-Vegalarga, flujos de tierra



Fuente: Autor.

Estos escenarios, donde todos estos deslizamiento pueden ser corregidos y, por consiguiente solucionados, sin emplear una obra de mano altamente especializada, maquinaria y especialmente fuertes inversiones económicas, mediante el empleo de pasto Vetiver al que ya se hecho referencia, para describir los beneficios de esta planta.

Perea, Carlos Alberto y Lizcano Durán, Jairo, en su trabajo de grado se preguntan: “¿Qué hace especial al vetiver? La respuesta se encuentra en las raíces, en las características fisiológicas y ecológicas de la planta y en su inherente habilidad para crecer sin convertirse en mala hierba y sin atraer plagas”⁷.

Las raíces del vetiver tienen un masivo, finamente estructurado sistema de raíces que es único. No se ha encontrado otra planta con raíces similares a las raíces del vetiver. La raíz del vetiver tiene una característica que lo diferencia de otras raíces de pastos y árboles; la característica es el poder de penetración. La fuerza innata y vigor de la raíz del vetiver, les permite penetrar a través de suelos difíciles, *hardpan*⁸, o capas de rocas con fracturas, incluso se las arreglan para perforar capas asfálticas. Sin rizomas o estolones, las raíces de la planta crecen rectas hacia abajo con una masa tan

⁷ PEREA, Carlos Alberto y LIZCANO DURÁN, Jorge. Uso del pasto Vetiver como una propuesta de Bioingeniería en la estabilización de taludes. Trabajo de Grado. Director Ing. Jaime Suárez Díaz. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, 2007, p. 68

⁸ Capa de suelo arcillosa localizada en o cerca de la superficie, producido por la cementación de partículas de suelo por materiales relativamente insolubles como sílice, óxido de hierro y materia orgánica. Una capa de grava parcialmente cementada, localizada en una excavación de un placer aurífero. Una capa cementada de arena y grava dentro de un till: pilas de sedimentos variados de origen glaciar. (Glosarios: <http://glosarios.servidor-alicante.com/geologia/hardpan>)

densa como la cantidad de hojas que produce por encima del suelo. Estas raíces penetran 3 a 4 metros en el sustrato antes del adelgazamiento.

Las raíces son de especial interés, debido a su sobresaliente resistencia a la tracción. Investigaciones realizadas por Hangchaovanich y Nilaweera - citados por Perea y Lizano-, muestran que la resistencia a la tensión, de las raíces del vetiver estuvo en el orden de 75 MPa. En el campo, por supuesto, el uso del acero es costoso y escaso, y el acero se empieza a deteriorar tan pronto es instalado. Por el otro lado el vetiver es barato, denso, y solamente prolifera con el tiempo, lo que ayuda a explicar porque se está convirtiendo en la cobertura favorita de la ingeniería⁹

Los resultados de su investigación se muestran en la siguiente Tabla 9, donde se evidencia la superioridad de las raíces del Vetiver en la resistencia a la tracción:

Tabla 9 Resistencia de las raíces de algunas plantas a la tensión

| NOMBRE BOTÁNICO | NOMBRE COMÚN | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (MPa) |
|-------------------------|-------------------|--------------------------------|
| Salix sp. | Sauce | 9-36* |
| Populus sp. | Álamos | 5-38* |
| Alnus sp. | Alisos | 4-74* |
| Pseudotsuga sp. | Abeto de Doyuglas | 19-61* |
| Hacer sacharinum | Arce plateado | 15-30* |
| Tsuga heterophylla | Cicutu del oeste | 27* |
| Vaccinum sp. | Gaylussacia | 16* |
| Hordeum vulgare | Cebada | 15-31* |
| ----- | Zacate, hierbas | 2-30* |
| ----- | Musgo | 2-7(kPa) |
| Chrysopogon zizanioides | Pasto vetiver | 40-120** |

Fuente: *Wu, 1995, ** Hengchaovanich y Nilaweera, 1996, en: PEREA y LIZCANO, p. 69.

Así mismo, debido a su denso y masivo sistema radicular subterráneo, el pasto vetiver ofrece un mayor incremento en la resistencia al cortante por unidad de concentración de fibra (6-10 kPa por kg de raíz por m³ de suelo) en comparación con 3,2 - 3,7 KPa por kg de raíz de árbol por m³ de suelo.

Como resultado de su investigación en la estabilización de autopistas, Hengchaovanich y Nilaweera, expresaron que las raíces del vetiver básicamente se comportan como clavos en el suelo o tacos, comúnmente usados en trabajos de estabilización de taludes de alto enfoque.

⁹ GRENFIELD, John, Citado por PÉREZ y LIZCANO, p. 68.

El vetiver, desarrolla nuevas raíces y brotes de la corona y nudos, cuando la planta es enterrada y atrapada en los sedimentos. La planta continuará creciendo y cubrirá el nivel de la superficie, con el nuevo nivel de desarrollo formando eventualmente terracetas¹⁰.

Foto 11 Trabajos de implantación del pasto Vetiver



Fuente: Autor.

Foto 12 Trabajo de campo: Pasto Vetiver sembrado en el talud. Vía Neiva-Vegalarga



Fuente: Autor

¹⁰ PEREA y LIZCANO, pp. 69-70

Foto 13 Pasto Vetiver después de un año de sembrado



Fuente: Autor

Foto 14 Plantas en desarrollo sembrada en talud. Vía Neiva-Vegalarga



Fuente: Autor

4.2.10 Determinación de la resistencia al corte método de corte directo según norma Invias – 154 – 10.

Introducción

El ensayo de corte directo es un ensayo muy sencillo y fácil de hacer. El ensayo consiste en colocar la muestra en la caja de corte constituida por dos marcos divididos horizontalmente, cuya parte inferior va fija y la superior queda libre para moverse y romper la muestra por su plano medio. Esta prueba se realiza en dos etapas, a saber:

- Consolidación, o aplicación de carga normal
- Corte propiamente dicho

Para la primera etapa se aplica una presión vertical conocida y se observa el movimiento del deformímetro hasta que cese el asentamiento bajo cada uno de los incrementos de presión aplicados. Usualmente en esta etapa se permite que se consolide completamente.

En la segunda etapa, para el corte, se aplica una fuerza horizontal al marco superior hasta que ocurra la falla de la muestra en el plano medio. Se prueban a la falla un mínimo de tres muestras, bajo tres diferentes cargas normales, para poder determinar una envolvente de rotura.

Este ensayo se puede realizar sobre todos los tipos de suelos o rocas, ya sean muestras inalteradas o remoldeadas, para la determinación de los parámetros de resistencia al corte “ c ” y “ ϕ ”.

4.2.10.1 Marco teórico y procedimiento.

La resistencia al esfuerzo cortante de un suelo es un importante parámetro de diseño en la Ingeniería Civil, ya que de este depende la capacidad del suelo de soportar cargas, estabilidad de taludes naturales y de corte entre otros. Este parámetro se puede evaluar en el laboratorio a través del ensayo de corte directo, o por medio del ensayo de compresión triaxial. En el campo existen formas de evaluar la resistencia al corte como la prueba de la Veleta y la prueba de Penetración Estándar, entre otros.

Para evaluar la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo es indispensable determinar el valor de los parámetros de cohesión (c) y ángulo de fricción interna del suelo (ϕ), ya que de ellos depende el espectro de respuesta del suelo bajo diferentes cargas determinadas; y además de ello, es necesario graficar la relación esfuerzo- deformación ($\sigma - \delta$) que permite estudiar el comportamiento futuro del suelo ensayado bajo las cargas por aplicar.

El valor de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo no es una constante de éste, puesto que *in situ* está fuertemente influenciada por los cambios en contenido de agua, en cargas y descargas. En el laboratorio influye, marcadamente en el valor obtenido: el tipo de ensayo, la velocidad de aplicación de las cargas y la perturbación que pueda sufrir la muestra. Además, la resistencia depende esencialmente del esfuerzo efectivo aplicado, que es el esfuerzo en el puro contacto entre las partículas, descontando la presión de poros.

La falla en el suelo se genera cuando existe la acción de un esfuerzo desviador que produce una combinación crítica entre el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante, esto debido a que el suelo reacciona diferente a un esfuerzo cortante cuando está sometido a diferentes cargas normales, el esfuerzo normal afecta una gran parte o casi toda la fricción o resistencia al corte. Además, la resistencia al esfuerzo cortante también depende de las condiciones en las que se encuentre el suelo en el campo, como el estado de consolidación y el drenaje, condiciones que se reproducen en el laboratorio con tres tipos de ensayos diferentes, a saber:

- Ensayo Tipo CD: Consolidado y Drenado (Ensayo lento) La fuerza normal se aplica y se deja desarrollar todo el asentamiento en la primera etapa y en la segunda se aplica la fuerza cortante lentamente, para evitar que se desarrollen presiones de poros.
- Ensayo Tipo CU: Consolidado y sin Drenar (Ensayo consolidado rápido) Se permite la consolidación en la primera etapa y en la segunda se aplican rápidamente las cargas para que no haya drenaje.
- Ensayo Tipo UU: Sin Consolidar y sin Drenar (Ensayo rápido) No se permite el drenaje en ninguna de las 2 etapas. El corte se inicia antes de que se consolide la muestra bajo carga normal.

Para el ensayo lento o consolidado rápido se debe dar el tiempo necesario para la completa disipación de la presión de poros antes de comenzar el corte (drenaje).

Observando el deformímetro vertical se puede determinar cuándo la consolidación se ha completado porque en este punto la comprensión cesa completamente.

Para los ensayos de corte sin drenar se obtiene substancialmente el mismo resultado al dar una velocidad de desplazamiento de 0,04" a 0,1" por minuto. Para ensayos de corte directo drenados la velocidad debe ser lo suficientemente baja para permitir el escape del agua de poros. Para muestras de arcillas de 3 pulgadas ² es satisfactorio una velocidad de 2×10^{-4} pulg / min. Aproximadamente se requieren 2 días para el corte de una muestra de 0.5" a una velocidad de 2×10^{-4} pulg / min.

La magnitud de las cargas normales que se van a aplicar en un ensayo de Corte Directo sobre suelos cohesivos depende del tipo de ensayo, naturaleza del suelo y de la información deseada de los resultados de ensayo.

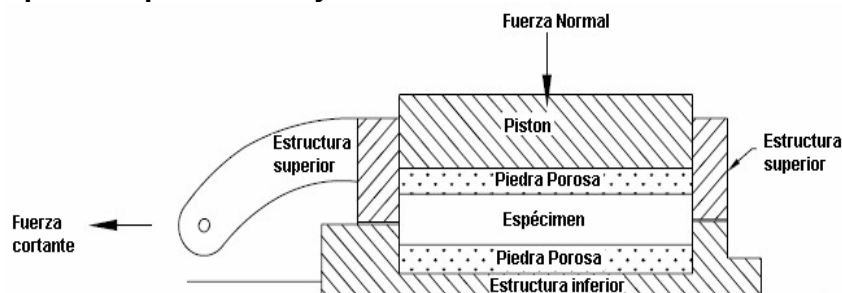
El Ensayo de Corte Directo (a estudiar en el presente trabajo), consiste en colocar la muestra en un caja de corte circular o cuadrada constituida por dos marcos divididos horizontalmente, cuya parte inferior va fija y la superior queda libre para moverse y romper la muestra por su plano medio. Esta prueba se realiza en dos etapas, dependiendo del tipo de ensayo que se requiera, (como se explicó anteriormente); la primera etapa básicamente consiste en la consolidación o aplicación de la carga normal, se aplica una presión vertical conocida y se observa el asentamiento bajo cada uno de los incrementos de presión aplicados. La segunda etapa consiste en el corte propiamente dicho, en esta etapa se aplica una fuerza horizontal al marco superior hasta que ocurra la falla de la muestra en el plano medio. Se prueban a la falla un mínimo de tres muestras, bajo tres diferentes cargas normales, para poder obtener el espectro de respuesta del suelo con la respectiva envolvente de falla.

El ensayo consiste en:

- a. Colocación de la muestra de ensayo en el dispositivo de corte directo. Aplicación de una carga normal determinada.
- b. Disposición de los medios de drenaje y humedecimiento de la muestra.
- c. Consolidación de la muestra bajo la carga normal.
- d. Liberación de los marcos que sostienen la muestra Aplicación de la fuerza de corte para hacer fallar la muestra.

Generalmente tres o más muestras son ensayadas, cada una bajo fuerza normal diferente, para determinar los efectos sobre la resistencia al corte y las deformaciones. El intervalo de las cargas normales usadas deberá ser el apropiado y en concordancia para las condiciones del suelo investigado.

Figura 20 Dispositivo para el ensayo del corte directo



Fuente: Autor.

Equipo

- Aparato de corte
- Anillo o marco cortador con la parte inferior afilada para preparar la muestra.
- Caja de corte
- Calibrador y nivel
- Cronómetro

Tipo de suelo para utilizar en la prueba: La prueba de corte directo se realizó a dos tipos de muestras que corresponden a Arena Limosa (SM) y a Arena Arcillo Limosa (SM-SC) con la presencia de pasto vetiver y sin él.

4.2.10.2 Procedimiento para ensayo de corte directo con muestra inalterada

De un bloque grande o de un tubo Shelby (4" de diámetro) se moldean 3 ó 4 muestras con un espesor de 2 a 3 cm y 5 cm de lado; si el molde es cuadrado, o de 2.5 cm de espesor y 6 cm de diámetro si es circular, además se deberá ayudar con el marco cortador para determinar muy bien las dimensiones de cada una de las muestras y lograr que sus pesos sean aproximadamente iguales. El moldeo de las muestras se debe llevar a cabo en un cuarto húmedo.

Las muestras se pesan y se miden después de haberse enrasado ambas caras. En suelos preconsolidados se pueden necesitar 6 muestras para realizar 2 ensayos de corte directo: uno con presiones menores a la carga de preconsolidación y otro con presiones iguales y mayores a dicha carga.

Se ensambla la caja de corte con los marcos alineados y se bloquea para no permitir efectos de corte prematuros en la muestra. Se lubrican con vaselina o grasa colocándose una ligera capa entre los marcos para lograr impermeabilidad durante la consolidación y reducir la fricción durante el corte. También se pueden usar espaciadores o superficies recubiertas con teflón, para reducir la fricción durante el corte. Se introduce la muestra de ensayo con sumo cuidado. Se conecta los dispositivos de carga y se ajustan los medidores de desplazamiento o lateral de corte, como los de cambio del espesor de la muestra, luego se determinará el espesor inicial de la probeta

Se coloca la muestra en la caja de corte cuyos marcos tienen piedras porosas ranuradas y saturadas para permitir el drenaje; centrando dicho conjunto en el dispositivo, y fijando con pasadores los dos marcos que deben tener como mínimo una separación apenas mayor que el tamaño de la partícula más grande del suelo. Centrar el marco de carga para aplicar carga vertical, seguidamente se instala el deformímetro donde se observarán los asentamientos en la etapa de consolidación hasta que cesen completamente, tomando el valor final de deformación. Los esfuerzos normales por aplicar varían de 0 a 10 Kg/cm².

Se debe permitir la consolidación de la muestra bajo una fuerza normal adecuada y previamente escogida. Inmediatamente después y tan pronto como sea posible aplicar la fuerza normal predeterminada, se llena el depósito de agua hasta un nivel por encima de la muestra, permitiendo el drenaje y por lo tanto la consolidación. El nivel del agua se debe mantener durante la consolidación y en las fases siguientes de corte de tal manera que la muestra esté saturada en todo momento. Durante el proceso de la consolidación se deben registrar las lecturas de desplazamiento normal, en tiempos apropiados, antes de aplicar un nuevo incremento de la fuerza. Cada incremento de la fuerza normal debe durar hasta que se complete la consolidación primaria. El incremento final debe completar la fuerza o esfuerzo normal especificado. Se utilizará un procedimiento análogo y basándose en los mismos criterios que sean aplicables a los descritos en la norma INV E – 151, “Consolidación unidimensional de los suelos”. Se representan gráficamente las lecturas del desplazamiento o de la deformación normal contra el tiempo.

Luego de terminada la consolidación se deben soltar los marcos desbloqueándolos y separándolos aproximadamente 0.25 mm (0.01"), para permitir el corte de la muestra. Se debe aplicar la fuerza de corte lentamente para permitir la disipación completa del exceso de presión de poros. Para determinar la velocidad de aplicación de la carga hasta la falla, se podrá usar como herramienta la siguiente expresión:

$$t_f = 50 t_{50}$$

Dónde:

t_f = tiempo calculado para la falla.

t_{50} = tiempo requerido por la muestra para lograr el 50% de consolidación bajo la fuerza normal.

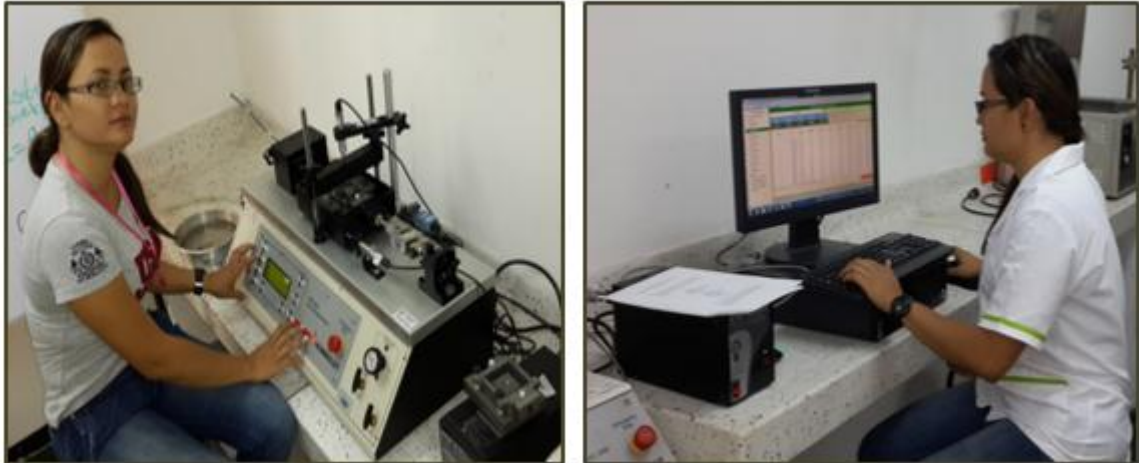
Los especímenes alterados e inalterados con y sin Vetiver ensayados para esta investigación fueron fallados a velocidades de 0.05; 0.25; 0.50; 1.00 mm/min, con esfuerzos de 0.25; 0.50; 1.00; 1.50 Kg/cm², con porcentaje de deformación de falla hasta del 23 % y se realizaron bajo las tres condiciones: No consolidado No drenado (UU); Consolidado No Drenado (CU) y Consolidado Drenado (CD).

Foto 15 Preparación de muestra para ensayo de corte directo y falla de la muestra



Fuente: Autor.

Foto 16 Ejecución del ensayo de Corte Directo



Fuente: Autor.

4.2.10.3 Procedimiento para ensayo de corte directo con muestra alterada.

Se moldean mínimo 3 muestras de suelo alterado, con un espesor de 2 a 3 cm y 5 cm de lado si el molde es cuadrado, o de 2.5 cm de espesor y 6 cm de diámetro si es circular; Las muestras se pesan y se miden después de haberse enrasado ambas caras.

Colocar la muestra en la caja de corte cuyos marcos tienen piedras porosas ranuradas y saturadas para permitir el drenaje, centrando dicho conjunto en el dispositivo, y fijando con tornillos plásticos los dos marcos que deben tener como mínimo una separación apenas mayor que el tamaño de la partícula más grande del suelo.

Se instala el marco de carga vertical y el deformímetro donde se observarán los asentamientos en la etapa de consolidación; se aplica la carga vertical. Los esfuerzos normales pueden variar de 0 a 10 Kg/cm². A cada muestra se le aplicara una carga diferente para esfuerzo normal, y cada carga debe aplicarse en por lo menos tres incrementos para efectuar la consolidación.

Si por ejemplo $\sigma_{n1} = 0,5 \text{ Kg/cm}^2$, $\sigma_{n2} = 1,0 \text{ Kg/cm}^2$ y $\sigma_{n3} = 1,5 \text{ Kg/cm}^2$

Área del marco cuadrado= $L * L = 5,0 * 5,0 = 25 \text{ cm}^2$

o Área del marco circular = $\pi * r^2 = 3.1416 * 3^2 = 28.27 \text{ cm}^2$

$$F_{v1} = 0,5 * 25 = 12,5 \text{ Kg}$$

$$F_{v2} = 1,0 * 25 = 25,0 \text{ Kg}$$

$$F_{v3} = 1,5 * 25 = 37,5 \text{ Kg}$$

Dichas cargas se colocan en tres incrementos para efectuar la consolidación así;

Para F_{v1} los incrementos serán: 0 - 4, 4 - 8, 8 - 12.5 Kg

Para F_{v2} los incrementos serán: 0 - 8, 8 - 16, 16 - 25 Kg

Para F_{v3} los incrementos serán: 0 - 12, 12 - 24, 24 - 37,5 Kg

Para la segunda etapa de corte, se desacopla el deformímetro y se acoplan los registradores de carga y desplazamiento horizontal y se aplican cargas tangenciales hasta la falla de la muestra. Se toman lecturas de las cargas aplicadas, para deformaciones controladas, se sabe que la muestra ha fallado porque el dial de carga se devuelve, registrándose lecturas menores.

Se repite el procedimiento en las otras 2 muestras para poder obtener la envolvente de falla. Se debe tener en cuenta que a cada una de las muestras ensayadas se les determine el contenido de humedad.

Cálculos

Se debe determinar lo siguiente: Contenido inicial de humedad, Densidad seca inicial, densidad húmeda inicial, esfuerzos normales y de corte, que se calculan de la siguiente forma:

Esfuerzo de corte nominal, que actúa en el espécimen:

$$\sigma = F / A$$

Dónde: σ = esfuerzo nominal de corte, en kPa, F = fuerza de corte, en N, y
 A = área inicial del espécimen, en mm².

Esfuerzo normal que actúa en el espécimen:

$$\sigma = N / A$$

Dónde: σ = esfuerzo normal, en kPa. A = Área del espécimen (cm^2)
 N = fuerza normal que actúa sobre el espécimen, en N.

La velocidad de desplazamiento. Se calcula la velocidad de corte real dividiendo el desplazamiento relativo lateral por el tiempo transcurrido o se reporta la velocidad usada para la prueba.

$$dr = dh / te$$

Dónde:

dr = velocidad de desplazamiento, Mm/min,
 dh = desplazamiento relativo lateral, mm, y
 te = tiempo transcurrido de la prueba, min.

Las deformaciones o desplazamientos laterales y normales.

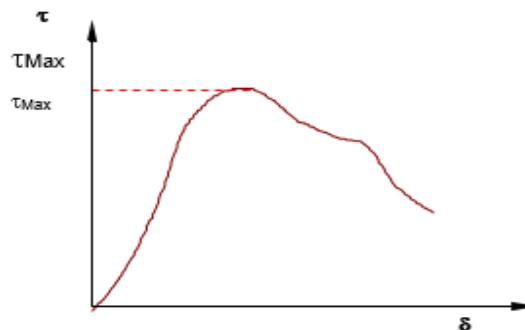
Relación de vacíos antes y después de la consolidación y después del ensayo de corte, si se desea.

Con los cálculos obtenidos en el formato, se deben realizar los siguientes gráficos:

4.2.10.4 *Esfuerzo cortante vs deformación.*

En esta curva sólo hay un máximo y se da el tipo de falla de acuerdo con el suelo ensayado.

Figura 21 Curva esfuerzo cortante – deformación



Fuente: Autor.

Para el análisis del comportamiento del suelo su curva esfuerzo - deformación se compara con los siguientes arquetipos de falla:

- *Falla frágil*: los materiales de “falla frágil” se caracterizan porque después de llegar el esfuerzo a un valor máximo bien definido descienden rápidamente al aumentar la deformación (ver Figura 23)

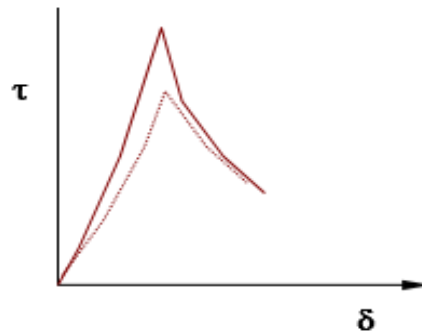
Figura 22 Eje de la falla predeterminada en el ensayo de Corte Directo



Fuente: Autor.

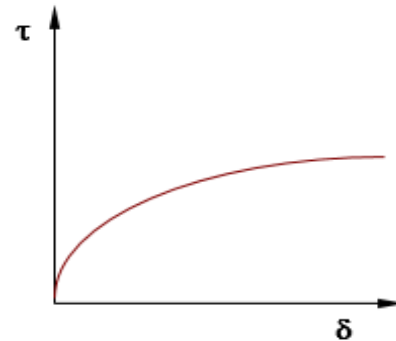
- *Falla plástica*: los materiales de “falla plástica” tienen una falla no muy bien definida pues en realidad es un flujo de material bajo esfuerzo cortante; el esfuerzo se sostiene aunque la deformación aumente. (ver Figura 23).

Figura 23 Falla frágil



Fuente: Autor.

Figura 24 Falla plástica



Fuente: Autor.

Recomendación: el ensayo de corte directo no debe hacerse en suelos de falla frágil pues la curva de esfuerzo – deformación obtenida para ellos resulta desplazada hacia valores menores del esfuerzo real, respecto a lo que se tendría con pruebas más adecuadas; proporcionando por tanto, valores muy conservadores. El hecho anterior se explica como sigue: cuando se inicia el movimiento del marco móvil, la deformación producida por la fuerza horizontal aplicada en la superficie de falla A' B' no es uniforme sino que existen concentraciones de deformación próximas a A' B' siendo menores en el centro de la muestra.

Las curvas esfuerzo - deformación de los suelos dan un comportamiento frágil o de falla súbita si están en los siguientes estados;

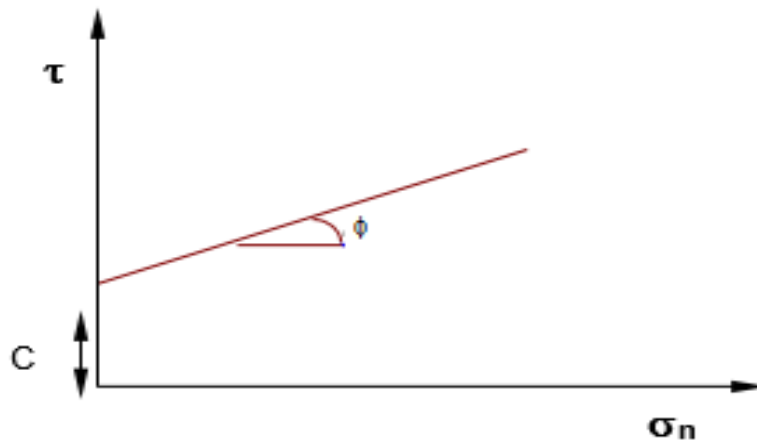
- Suelo cohesivo seco.
- Suelo inalterado con cementación intergranular como algunas arenas y arcillas normalmente consolidadas y sobreconsolidadas.
- Suelo compactado con humedades menores al óptimo de compactación (rama seca).
- Cuando la presión de confinamiento es muy alta, como 70 Kpa, en ensayos triaxiales sobre suelos densos como las arenas secas o húmedas.

4.2.10.5 Cortante máximo vs esfuerzo normal.

Donde se obtienen los parámetros de resistencia del suelo. En un gráfico de coordenadas, cuya escala horizontal obviamente debe ser igual a la vertical, se colocan como mínimo tres parejas de puntos y con ellos se traza la recta que mejor se ajuste, llamada “envolvente”.

El intercepto de la envolvente con el eje vertical da el parámetro del suelo llamado “cohesión” y la inclinación de la envolvente da el otro parámetro de resistencia del suelo, el ángulo de fricción “ ϕ ” (ver Figura 25).

Figura 25 Evolvente de falla



Fuente: Autor.

Valores típicos

Dependiendo de la consistencia del suelo, los valores de ϕ son mayores o menores que 30°

Tabla 10 Intervalo de valores típicos del ángulo verdadero de fricción interna para varios suelos.

| CLASE DE SUELOS | ϕ' | |
|----------------------------------|----------|---------|
| | Suelto | Denso |
| Arena, triturada (angular) | 32 – 36° | 35 – 45 |
| Arena de depósito (Sub angular) | 30 – 34 | 34 – 40 |
| Arena de playa (bien redondeada) | 38 – 32 | 32 – 38 |
| Grava, triturada | 36 – 40 | 40 – 50 |
| Grava, de depósito | 34 – 40 | 38 – 42 |
| Arena limosa | 25 – 35 | 30 – 36 |
| Limo inorgánico | 35 – 35 | 30 – 35 |

Fuente: Autor

4.2.10.6 Resistencia al corte

La resistencia al corte directo de los suelos es necesaria para evaluar problemas de: Estabilidad de taludes naturales y corte, capacidad portante del suelo y empujes de tierras sobre muros.

El análisis de estabilidad de estos problemas se realiza evaluando el esfuerzo cortante actuante sobre la superficie potencial de falla y comparándola con la resistencia al corte que ofrece el suelo en esa misma superficie.

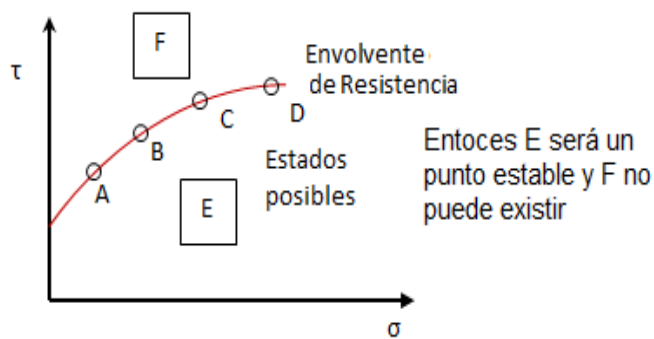
- Si la resistencia al corte del suelo es mayor que el esfuerzo cortante actuante, la condición es estable.
- Si la resistencia al corte del suelo es menor que el esfuerzo cortante actuante, la condición es de falla.
- Si la resistencia al corte del suelo es igual que el esfuerzo cortante actuante, la condición es de equilibrio.

Se define el factor de seguridad (FS) contra la falla por resistencia al corte de la manera siguiente:

$$FS = \frac{\text{Resistencia al corte del suelo}}{\text{Esfuerzo cortante actuante}} = \frac{\tau \text{ resistente}}{\tau \text{ actuante}} = \frac{\tau_{\text{falla}}}{\tau_{\text{actuante}}}$$

Considérese un conjunto de muestras de suelo idénticas. Se toma una de las muestras y se consolida bajo una presión igual en todos los sentidos, σ_{c1} ; después de consolidada la muestra se somete a unas condiciones de esfuerzo que lo llevan a la falla; los esfuerzos en el plano de falla serán σ_{f1} , τ_{f1} , este punto se representa en el diagrama siguiente como A. si el esfuerzo de consolidación σ_c se cambia a un valor mayor y se procede a fallar otras muestras consolidadas a valores mayores de esfuerzo σ_{c1} , se obtendrán otros puntos de esfuerzos (σ_{f1} , τ_{f1}) en la falla; graficando:

Figura 26 Evolución de resistencia y posibles estados



Fuente: Autor.

La envolvente de la resistencia al corte corresponde a la curva formada por todas las combinaciones de esfuerzos normales y esfuerzos cortantes que producen falla o ruptura del suelo. Por lo tanto una combinación de esfuerzos σ , τ por encima de la envolvente de resistencia nunca será posible.

La envolvente de resistencia al corte es propia de cada suelo y de ella va a depender el comportamiento del suelo en cuanto a la respuesta a los esfuerzos actuantes o aplicados.

4.2.10.7 Envolvente de resistencia de Mohr Coulomb.

En 1910, Mohr presentó una teoría de ruptura para materiales. De acuerdo con esta teoría, la falla a lo largo de un plano de un material ocurriría por una combinación crítica del esfuerzo normal y del esfuerzo cortante, y no por el esfuerzo normal o el cortante en forma separada. La relación entre el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante en el plano de falla se define por la ecuación siguiente:

$$\tau_f = c + \sigma_f \tan \phi$$

Donde c es la cohesión y ϕ es el ángulo de fricción del material.

En suelos, la resistencia al corte y los cambios de volumen dependen de los esfuerzos efectivos, por lo tanto, la envolvente de resistencia de un suelo según el criterio de Mohr Coulomb es:

$$\tau_f = c' + \sigma_f' \tan \phi' \quad ; \quad \sigma_f' = \sigma_f - \mu_w$$

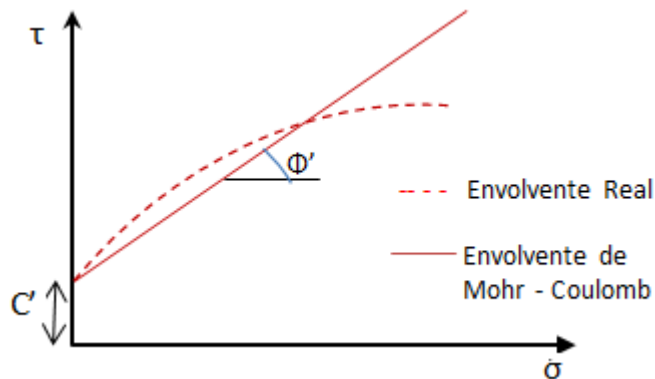
Donde

c' = Es la cohesión del suelo, ϕ = Es el ángulo de fricción interno del suelo.
 c' y ϕ' son los parámetros de resistencia al corte del suelo.

- Todos los suelos tienen un $\phi' > 0^\circ$
- $c' = 0$ en arenas, limos inorgánicos y arcillas normalmente consolidadas.
- $c' > 0$ En arcillas sobreconsolidadas.

La envolvente de resistencia de Mohr Coulomb es una recta y la envolvente de la resistencia del suelo es una curva, sin embargo, para el rango de esfuerzos, que se encuentran en la práctica de la ingeniería Geotécnica se puede aproximar la curva a una recta.

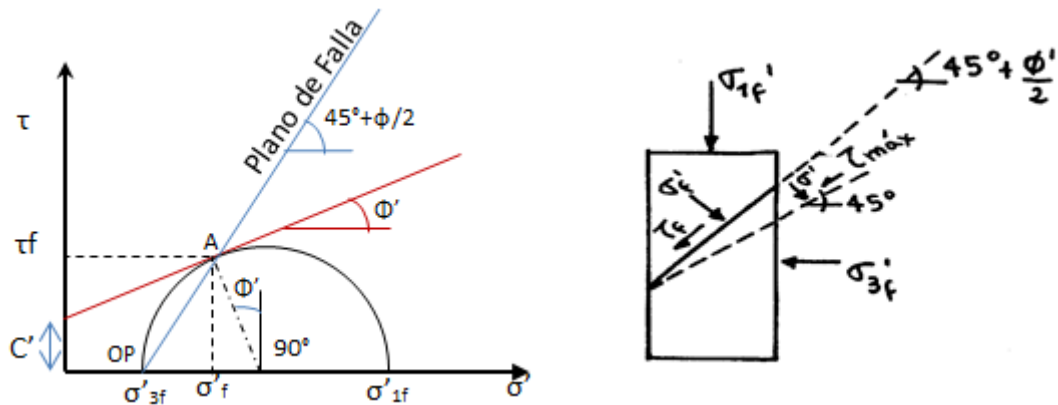
Figura 27 Envolvente de Mohr-Coulomb y Real



Fuente: Autor.

La teoría de resistencia al corte de Mohr Coulomb es, hasta el presente, en suelos el método más práctico para describir la resistencia al corte. Esta teoría establece que la falla en una masa de suelo se presenta no en el plano mayor de esfuerzos cortante, sino en aquel que presenta envolvente de resistencia $\tau_f = c' + \sigma_f' \tan \phi'$

Figura 28 Representación gráfica del plano de falla



Fuente: Autor.

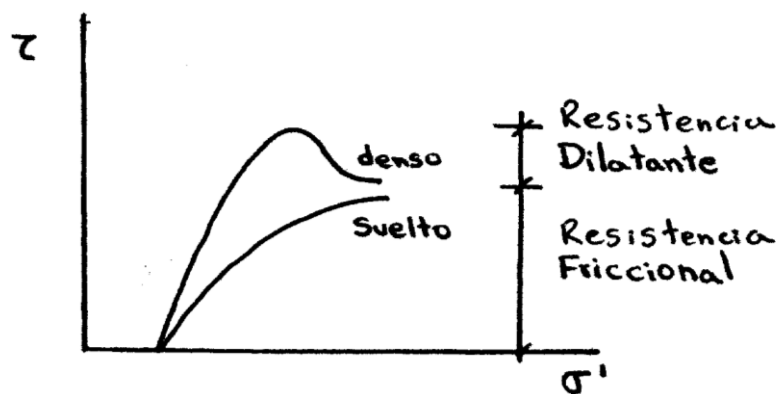
$\tau_{Max} = \frac{\sigma'_{1f} + \sigma'_{3f}}{2}$ y actúa en un plano a 45° con respecto al plano donde actúa σ'_{1f}
 $\tau_f = c' + \sigma'_f \tan \phi'$ y actúan en un plano a $45^\circ + \frac{\phi'}{2}$ con respecto al plano donde actúa σ'_{1f}

4.2.10.8 Resistencia al corte de los materiales granulares.

La resistencia al corte de los materiales granulares depende de:

- ✓ Relación de vacíos inicial: (e_o , D_r) Concepto de dilatancia.
- ✓ Forma de las partículas: rugosidad y angulosidad.
- ✓ Distribución granulométrica.
- ✓ Resistencia individual de las partículas en suelos de partículas grandes.
- ✓ Tamaño máximo de las partículas.

Figura 29 Comportamiento en Arenas del T vs σ'



Fuente: Autor.

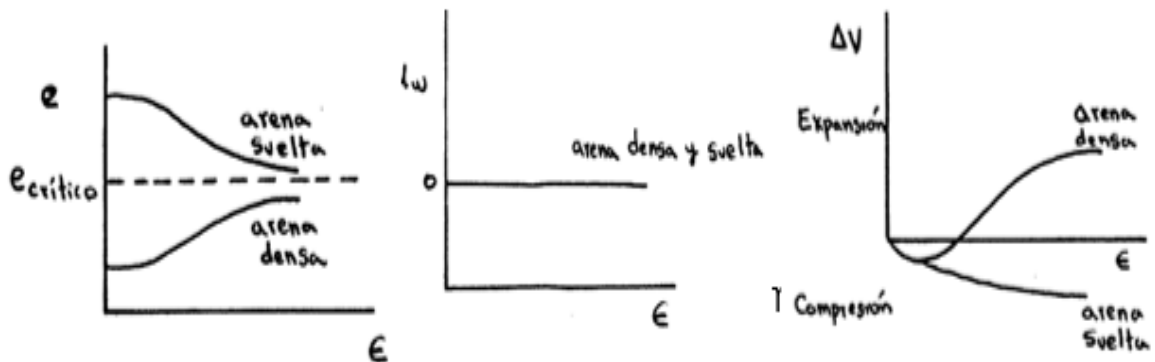
$$D_r = \frac{e_{max} - e_0}{e_{max} - e_{min}} * 100\% \quad ; \quad D_r = \frac{\gamma_{dmax}}{\gamma_{dmin}} = \frac{\gamma_{d0} - \gamma_{dmin}}{\gamma_{dmax} - \gamma_{dmin}} * 100\%$$

En la anterior Figura 29 se tiene que para una misma arena a menor relación de vacíos, e, mayor peso unitario seco, γ_d , mayor densidad relativa, D_r .

El trabajo por dilatación es el esfuerzo adicional para aumentar el volumen o la relación de vacíos.

En arenas es importante el concepto de relación de vacíos crítica. En ensayos de laboratorio de corte directo en arenas densas se ha observado una tendencia del suelo a dilatar a medida que se desarrolla el ensayo. En forma similar, en arenas sueltas el volumen disminuye gradualmente. Un incremento o una disminución en el volumen significan un cambio en la relación de vacíos. El efecto de cambio en la relación de vacíos con la deformación para arenas sueltas y densas se muestra en la siguiente Figura 30, junto con los cambios volumétricos y en presión de poros.

Figura 30 Comportamiento en arenas densas y sueltas

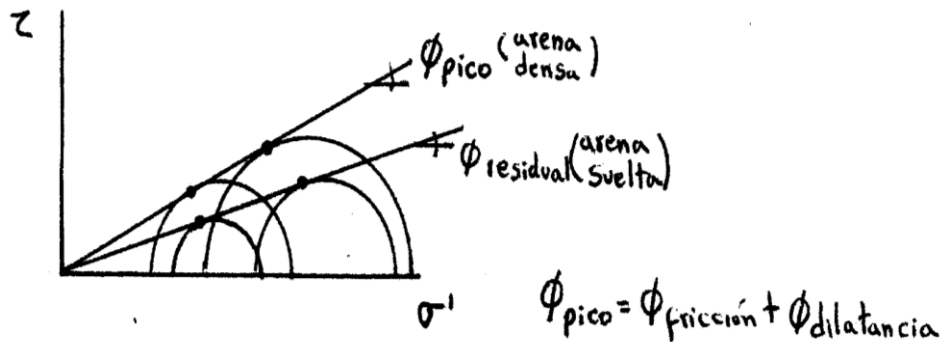


Fuente: Autor.

La relación de vacíos para el cual el cambio de volumen permanece constante durante corte se denomina relación de vacíos crítica.

En arenas, por la alta permeabilidad se hacen ensayos drenados, es decir, no se genera exceso de presión de poros durante el corte, $\Delta u = 0$ y por lo tanto $\Delta \sigma = \Delta \sigma'$. En arenas se tiene que la envolvente de resistencia cambia con la densidad.

Figura 31 Cambio de la envolvente de resistencia en arenas según su densidad



Fuente: Autor.

El concepto de relación de vacíos crítica fue utilizado primera vez en 1938 por Casagrande en el estudio de licuación de suelos granulares. Cuando un depósito natural de arena saturada que tenga una relación de vacíos mayor que la relación de vacíos crítica se somete a un esfuerzo de corte repentino (por ejemplo, debido a un sismo o a una voladura) la arena experimenta una disminución de volumen.

Esto resultará en un incremento en la presión de poros μ . A una cierta profundidad, el esfuerzo efectivo estará dado por la relación $\sigma' = \sigma - \mu$. Si σ (el esfuerzo normal total) permanece constante y μ se incrementa, el resultado será una disminución del σ' . Esto a su vez reduce la resistencia al corte del suelo. Si la resistencia al corte se reduce a un valor menor que el esfuerzo constante aplicado el suelo fallará. Y si se llega a la condición de $\sigma' = 0$, La resistencia al corte del suelo será también 0 ($\tau = 0$), esto se denomina licuación.

Tabla 11 Valores típicos de ϕ' pico y ϕ' residual

| Tipo de Suelo | | Φ' pico | Φ' residual |
|--------------------------|---------|--------------|------------------|
| Arena Granos Redondeados | Suelta | 28° - 30° | 26° - 30° |
| | Media | 30° - 35° | |
| | Densa | 35° - 38° | |
| Arena Granos Angulares | Suelta | 35° - 40° | 30° - 35° |
| | Media | 40° - 45° | |
| | Densa | 34° - 48° | |
| Grava | Arenosa | 34° - 48° | 33° - 36° |

Fuente: (Das, Braja Advanced Soil Mechanics).

Se observa en la Tabla 11 anterior la influencia de:

- La relación de vacíos inicial.
- Forma de las partículas.
- Distribución granulométrica.
- Tamaño de las partículas.

4.2.10.9 Factores que afectan la resistencia al corte.

Según los párrafos anteriores es evidente que la resistencia al corte de los suelos depende de:

- Presión efectiva o intergranular $\sigma' = \sigma - \mu$
- Trabazón de las partículas; partículas angulares dan mayor trabazón y mayor resistencia al corte por tanto mayor ángulo ϕ , que partículas redondeadas tales como gravas y arenas.
- Arreglo de las partículas (densidad).
- Cementación de las partículas, natural o de cualquier otra forma.
- Atracción entre partículas o cohesión. Obsérvese que la cohesión aparente debida a los efectos de capilaridad puede estar también presente.

4.2.10.10 Aplicaciones prácticas de la resistencia al corte

No obstante, enunciarse al comienzo de este capítulo, los diferentes casos en los cuales se necesita determinar los parámetros de resistencia, se hace hincapié sobre el uso del ensayo del Corte Directo en el estudio de estabilidad de taludes naturales y de corte, específicamente, puesto que representa muy bien la situación de campo; como también para determinar la resistencia residual de los suelos, capacidad portante, empuje de tierras sobre muros.

Observaciones

- El dispositivo de prueba para el ensayo de corte directo es sencillo y de operación rápida.
- El área de corte decrece a medida que avanza el ensayo.
- No se conoce la resistencia antes de que los esfuerzos sean efectivos.
- No se pueden controlar ni medir presiones de poros.
- El plano de falla es obligado.
- No se pueden determinar el módulo de Young E y la relación de Poisson.

- El espécimen delgado que se emplea; reduce considerablemente el tiempo de consolidación del mismo y por tanto la duración de las pruebas drenadas.
- Uno de los inconvenientes más importantes del ensayo de corte directo es que fuerza la dirección y la localización del plano de falla que es paralelo a la fuerza horizontal y está en la separación de los dos marcos de la caja de corte.
- No se recomiendan cargas grandes en ensayos no drenados por qué se hace muy difícil impedir el drenaje. Entre más grande sea la presión normal aplicada mayor será la tendencia al drenaje.
- El estado de esfuerzos de muestras en el ensayo de corte directo no se puede determinar completamente. Solo se conoce el esfuerzo normal y cortante sobre el plano A-B, y por lo tanto es imposible de construir un círculo de Mohr.
- A causa que la muestra está contenida en una caja rígida, se obliga a deformarse de una manera especial y las deformaciones unitarias no serán uniformes. Se produce falla progresiva.

Ventajas

- Es adecuado para determinar la combinación de esfuerzos (σ , τ) que producen la falla de un plano determinado de falla.
- Rápida ejecución, bajo costo y fácil interpretación.
- Se produce una consolidación rápida, porque la altura de drenaje es pequeña.
- Los parámetros de resistencia obtenidos (c , ϕ) son confiables sobre todo en arenas.

Conclusiones

- ❖ Se deduce que los parámetros de resistencia al corte de un suelo no son valores únicos sino que dependen principalmente del procedimiento de ensayo.
- ❖ A mayor carga normal, mayor resistencia al esfuerzo cortante.
- ❖ La magnitud de la carga normal no es importante en verdaderos ensayos rápidos sobre un suelo saturado.
- ❖ Según lo estudiado, se puede observar que la resistencia al corte depende de diferentes factores de suma importancia cada uno y varían de un suelo grueso a un suelo fino.

- ❖ En los suelos granulares no hay cohesión, por lo que la resistencia al corte depende primordialmente del ángulo de fricción interna (ϕ), y este a su vez depende de:

La trabazón entre las partículas: cuando el suelo está bien gradado presenta mayor compenetración entre las partículas, existe mayor área de contacto y por ende mayor fricción.

La densidad, tamaño y forma de los agregados, que también se encuentra en función de la granulometría.

- ❖ En los suelos gruesos influye más la trabazón entre las partículas, que la fricción directa entre las mismas, por tanto los valores del ángulo ϕ no son tan diferentes para un suelo húmedo que para un suelo seco, ya que en estos suelos, el drenaje es instantáneo.
- ❖ En los suelos finos el ángulo ϕ depende significativamente de la cohesión intergranular y de la densidad, y varía notablemente dependiendo de la velocidad de aplicación de las cargas, de las condiciones de drenaje, y sobre todo del contenido de agua.

5. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOMORFOLÓGICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

El presente capítulo incluye la información geológica, geomorfológica y una síntesis del marco geológico del área de estudio, de tal forma que permita conocer y explicar las diferentes unidades de roca y depósitos recientes presentes, así como también de forma clara las características principales en cuanto a geología, procesos tectónicos, geodinámica de la región y geomorfología, describiendo cada unidad presente en el área del proyecto, con el fin de establecer la condición general de la zona e identificar las condiciones del terreno.

En este contexto se llevan a cabo los estudios locales orientados a definir la estratigrafía y la tectónica local, de tal suerte que se tenga un mayor conocimiento desde el punto de vista geológico del sitio elegido para análisis.

La caracterización geomorfológica permite la identificación de los factores que intervienen en el modelamiento del paisaje tales como la roca fuente, la tectónica regional y local, los procesos erosivos los usos del suelo y el clima, principalmente.

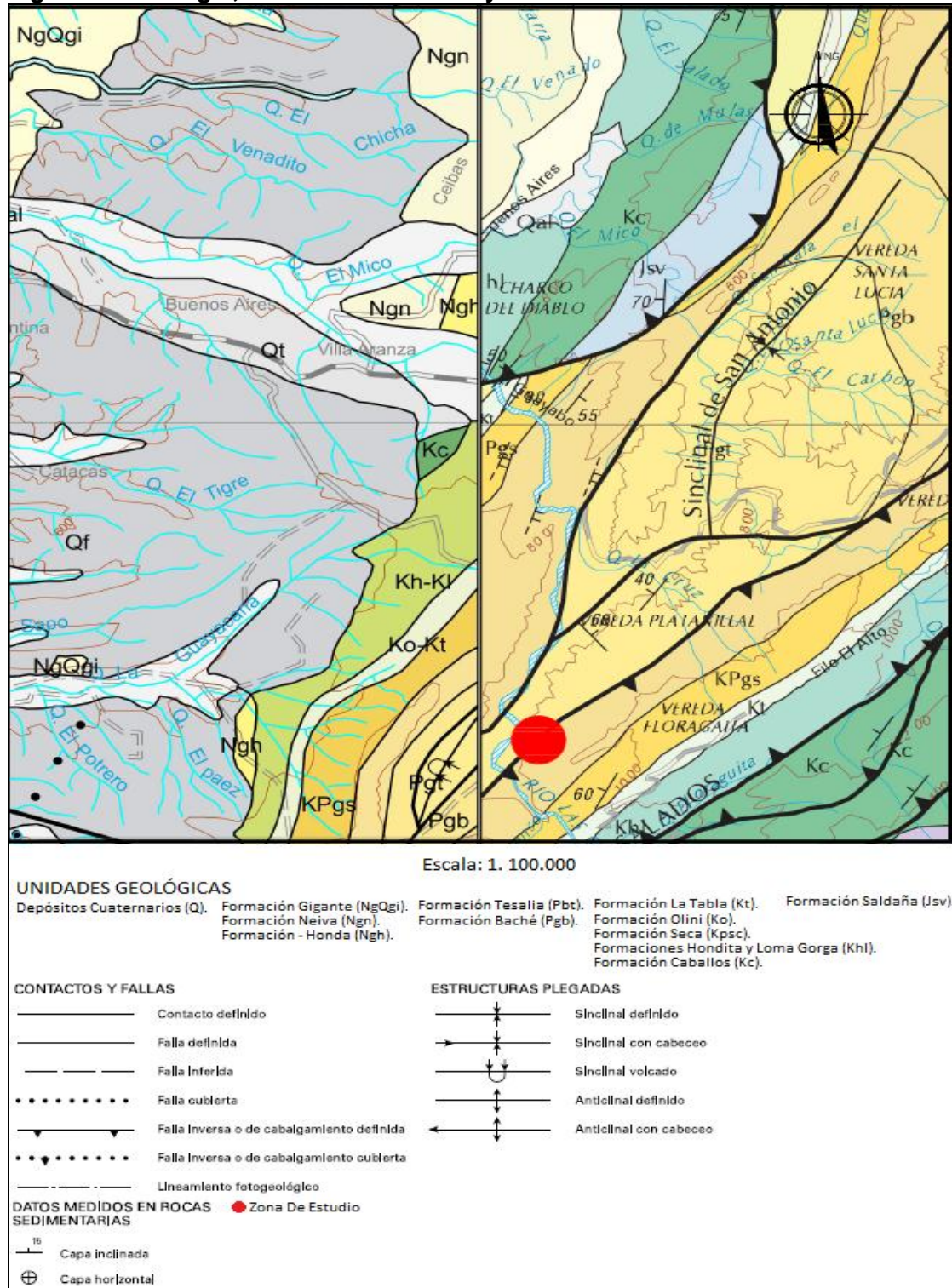
5.1. METODO DE TRABAJO

Se contempló una revisión de los estudios regionales realizados por El Servicio Geológico Colombiano, SGC, (antes INGEOMINAS), así como informes locales relacionados con el área de estudio, disponibles en entidades departamentales y locales. Como resultado se presenta un Mapa Geológico Regional en el cual se delimitan las diferentes formaciones y depósitos con las estructuras geológicas más relevantes a esa escala. Ver Figura 32.

Con base en la información existente y los objetivos del estudio, se realizó una revisión geológica y un análisis geomorfológico del área de interés mediante el uso de imágenes de Google Earth de muy buena resolución.

Las anteriores actividades permitieron delimitar las unidades de roca y los diferentes depósitos recientes; adicionalmente ayudaron a resaltar algunos rasgos geomorfológicos.

Figura 32 Geología, Planchas 323 Neiva y 324 Tello



Fuente: Ingeominas 1999.

5.2. DESCRIPCIÓN DE CONDICIONES GENERALES DEL TERRENO

El sector donde se realiza el proyecto se encuentra al suroccidente de Colombia entre las coordenadas E 880633 y N 811231 localizadas en las afueras de la ciudad de Neiva, más exactamente en la vía Neiva –Vegalarga.

En este sector las cordilleras Central y Oriental se aproximan de manera tal que se habla de la bifurcación andina, siendo una de las partes más altas de la cuenca del río Magdalena.

Fisiográficamente el área objeto de estudio se localiza entre la región que pertenece al Valle del río Magdalena y la Cordillera Oriental.

Morfológicamente el sector que comprende el estudio está conformado por una zona central suave a ondulada sobre el río Las Ceibas, y hacia el oriente y el occidente una zona central alta con alturas superiores a los 900 m.s.n.m.

Geológicamente la zona de influencia directa del proyecto está conformada principalmente por depósitos cuaternarios de origen aluvial, rocas sedimentarias del paleógeno, cretáceo y rocas ígneas jurásicas.

Hidrogeológicamente la región de estudio pertenece a la región hidrogeológica Andina – Vertiente – Atlántica y a la cuenca del Caribe, definida por presentar similares particularidades geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas, también características hidrogeológicas de sedimentos y rocas con porosidad primaria de interés hidrogeológico, conformada en su gran mayoría por rocas sedimentarias de ambiente transicional depositadas durante el Terciario y el Cretácico. Huguett et al., 1.989.

5.3. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

De acuerdo con el Servicio Geológico Colombiano (SGC), la región en donde se desarrolla el proyecto se identifican unidades geológicas con edades que abarcan desde el Jurásico, pasando por el Cretácico, Paleógeno hasta el Cuaternario.

En el presente capítulo se hace la descripción estratigráfica de estas unidades, que incluye entre otros aspectos sus características litológicas, la localización geográfica al igual que su edad etc.

5.3.1 Estratigrafía.

Según el SGC regionalmente las unidades geológicas aflorantes son Formación Saldaña (Jsv), Formación Caballos (Kc), Formaciones Hondita y Loma Gorda (Khl), Formación Olini (Ko), Formación La Tabla (Kt), Formación Seca (Kpsc), Formación Baché (Pgb), Formación Tesalia (Pbt), Formación - Honda (Ngh), Formación Neiva (Ngn), Formación Gigante (NgQgi), Depósitos Cuaternarios. A continuación se describen las unidades mencionadas anteriormente en períodos geológicos que van desde más antiguos hasta recientes.

JURÁSICO

- **Formación Saldaña (Jsv).**

En general predominan tobas, lavas y aglomerados con intercalaciones de rocas sedimentitas, esta unidad aflora al sur oriente del área de estudio.

CRETÁCICO

- **Formación Caballos (Kc).**

De acuerdo con el SGC La Formación Caballos aflora en la parte suroccidental de la Plancha 323 Neiva, Morfológicamente forma cimas redondeadas, longitudinales, con contrapendiente abrupta y pendiente moderada coincidente con la dirección topográfica y estructural de los estratos.

En general consta de areniscas de grano grueso con estratificación cruzada, presenta intercalaciones de lodolitas, areniscas y calizas, areniscas ferruginosas, glauconíticas hacia el techo.

La edad de esta formación según Vergara (1994) en la sección de la quebrada Bambucá, pertenece al Albiano inferior y medio, basado en los foraminíferos recolectados; Renzoni (1994).

- **Formaciones Hondita y Loma Gorda (Khl).**

La Formación Hondita aflora en la parte suroccidental de la Plancha 323, a manera de franjas orientadas en sentido suroeste y noreste, y cubre un área aproximada de 33 km². Morfológicamente abarca zonas planas a levemente onduladas.

Esta formación consta de intercalaciones de lodolitas, presenta calizas y areniscas de grano muy fino, calizas arenosas, fosforitas y liditas en capas delgadas a

medias. Ocasionalmente aparecen concreciones calcáreas mayores a 1 m en la parte superior.

La edad y correlación teniendo como base la fauna fósil de amonitas colectadas por varios autores, entre otros Etayo (1979), se puede afirmar que esta formación abarca desde el Albiano medio hasta el Coniaciano, en el Valle Superior del Magdalena.

Esta formación es correlacionable litológica y cronoestratigráficamente, con la parte inferior del Grupo Villeta.

- **Formación Olini (Ko).**

Cubre un área de 14 km² al oeste del río Magdalena; aflora en la parte sur occidental de la plancha 323, donde forma una franja delgada y sinuosa que corresponde al filo de Portachuelo.

Se conforma principalmente por un nivel inferior de chert y lodolitas limolitas silíceas, arenitas, roca fosfórica y lodolitas; un nivel intermedio de areniscas y un paquete superior de chert, areniscas y lodolitas silíceas.

Mediante un estudio de amonitas Etayo (1985) le da edad Santoniano al grupo en el Valle Superior del Magdalena.

- **Formación La Tabla (Kt).**

Abarca un área de 11,2 km²; aflora en la parte suroeste y en la zona central de la plancha 323, en forma de franjas alargadas sinuosas en dirección general noreste. Se conforma de areniscas cuarzosas blancas friables separadas por láminas medias de lodolitas negras.

La Formación La Tabla fue datada mediante asociación de foraminíferos como Maastrichtiano (Julivert, 1968) y se puede correlacionar litológicamente con las Formaciones Labor y Tierna del Grupo Guadalupe de la Sabana de Bogotá.

- **Formación Seca (Kpsc).**

Según el SGC aflora en la zona central de la Plancha 323, y abarca un área de 15 km². Forma franjas delgadas en sentido norte y sureste. Constituye zonas planas a levemente onduladas y extensas que alcanzan altitudes entre 500 y 700 m.

Se constituye de arenisca de grano fino a muy fino, separadas por capas medias de lodolitas abigarradas con restos vegetales. En la parte inferior se presentan arcillolitas de color rojo.

La Formación Seca es correlacionable litológica y cronoestratigráficamente con la Formación Guaduas de la Sabana de Bogotá y es sinónimo del Grupo Guaduala. Su edad es considerada como Maastrichtiano - Paleoceno, de acuerdo con Porta (1965) en el Valle Superior del Magdalena.

- **Formación Baché (Pgb).**

Aflora en la zona occidental de la Plancha 323, forma una franja alargada en dirección general norte sur, y abarca un área de 134,8 km².

Tiene 505 m de espesor, conformada por conglomerados, chert negro y pardo con estratificación cruzada, algunos niveles de lodolitas.

- **Formación Tesalia (Pbt).**

Aflora en el área con espesor de 334 m y consta de conglomerados estratificados en capas gruesas a muy gruesas, de carácter lenticular, en cuña y a veces muy masivas.

Se conforma de conglomerados, chert negros y pardos, presenta asociaciones de cuarzo en capas muy gruesas. Ocurre estratificación cruzada.

La edad asignada es Eoceno tardío en la en la subcuenca de Neiva, dada por varias compañías petroleras.

- **Formación Honda (Ngh).**

La unidad ocupa un área extensa en la parte central de la Plancha 323, a manera de franja ancha con dirección general N-S. Se presentan afloramientos menores en la vía Neiva – Tello.

Constituye un conjunto de areniscas grauváquivas de color gris, niveles conglomeráticos de chert negro y arcillolitas rojizas.

Guerrero (1993), le asigna una edad de Mioceno con base en fósiles y paleomagnetoestratigrafía, e indica que la Formación Honda fue depositada en el intervalo 13,5 a 11,5 millones de años.

- **Formación Neiva (Ngn).**

Esta unidad fue definida por Guerrero (1993) para agrupar las rocas de origen volcánico – sedimentario que reposan discordantemente sobre rocas del Grupo Honda y que afloran en la Subcuenca de Neiva.

Esta formación presenta origen fluvial con alguna influencia volcánica, las mejores exposiciones se encuentran en los alrededores de Neiva y se observan afloramientos en las carreteras Neiva – Aipe; Neiva – Tello y Neiva – Represa de Betania – Hobo.

La Formación Neiva está conformada por paquetes gruesos de conglomerados compuestos por guijos hasta de 10 cm de diámetro de rocas ígneas y metamórficas, con matriz arenosa limosa, intercalados con capas de arenitas y niveles delgados de lodolitas y cenizas volcánicas; la unidad tiene poca diagénesis.

Presenta una edad que corresponde al Mioceno Tardío.

- **Formación Gigante (NgQgi).**

La Formación Gigante está constituida por intercalaciones de arcillolitas rojizas, arenitas tobáceas friables de color crema y conglomerados en paquetes gruesos.

Intercalados con los niveles de arenitas aparecen capas gruesas de tobas de color gris claro, constituidas principalmente por pumita, vidrio volcánico y cuarzo.

Es correlacionable con el Grupo Huila en el sector meridional de la subcuenca de Neiva, presenta una edad correspondiente al Mioceno Tardío.

CUATERNARIO

- **Depósitos Cuaternarios**

Se encuentran ampliamente distribuidos, especialmente se están relacionados con las depresiones y valles de las corrientes más sobresalientes que drenan hacia el río Magdalena. Regionalmente se presentan varios tipos de depósitos cuaternarios de composición eminentemente sedimentaria, de origen fluvial a fluvio-torrencial y por efecto de la gravedad.

5.3.2 Geología Local.

Geológicamente, la zona de influencia directa del proyecto está conformada por depósitos cuaternarios que están asociados con los procesos de la dinámica fluvial del río Las Ceibas, y rocas sedimentarias que hacen parte de la Formación Baché (Pgb).

A continuación se efectúa una descripción de las unidades geológicas dentro del sector de estudio, desde la más antigua hasta la más reciente.

CRETÁCICO

- **Formación Baché (Pgb).**

Constituida principalmente por intercalaciones de lodolitas rojizas y conglomerados en capas muy gruesas, las lodolitas poseen laminación muy delgada no paralela, con lentes conglomeráticos compuestos por cantos de chert negro y pardo, algunos con límites poco definidos o transicionales y otros a manera de lentes muy definidos en forma de pequeños canales.

Los lentes aunque nos son muy comunes si son irregulares y casi siempre se orientan en sentido paralelo a la estratificación.

CUATERNARIO

- **Depósitos aluviales (Qal).**

Son depósitos ubicados en la llanura de inundación o ribera del río Las Ceibas de los ríos principales de la región; están conformados por bloques, gravas, arenas redondeadas y limos de baja compactación.

5.4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

A continuación se describe la falla más cercana y que podría tener alguna incidencia sobre el sector del proyecto teniendo en cuenta su cercanía.

- **Falla Potrerillos - Rivera.**

Es una falla inversa o de cabalgamiento de bajo ángulo, su trazo está sobre el oriente del área de estudio con cierta cercanía, presenta vergencia al noroccidente con una orientación preferencial N40°E. Conformar el límite entre el valle del río Magdalena y la Cordillera Oriental entre Gigante y Neiva.

Tiene una extensión aproximada de 80 km, se desprende de la Falla de Algeciras al oriente de Gigante, y pasa por la localidad de Potrerillos de donde toma su nombre. La falla pone en contacto rocas ígneas jurásicas sobre sedimentarias del Cretáceo.

5.5. MARCO METODOLÓGICO DE GEOMORFOLOGÍA

El objetivo principal de un análisis geomorfológico, es registrar información de las formas del terreno, los materiales (rocas o suelo) que las constituyen y los procesos superficiales que la afectan.

Teniendo en cuenta la propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia (Carvajal Perico 2012), la caracterización geomorfológica de una región se define haciendo énfasis primordialmente en los siguientes aspectos: formas del terreno de origen endógeno, exógeno o mixto; los procesos, específicamente aquellos activos en el presente, la génesis u origen y evolución a largo plazo y por último el contexto medioambiental.

“Los procesos geomorfológicos son dinámicos y obedecen a todos los cambios que ha sufrido la tierra desde sus comienzos, tanto aquellos originados en su interior (geodinámica interna o procesos endogenéticos), como los generados en su superficie para la interacción de la hidrosfera, la atmósfera y la biosfera (geodinámica externa o procesos exógenos).

Las formas de origen endógeno son el resultado de las fuerzas internas que han determinado el escenario sobre el cual actúan los procesos externos o exógenos de remodelado y reducción de los relieves primarios por la acción aislada o combinada de la meteorización física o química de las rocas, la erosión y el transporte de los materiales resultantes y de los fenómenos de remoción en masa.

Estos procesos que destruyen o modifican las geoformas iniciales son, a la vez, constructores de nuevas formas del terreno mediante la sedimentación o el depósito de los materiales transportados, estableciéndose un equilibrio denudación - acumulación cuya estabilidad depende de la resistencia y el tipo de roca o sedimento, y la acción y el tiempo de duración de los agentes ambientales propios de las condiciones climáticas prevalecientes.

En la mayoría de los métodos analíticos se busca representar de manera combinada aspectos morfométricos, morfográficos, morfogenéticos y morfocronológicos además de la litología, aspectos que son tenidos en cuenta en el presente documento.

Estos aspectos se definen a partir de la identificación de los factores que intervienen en el modelamiento del paisaje como son: la roca fuente, el clima, la precipitación, la tectónica regional y local, los diferentes procesos erosivos, y usos del suelo, entre otros; específicamente para el área de estudio se tuvieron en cuenta los conceptos de interpretación geomorfológica tomados de la propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia, (José H. Carvajal Servicio Geológico Colombiano, 2012), propiamente los de Van Zuidam (1985), con el fin de establecer los rasgos desde los generales hasta los específicos de la región, aspectos que se aprecian en la Tabla 12.

Tabla 12 Geomorfología y fisiografía, unidades geomorfológicas y procesos en el área de estudio.

| Geomorfoestructural | Provincia | Región | Unidades Geomorfológicas | Gran Paisaje (Subunidad) | Paisaje (Componente) | Origen | Unidad geológica | Proceso Morfo dinámico actual |
|---------------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---|-------------------------------------|---|
| Sistema Orogénico Andino. | Cordillera Central Y Oriental. | Ambiente Estructural. | Cauce Aluvial. | Llanura o Planicie Aluvial. | Planicie Aluvial. | Sedimentación Fluvial. | Depósitos Aluviales reciente (Qal). | Sedimentación fluvial y aluvial. |
| | | | Vallecito. | Valle Aluvial. | Zonas de valles (depresiones) | Deposición y acumulación de materiales aluviales. | Depósitos aluviales (Qal). | Sedimentación aluvial. |
| | | | Sierras estructurales | Laderas. | Zona montañosa. | Procesos endógenos y exógenos. | Formación Baché (Pgb). | Acción de procesos erosionales y estructurales. |

Fuente: Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia, José Henry Perico Carvajal. Servicio Geológico Colombiano 2012.

De acuerdo con los procesos que dieron origen al modelamiento de forma de la superficie terrestre presente en la zona de estudio, se distinguen las siguientes grandes unidades según su origen:

- **Unidades de origen Depositional**

Formadas por la acumulación de fragmentos o sedimentos de unidades preexistentes.

En el sitio de estudio se distinguen las unidades definidas como cauce aluvial y depósitos cuaternarios, asociados con los ríos de la región, principalmente el río Magdalena y Las Ceibas.

- **Unidades de origen Estructural**

Representan aquellas geoformas que por las fuerzas internas de la corteza terrestre configuran el paisaje, dando lugar a serranías como las que se encuentran en la parte oriental de la zona de estudio (Formación Baché) con una dirección preferencial N -S.

En el área de estudio se presentan diversas unidades geomorfológicas que según la clasificación mencionada en la Tabla 12 se describen de la siguiente manera.

- **Unidades geomorfológicas agradacionales:**

Cauce aluvial (CA).

El río Las Ceibas es una geoforma dinámica sujeta a rápidos cambios en el modelado del cauce por la dinámica de la corriente los caudales y la carga de sedimentos determinan las dimensiones del cauce. El patrón del río es de carácter meándrico.

Vallecito (V). Formado por acumulación de materiales transportados recientemente por el río Las Ceibas y otros afluentes de la zona.

Constituyen zonas bajas que son expuestas en ambos márgenes del río, las cuales no presentan diferencias marcadas en altura. Generan un relieve semi ondulado en forma de V.

- **Unidades geomorfológicas estructurales:**

Sierras Estructurales (Se).

Se encuentran hacia los costados de la zona de estudio, representan terrenos elevados y geoformas que generan lomos redondeados y zonas de laderas que en muchos casos están cubiertas por vegetación.

Este tipo de relieve se encuentra expuesto a los procesos ambientales (agua y aire) y a los procesos tectónicos los cuales van remodelando y transformando con el paso del tiempo estas geoformas.

6. DISEÑO EXPERIMENTAL

6.1. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL EN LA ZONA DE ESTUDIO

Introducción

En términos generales los materiales se pueden clasificar como suelos gruesos (granulares) y suelos finos o arcillosos, esta clasificación o primera aproximación a una clasificación, tan general cubre una gran cantidad de suelos con propiedades físicas y mecánicas muy diferentes desde el punto de vista de su uso en ingeniería, lo cual hace conveniente la utilización de un sistemas de clasificación que nos permitan dar un nombre a los diferentes suelos, que componen la gran gama en los que se desenvuelve la ingeniería, y que poseen características similares de comportamiento y transmitir la información acerca del mismo en forma comprensible y precisa.

Adicionalmente un sistema de clasificación de suelos facilita la comunicación entre grupos de ingenieros que empleen el mismo método, en otras palabras es un lenguaje de comunicación.

A través del tiempo numerosos sistemas de clasificación han sido propuestos y todos usan los tamaños de partículas para diferenciar los diferentes suelos como gravas, arenas, limos y arcillas.

Y estos complementados con características de las propiedades índice de las diferentes fracciones de suelo permiten una clasificación de los diferentes tipos de suelos.

Actualmente existen dos sistemas de clasificación con un reconocimiento universal y estándar, para dos usos diferentes, pero con criterios similares en su algoritmo de clasificación. El sistema USCS y el sistema AASHTO, el primero de uso común en la práctica de la ingeniería y el segundo en las labores de la ingeniería de vías y caminos.

Los dos sistemas mencionados anteriormente utilizan dentro de los parámetros de clasificación las siguientes características:

- ✚ Distribución granulométrica.
- ✚ Índices de plasticidad.

6.1.1 Procedimientos del análisis granulométrico y resultados de ensayo.

Para la caracterización de los suelos encontrados en la zona de estudio, se realizaron ensayos siguiendo los procedimientos establecidos en la normas del Instituto Nacional de Vías INVIAS 2010. Además de utilizarse el sistema unificado USCS para su respectiva clasificación, este es usado en la geotecnia para clasificación de partículas de tamaño menor a 3" y obras civiles en general. Este sistema consiste en la ejecución de un análisis granulométrico por tamizado, mediante el cual se clasifica el suelo en grano grueso o fino dependiendo del porcentaje que pase por el tamiz No.4, Adicionalmente se puede establecer si la distribución granulométrica del suelo es buena o mala, de igual forma se puede cuantificar cada uno de los porcentajes que pasan y se retienen por los respectivos tamices y por último se determina si es necesario conocer los límites de consistencia de Atterberg; lo anteriormente dicho depende del porcentaje que pase por la malla No. 200, si es superior o igual a 12%, se considera que se debe evaluar los diferentes estados del suelo tales como el límite líquido, plástico y si es necesario el de contracción, y los datos encontrados deberán presentarse mediante la carta de plasticidad propuesta por A. Casagrande, compuesta por ordenadas con los valores calculados del índice de plasticidad y en las abscisas los valores obtenidos del límite líquido, de esta forma podemos clasificar y darle una simbología que caracterice el suelo.

A continuación se presenta un claro ejemplo utilizando los datos de una de las granulometrías con material característico de la zona de estudio.

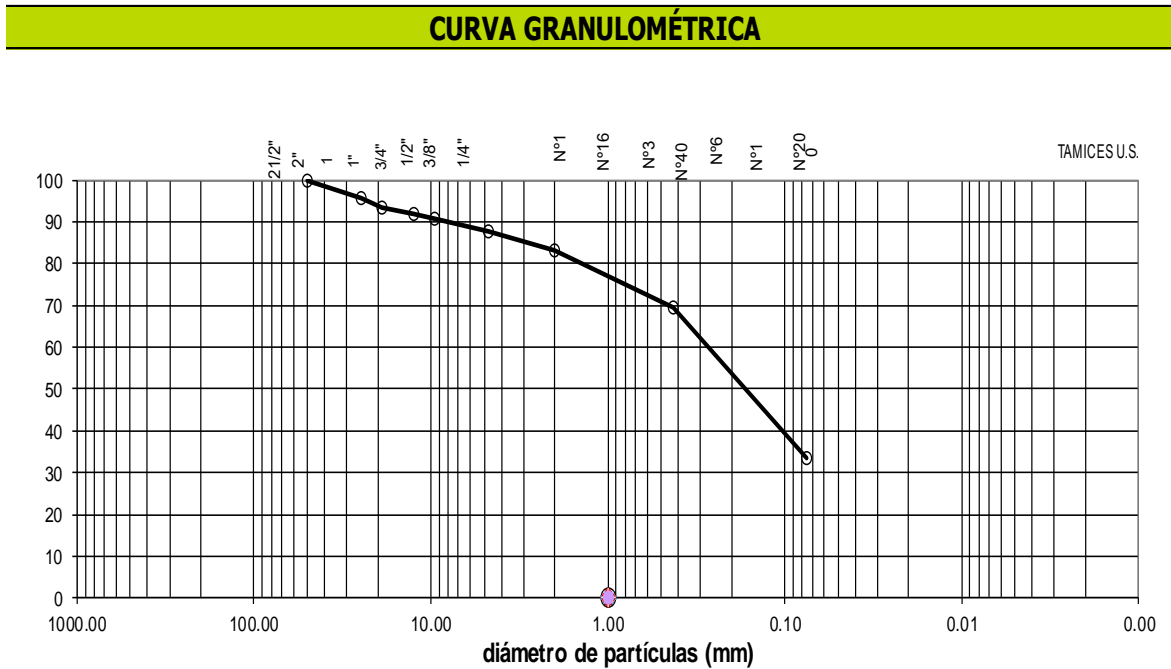
Tabla 13 Datos de Análisis Granulométrico para una Arena Limosa – SM

| Tamiz Normal | Tamiz alternati. | Peso Retenido | % Retenido | % retenido acumulado | % Pasa |
|--------------|------------------|---------------|------------|----------------------|--------|
| 50.00 | 2" | | | | 100.0 |
| 25.00 | 1" | 72.0 | 4.3 | 4.3 | 95.7 |
| 19.00 | 3/4" | 38.1 | 2.3 | 6.6 | 93.4 |
| 12.50 | 1/2" | 26.2 | 1.6 | 8.2 | 91.8 |
| 9.50 | 3/8" | 15.9 | 1.0 | 9.1 | 90.9 |
| 4.75 | No 4 | 52.2 | 3.1 | 12.2 | 87.8 |
| 2.00 | No 10 | 78.6 | 4.7 | 16.9 | 83.1 |
| 0.43 | No 40 | 227.9 | 13.6 | 30.6 | 69.4 |
| 0.075 | No 200 | 598.0 | 35.8 | 66.3 | 33.7 |
| Fondo | | 5.8 | 0.3 | 66.7 | 33.3 |
| Total | | 1114.7 | | | |

| | |
|-------|-------|
| Grava | 12.23 |
| Arena | 54.11 |
| Fino | 33.66 |

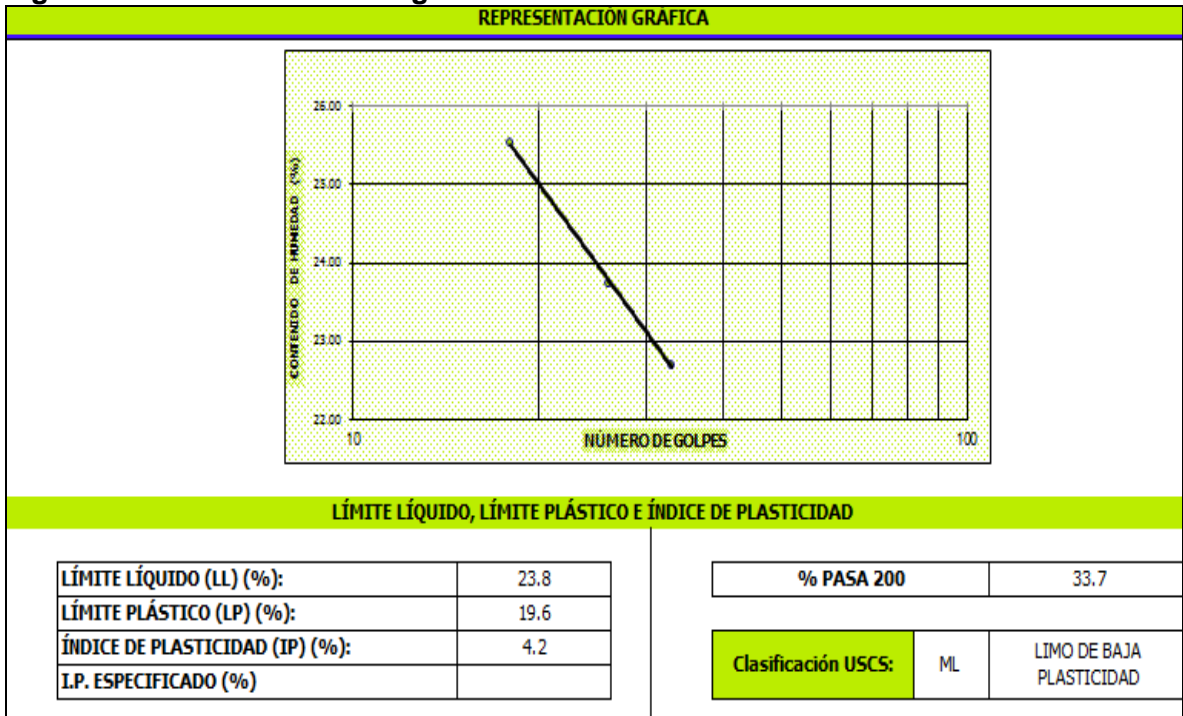
Fuente: Autor.

Figura 33 Curva granulométrica para Arena Limosa - SM



Fuente: Autor.

Figura 34 Límites de Atterberg en Arena Limosa - SM



Fuente: Autor.

Foto 17 Análisis granulométrico y Límites de Atterberg



Fuente: Autor.

En el área de estudio según los ensayos realizados y analizados se concluye que el material predominante corresponde a Arena limosa (SM) y a Arena arcillo limosa (SM-SC). Como complemento al análisis y para la caracterización del material se efectuaron pruebas adicionales tales como: gravedad específica arrojando valores aproximadamente de 2.62, contenido de materia orgánica por colorimetría arrojando valores en la escala de Gardner de 8 y 11 y en el colorímetro de 2 y 3, el valor menor corresponde al material sin Vetiver mientras que el otro es con presencia del vetiver, evidenciando un bajo contenido de material orgánico, el cual resulta beneficioso en el sentido de que se considere reforzar el talud con obras complementarias en concreto o mortero, por otro lado se obtuvieron pesos unitarios seco con muestras inalteradas de $2.1 \text{ (gr/cm}^3\text{)}$, contenido de humedad que varían de 6 a 7 % sin vetiver y de 7 a 8 % con vetiver; todos estos ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio de la Universidad Cooperativa de Colombia sede Neiva.

A continuación se presenta una evidencia del trabajo realizado.

Foto 18 Ensayos de Gravedad específica en arenas, Densidad máxima, y Contenido de materia orgánica



Fuente: Autor.

Adicionalmente se realizaron pruebas en el campo tales como: densidad con el cono de arena dando valores de $1.62 \text{ (g/cm}^3\text{)}$, se determinó la permeabilidad in situ por el método de pozo de absorción calculándose un $K= 3.658 \cdot 10^{-4} \text{ cm/seg}$, se determinaron las áreas en la zona de estudio, con ayuda de un medidor de distancias "Keson" RR3M y cinta métrica, corroborando con Autocad, el cual arrojo pendientes que van desde 35 a 80 grados y un área aproximadamente de 1.309 m^2 .

Foto 19 Toma de densidades en campo, mediciones de la zona y permeabilidad del material



Fuente: Autor.

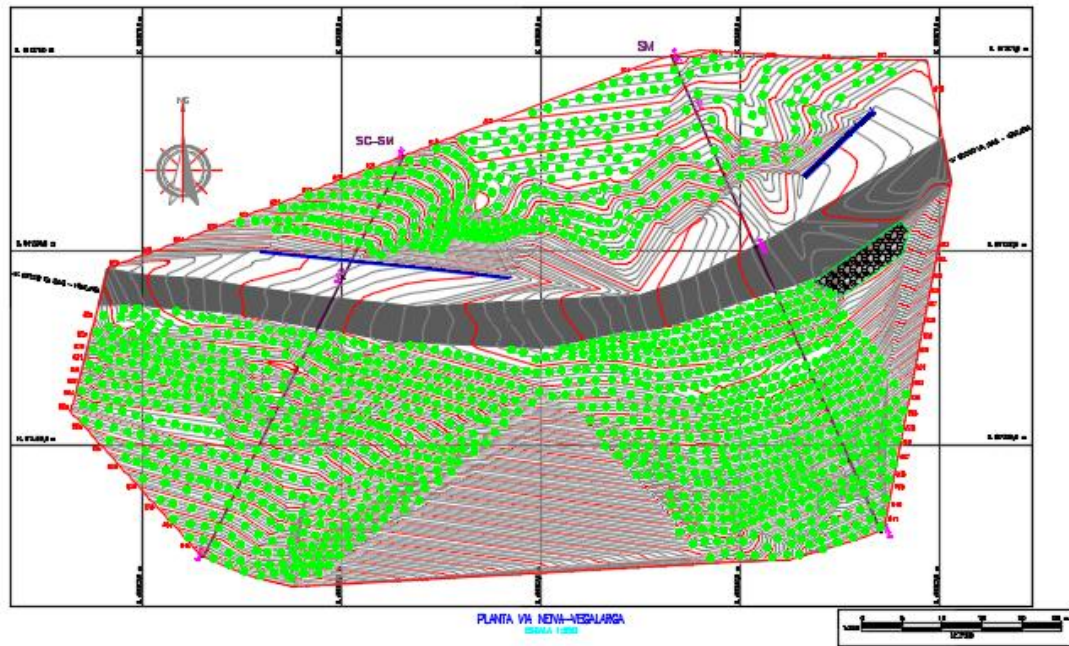
También se obtuvo mediante un levantamiento topográfico inicial y final utilizándose una estación total GOWIN TKS 202 con precisión de tres milímetros, los perfiles de la zona y la respectiva topografía, donde se encontró un movimiento de 2.5 cm de desplazamiento según puntos de control inicialmente puestos, este desplazamiento fue el encontrado luego de tres años. Lo anterior se considera que fue debido a que inicialmente la planta no se había desarrollado y no estaba dando su mayor aporte, pero actualmente se tomaron nuevos registros en donde se evidencia que no hubo más movimiento en la masa.

Foto 20 Trabajo de campo para el levantamiento topográfico en la zona de estudio



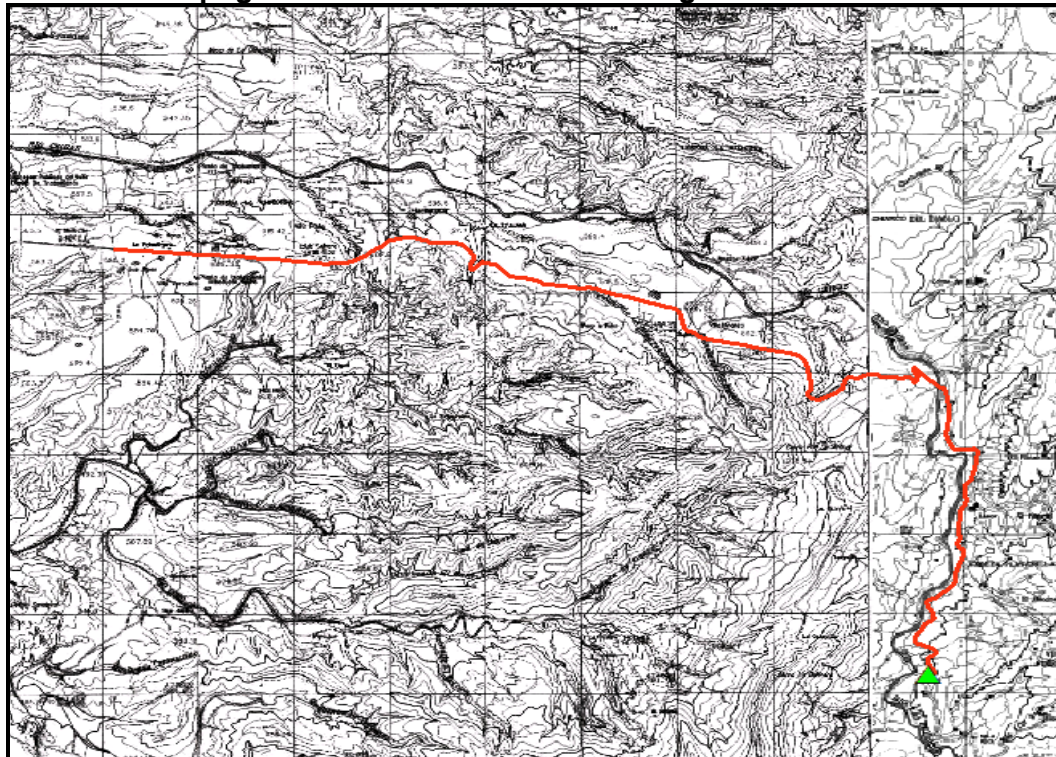
Fuente: Autor.

Figura 35 Levantamiento topográfico de la zona de estudio



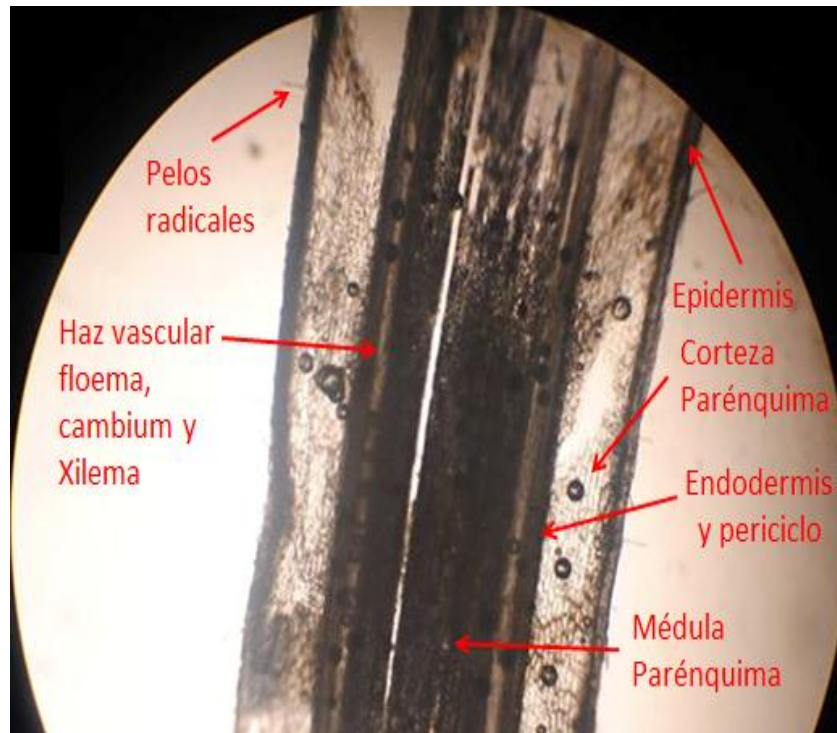
Fuente: Autor.

Figura 36 Plano topográfico de la zona de estudio según IGAC



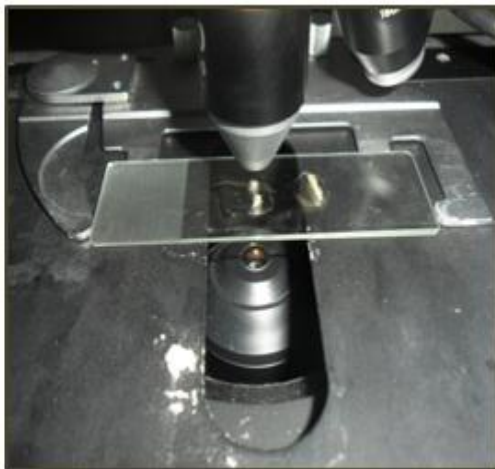
Fuente: Autor.

Foto 22 Estructura interna de las raíces del pasto Vetiver



Fuente: Autor.

Foto 23 Microscopio NIKON utilizado para el análisis de la estructura de la raíz del pasto Vetiver



Fuente: Autor.

Para el análisis de las raíces del Vetiver, se utilizó el microscopio Niko, para ello se realizaron cortes longitudinales muy finos y adicionalmente se le agregó a la muestra Lugol que es un colorante para tejidos vegetales que ayuda a tener una óptima observación de la estructura interna de la raíz del Vetiver, aquí se observaron unos tubos longitudinales que corresponden a las células epidérmicas estas están cercanamente unidas entre sí y otorgan a la planta fuerza mecánica y protección. Las paredes de las células epidérmicas de la planta contienen cutina, y están cubiertas por una cutícula. Ésta última ayuda a reducir la pérdida de agua hacia la atmósfera, y se encuentra cubierta por cera en capas suaves o largos filamentos. Las capas gruesas de cera le dan a la planta un aspecto brillante y lustrado. La cera superficial actúa como una barrera de humedad y protege a la planta de irradiación intensa y viento.

Esta característica es típica en plantas de hojas liguladas dispuestas en largas panojas terminales formadas por numerosos racimos, las espiguillas se encuentran en parejas es decir, se encuentra una sésil hermafrodita y la otra pedicelada masculina las flores son andromonoicas.

En las hojas se pueden observar los cloroplastos encargadas de captar la energía lumínica transformándola en energía química dándole el color verde al pasto Vetiver.

El parénquima está constituido por células vivas, las cuales le dan a la planta la posibilidad de cicatrizar las heridas, regenerar tejidos, y formar nuevos vástagos y raíces.

Las células que conforman la endodermis contienen una sustancia llamada suberina, la cual modifica la permeabilidad de la membrana, lo que le permite a la planta "filtrar" el agua que ingrese al tejido vascular, el agua sólo puede fluir hacia el centro de la raíz a través de la endodermis.

Para evaluar las características mecánicas de las raíces es necesaria la obtención de la resistencia a la tracción en función del diámetro; para ello se utilizó el equipo HM 3000 de marca Humboldt, las pruebas se hicieron a un total de 30 muestras de raíces individuales y variándose tanto el diámetro como las longitudes. En cuanto a los valores de los resultados obtenidos se evidenciaron que a menor diámetro la resistencia a la tracción aumenta, es decir que la raíz fina ofrece mayor resistencia a la tracción que las raíces más gruesas, pero esta resistencia tiende a disminuir con el aumento de la profundidad.

Foto 24 Colocación de la raíz del pasto Vetiver y medición del diámetro para ensayo a tracción



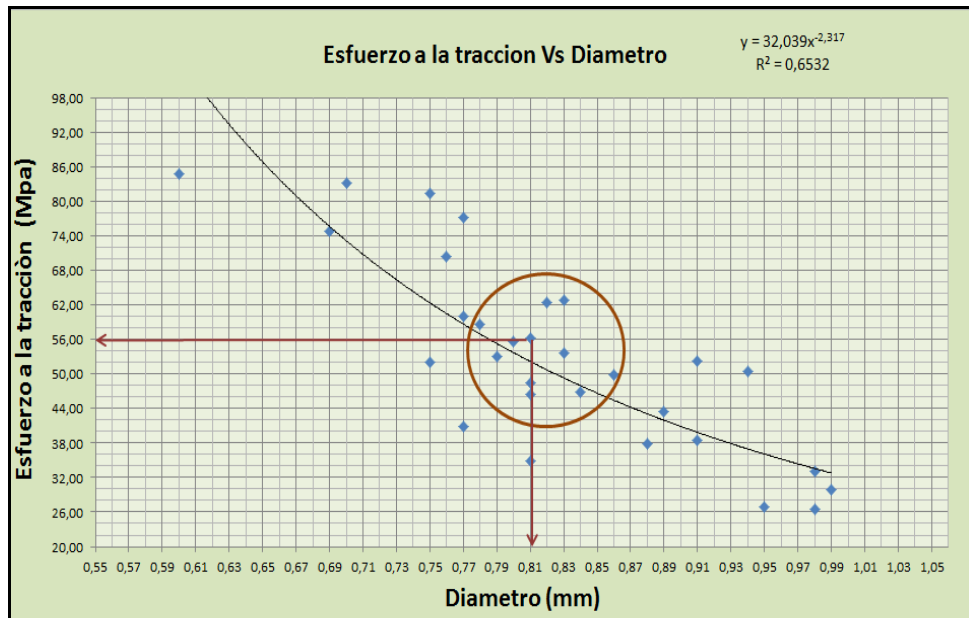
Fuente: Autor.

Foto 25 Ejecución ensayo a tracción de la raíz del pasto Vetiver en equipo Humboldt HM 3000



Fuente: Autor.

Figura 38 Comportamiento de esfuerzo a la tracción vs diámetro del vetiver



Fuente: Autor.

Se realizaron medidas al conjunto de raíces de Vetiver luego de cumplir seis meses de vida, obteniéndose valores de diámetro de la macolla 0.40 m, longitud de la planta de 1.00 m. estas fueron utilizadas para evaluar las condiciones mecánicas de la raíz.

Foto 26 Medición de raíz del pasto Vetiver con seis meses de edad



Fuente: Autor.

En el ensayo de corte directo realizado netamente con raíces del pasto Vetiver de 6 meses de edad, se obtuvieron valores de Cohesión (c) igual a 63.54 (Kpa), ángulo de fricción interno (ϕ) de 32.6°, Humedad de 17%, densidad de 0.25 (g/cm^3), volumen de vacíos de 3.01, dejándose deformar la muestra en 23%.

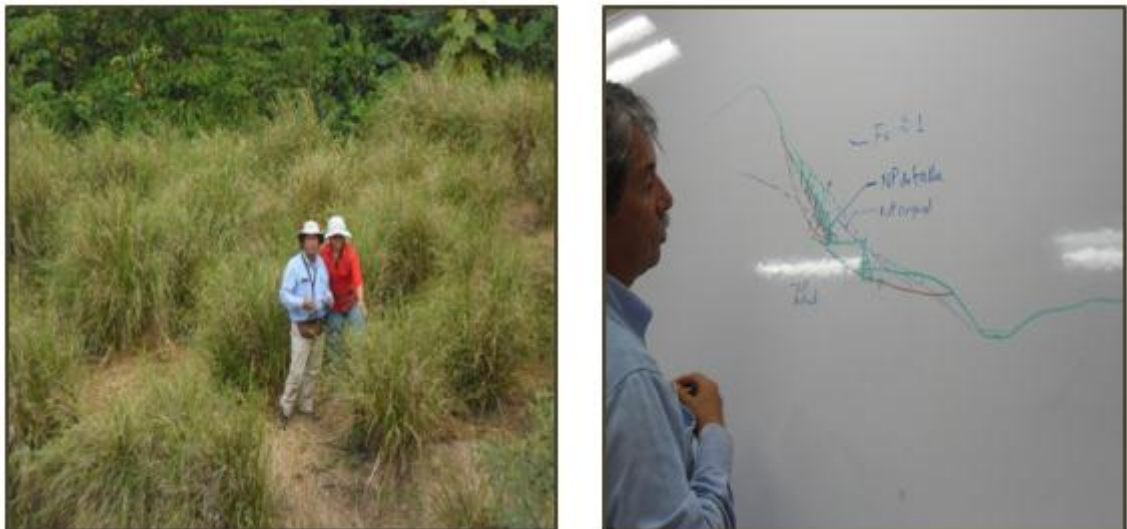
Foto 27 Ensayo de resistencia al corte con raíces de pasto Vetiver



Fuente: Autor.

También se obtuvo por parte de director de la tesis un apoyo mediante visitas en las cuales se evidenció el desarrollo del trabajo de investigación; además de darse recomendaciones apropiadas para seguir con la investigación. De esta forma se tomaron decisiones para el respectivo seguimiento y análisis del estudio.

Foto 28 Visita del Ingeniero José Vicente Amortegui Director de la Tesis de Grado



Fuente: Autor.

En las siguientes fotografías se observa como fue la conformación del talud inicialmente, para ello se realizó un terraceo con trinchos en guadua verde y sus dimensiones, como longitudes, altura de terrazas depende del tipo de talud a intervenir. Por lo general se construyen trinchos con alturas no superiores a 90 cm, con separación de parales verticales en guadua cada 70 cm, enterrándolos 2/3 de la altura del trincho. La separación entre terraza depende de la pendiente del talud, que entre mayor sea esta, la separación de la terrazas es más pequeñas, a diferencia de taludes con poca pendiente, donde la terrazas pueden tener espaciamiento mayores. Se utilizaron 4 a 5 unidades de guaduas de 8 m de longitud, con un diámetro 4 pulgadas, las guaduas actualmente tienen un costo por unidad de \$3500, también es fundamental tener en cuenta el buen drenaje, para ello se utilizó drenes franceses o filtros en espina de pescado que son zanjas rellenas de material granular grueso que tienen por objetivo captar y conducir las aguas de escorrentía. EL procedimiento para realizar la construcción de filtros en espina de pescado, requiere de ciertos materiales como: geomenbrana, geotextil, material granular filtrante grava y gravilla en diferentes diámetros y un tubo de PVC. Perforado. Adicionalmente para la siembra se utilizó esquejes de Vetiver los cuales tienen un precio por unidad de \$500 por plántula al por mayor, estos se sembraron a una distancia de 15 cm entre ellos. Y adicionalmente se realizó un muro de contención que contribuyera a la solución del problema en la parte baja de la ladera mientras que el vetiver cumplirá su desarrollo.

Foto 29 Panorama inicial de la zona de estudio



Fuente: Autor.

Foto 30 Proceso final de plantación del pasto Vetiver, los trinchos y los drenes



Fuente: Autor.

Los siguientes registros fotográficos corresponden al desarrollo del pasto Vetiver durante el tiempo de estudio en estos se ve claramente la excelente adaptabilidad del vetiver con el material expuesto en la zona; además de que convive con otras plantas y árboles sin ningún problema, la plántula no es invasora y lo primordial es que su siembra se realizó en el tiempo adecuado que fue en Marzo 20 del 2012; tiempo en donde iniciaría el incremento de la precipitación en la zona de estudio.

Foto 31 Desarrollo y crecimiento de las plántulas de pasto Vetiver



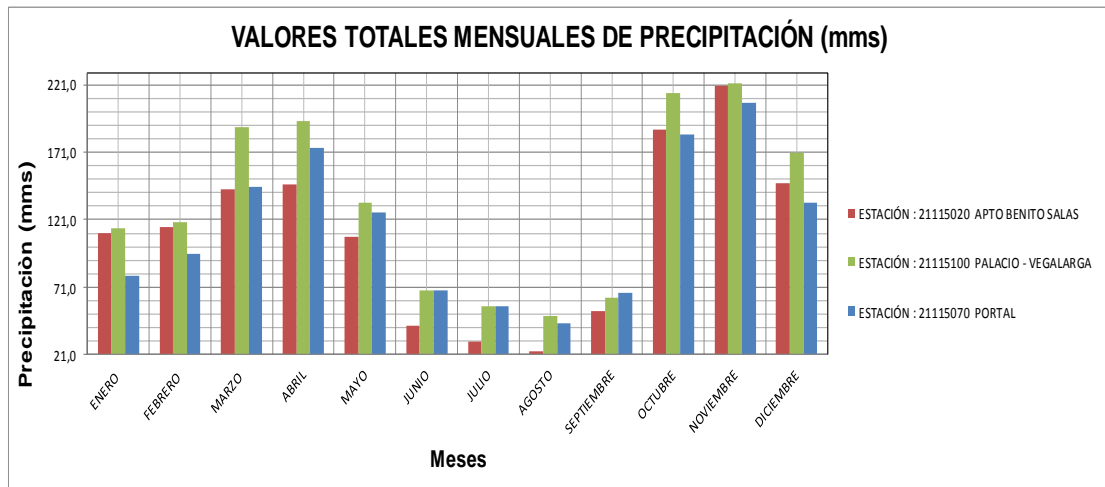
Fuente: Autor.

Tabla 14 Valores totales mensuales de precipitación (mms) de la zona de estudio

| VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mms) | | | | | | | | | | TIPO ESTACIÓN SS | |
|--|---------|-------|----------------------------|-------|-------|----------------|--------|-----------------|---------|------------------------|-----------|
| ESTACIÓN : 21115020 APTO BENITO SALAS | | | FECHA-INSTALACIÓN 1930-ENE | | | LATITUD 0256 N | | LONGITUD 7517 W | | ELEVACIÓN 0439 m.s.n.m | |
| ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | DICIEMBRE |
| 111,0 | 115,5 | 143,9 | 147,2 | 108,0 | 42,6 | 30,9 | 22,9 | 52,9 | 188,0 | 220,7 | 148,0 |
| VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mms) | | | | | | | | | | TIPO ESTACIÓN CO | |
| ESTACIÓN : 21115100 PALACIO - VEGALARGA | | | FECHA-INSTALACIÓN 1971-OCT | | | LATITUD 0256 N | | LONGITUD 7503 W | | ELEVACIÓN 1100 m.s.n.m | |
| ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | DICIEMBRE |
| 115,1 | 119,2 | 189,9 | 194,4 | 133,6 | 68,6 | 56,8 | 49,2 | 62,8 | 214,6 | 222,3 | 171,0 |
| VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mms) | | | | | | | | | | TIPO ESTACIÓN CO | |
| ESTACIÓN : 21115070 PORTAL | | | FECHA-INSTALACIÓN 1963-JUN | | | LATITUD 300 N | | LONGITUD 7504 W | | ELEVACIÓN 1300 m.s.n.m | |
| ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | DICIEMBRE |
| 79,6 | 95,7 | 145,2 | 174,3 | 126,4 | 68,2 | 56,7 | 44,4 | 66,9 | 183,9 | 207,4 | 133,4 |

Fuente: Autor.

Figura 39 Representación gráfica de la Precipitación total mensual de la zona



Fuente: IDEAM 2014.

La cantidad, frecuencia, distribución espacial y temporal de las precipitaciones es muy variable pero en este caso se visualizó un comportamiento bimodal en los periodos de precipitación estableciendo así un periodo de sequía y otro de lluvia cada año para las tres estaciones. Las máximas precipitaciones registradas en la estación de Palacio-Vegalarga que oscilan superando los 221mm se deben a las corrientes ascendentes de aire, como las que obligan a realizar las cordilleras, sobre las cuales las precipitaciones son más numerosas e intensas en la ladera enfrentada a los vientos más frecuentes el mismo caso también pasa en la estación Aeropuerto Benito Salas ya que aunque esta estación está ubicada en la zona urbana ambas estaciones se encuentran en el valle de la cordillera oriental. Como se observa en el grafico las precipitaciones del segundo ciclo del año (Octubre-Noviembre) tienen mayor intensidad debido a que esta precedido por un

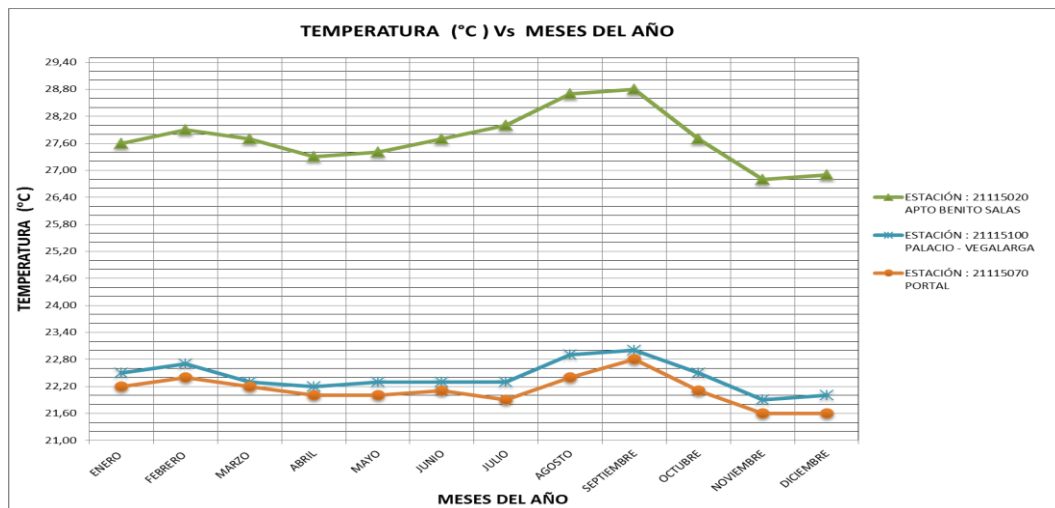
fuerte periodo de sequía comparado con las precipitaciones que se registran en los meses de marzo y abril.

Tabla 15 Valores mensuales de temperatura (°C) de la zona de estudio

| VALORES MEDIOS MENSUALES DE TEMPERATURA (°C) | | | | | | | | | | TIPO ESTACIÓN | |
|--|---------|-------|----------------------------|------|-------|----------------|--------|-----------------|---------|------------------------|-----------|
| ESTACIÓN : 21115020 APTO BENITO SALAS | | | FECHA-INSTALACIÓN 1930-ENE | | | LATITUD 0256 N | | LONGITUD 7517 W | | ELEVACIÓN 0439 m.s.n.m | |
| ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | DICIEMBRE |
| 27,60 | 27,9 | 27,7 | 27,3 | 27,4 | 27,7 | 28 | 28,7 | 28,8 | 27,7 | 26,8 | 26,9 |
| VALORES MEDIOS MENSUALES DE TEMPERATURA (°C) | | | | | | | | | | TIPO ESTACIÓN | |
| ESTACIÓN : 21115100 PALACIO - VEGALARGA | | | FECHA-INSTALACIÓN 1971-OCT | | | LATITUD 0256 N | | LONGITUD 7503 W | | ELEVACIÓN 1100 m.s.n.m | |
| ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | DICIEMBRE |
| 22,50 | 22,7 | 22,3 | 22,2 | 22,3 | 22,3 | 22,3 | 22,9 | 23 | 22,5 | 21,9 | 22 |
| VALORES MEDIOS MENSUALES DE TEMPERATURA (°C) | | | | | | | | | | TIPO ESTACIÓN | |
| ESTACIÓN : 21115070 PORTAL | | | FECHA-INSTALACIÓN 1963-JUN | | | LATITUD 300 N | | LONGITUD 7504 W | | ELEVACIÓN 1300 m.s.n.m | |
| ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | DICIEMBRE |
| 22,20 | 22,4 | 22,2 | 22 | 22 | 22,1 | 21,9 | 22,4 | 22,8 | 22,1 | 21,6 | 21,6 |

Fuente: Autor.

Figura 40 Representación gráfica de la Temperatura



Fuente: IDEAM 2014.

Los datos registrados de las estaciones meteorológicas escogidas reportan que las Temperaturas medias mensuales tienen un comportamiento inversamente proporcional con la Precipitación, es decir que los meses más calurosos son aquellos en que la lluvia es menor, para este caso esto se evidencia en los meses de Agosto y Septiembre, en los cuales la temperatura máxima sobrepasa los 25°C; y los meses más frescos son aquellos considerados como los meses más lluviosos, sobresaliendo abril y noviembre, siendo la temperatura máxima oscilante entre los 28° C para el caso de la Estación Aeropuerto Benito Salas que se encuentra ubicado en el casco urbano de la ciudad de Neiva es decir que la

consolidación de urbanizaciones cercanas hace que la temperatura incremente; mientras que en las estaciones Palacio- Vegalarga y El Portal la temperatura más alta oscila entre 22° C y 23°C ya que estas están en áreas rurales del municipio de Neiva.

6.1.3 Desarrollo del vetiver en parcela en tierra y canal de tratamiento.

6.1.3.1 Mediciones vetiver parcela en tierra.

Se realizaron mediciones e inspecciones visuales cualitativas para evaluar el comportamiento del crecimiento de las macollas de pasto vetiver plantado en la parcela en tierra, tomándose un registro de su desarrollo aéreo (foliar), contemplando las mediciones de ancho de la macolla en los dos ejes (X y Y), las alturas logradas por las hojas (H med, H max y H min) y el número de hijos (brotes aéreos); parámetros establecidos, para hacer un seguimiento a través de un tratamiento estadísticos de las medidas de tendencia central y la variabilidad (ver Foto 32).

Foto 32 Medición de vetiver en tierra. Planta No.7



Fuente: Autor.

6.1.3.2 Mediciones vetiver en canal de tratamiento.

Se realizaron quincenalmente mediciones e inspecciones visuales cualitativas para evaluar el comportamiento del crecimiento de las macollas y la raíz del pasto vetiver sembrado sobre 46 bandejas flotantes que se encontraban en contacto con el agua residual, además se tomó un registro de su desarrollo aéreo (foliar), contemplando mediciones de ancho de la macolla en los dos ejes (X y Y), las alturas logradas por las hojas (H med, H max y H min) y el número de hijos (brotes aéreos), así como el desarrollo de la raíz en los dos ejes (X y Y) y las alturas logradas por las hojas (H med, H max y H min), adicionalmente se efectuó pesaje para cada planta para determinar ganancia orgánica; parámetros que fueron

previamente establecidos para efectuar un seguimiento empleando tratamiento estadísticos de las medidas de tendencia central y la Variabilidad. Para ello se elaboró una ficha de registro que establece el número de hijos por macolla, diámetro de macolla, altura de macolla y longitud radicular y diámetro del sistema radicular. (Ver Foto 33).

Foto 33 Medición de Vetiver en canal de tratamiento. Planta No.12



Fuente: Autor.

Foto 34 Montaje para crecimiento del Vetiver en tierra y en agua



Fuente: Autor.

6.1.3.3 Resultados obtenidos.

- **Desarrollo del pasto Vetiver sembrada en suelo**

Para el desarrollo del experimento se efectuó siembra de pasto Vetiver el 5 de febrero de 2012, en una parcela en tierra de 2.00m x 4.00m, a distancias de 0.15 m entre plantas y 0.30 m entre surcos para un total de 150 plantas en 7 surcos y 26 filas, sobre un suelo con pendiente del 60%, preseleccionándose al azar 30 de ellas las cuales fueron marcadas mediante anillos en PVC de 1-1/2". Sobre estas se efectuaron mediciones de altura de la macolla (media, máxima y mínima) y área de la misma en el eje X y en el eje Y para la determinación del área transversal ocupada por la macolla a medida que se desarrollaba la planta; estas mediciones fueron efectuadas cada 15 días y registradas en un formato de medición previamente diseñado.

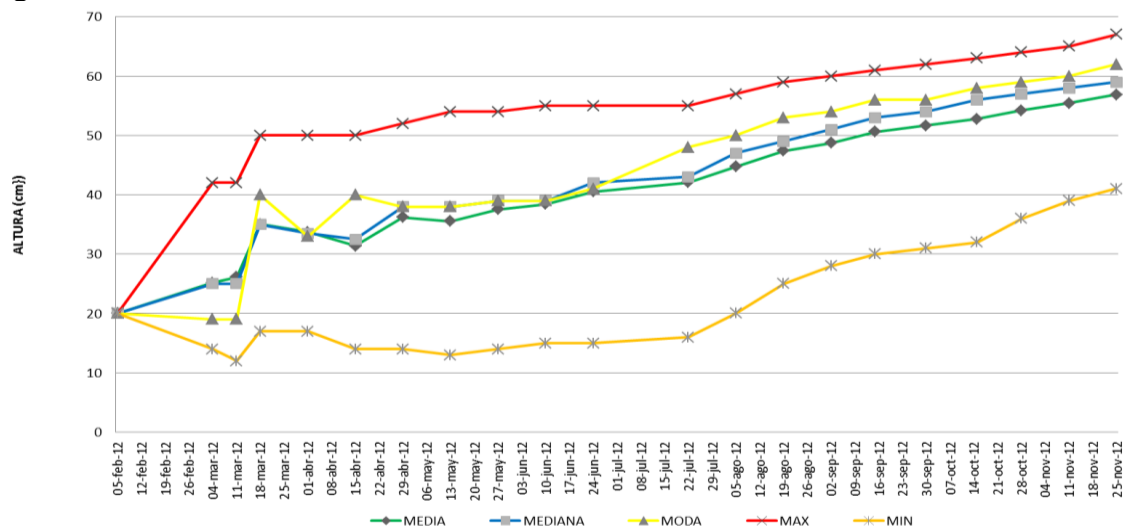
La Figura 41 muestra la evolución que presentó la altura media del pasto Vetiver sembrado en tierra, entendiendo esta altura en que se encontraba la mayoría de hojas, en él se observa que las plantas obtuvieron un crecimiento acelerado en la altura media del follaje durante las primeras 6 semanas (5 de febrero de 2012-18 marzo de 2012), llegando a pasar de 20 cm (altura a la que se sembraron los esquejes) a 35.03 cm, obteniendo un incremento de 15.03 cm, lo que significa que planta obtuvo un crecimiento durante estas 6 semanas de 0.36 cm/día en su altura media, sin embargo se lograron alturas medias máximas de 50 cm, lo que significa que algunas plantas lograron incrementar su altura media en 30 cm en estas 6 semanas, lo que arroja un incremento diario de 0.71 cm/día.

Las plantas presentan una disminución en la tasa de crecimiento que traían a partir de la 6ª semana (18 de marzo de 2012) hasta la semana 24ª (22 de julio de 2012) pasando su altura media de 35,03 cm a 42.07 cm, lo que equivale a un incremento de 7,04 cm, lo que arroja un incremento diario de 0.06 cm/día. Posteriormente la planta presenta un incremento significativo en la altura media de su follaje a partir de 24ª semana (22 de julio de 2012) hasta la 34ª semana (30 de septiembre de 2012) pasando de 42,07 cm a 51.69 cm que equivale a un incremento de 9.62 cm, lo que arroja un incremento diario de 0.14 cm/día, el doble de lo que traía como tasa de crecimiento y que coincide con la época de menor precipitación y mayor incidencia de la radiación solar, lo que significa que la planta se comporta mejor en su desarrollo en época de sequía y mayor radiación solar por ser una planta C4.

A partir de la 34ª semana la planta disminuye nuevamente su tasa de crecimiento que traía en la época de sequía al pasar de 51.69 cm a 56.90 cm que equivale a un incremento de 5,21 cm, lo que arroja un incremento diario de 0.09 cm/día. Las plantas de vetiver sembradas en tierra durante 42 semanas de periodo vegetativo analizado alcanzaron a obtener alturas media de 56.90 cm con alturas medias máximas de 67.00 cm y medias mínimas de 41,00 cm; esto significa que las altura

medias media tuvieron un incremento durante éste periodo de 36,90 cm arrojando una tasa de crecimiento de 0,13 cm/día, sin embargo, existieron plantas con crecimiento medio máximo que alcanzaron un incremento de 47.00 cm equivalente a una tasa de crecimiento de 0.16 cm/día, caso contrario las que obtuvieron alturas medias mínimas alcanzaron un incremento de 21 cm equivalente a una tasa de crecimiento 0.07 cm/día.

Figura 41 Evolución de la altura media de la macolla del Vetiver sembrado en tierra



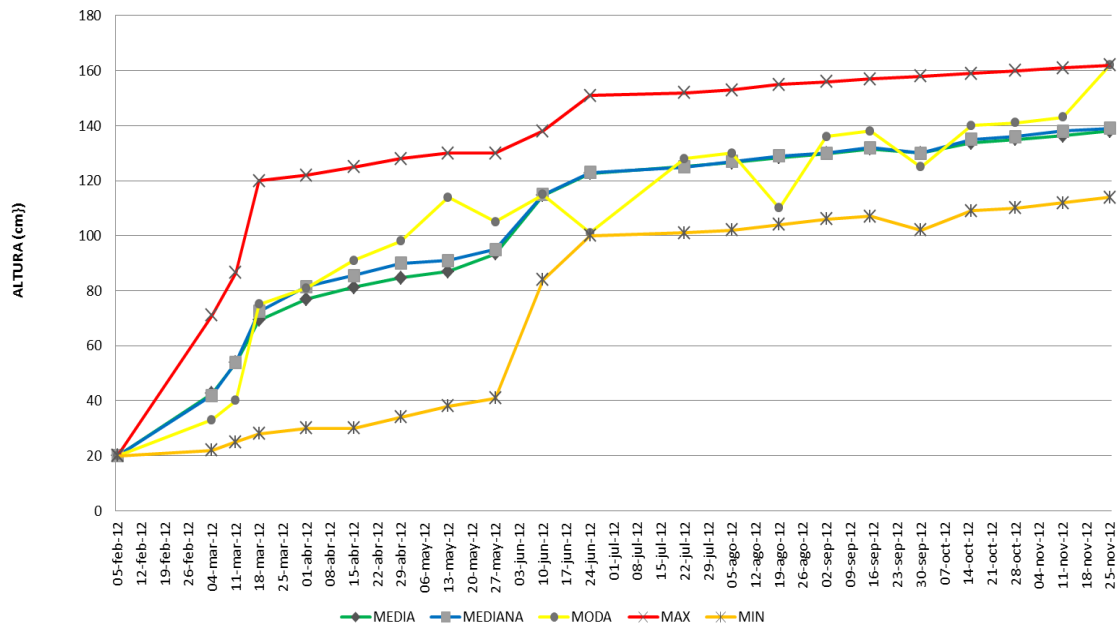
Fuente: Autor.

Con relación a la medición de alturas máximas obtenidas en las 30 plantas analizadas se obtuvieron los resultados presentados en la Figura 42, en ella se observa que las alturas máximas medias alcanzaron en la 6ª semana (18 marzo de 2012) periodo de mayor crecimiento de las hojas una altura de 69.03 cm con un incremento de 49.03 cm , lo que significó un tasa de crecimiento de 1.17 cm/día, presentándose a partir de allí una disminución en la tasa de crecimiento hasta la 16ª semana (27 de mayo de 2012) al pasar de 69.03 cm a 93.48 cm, lo que significa un incremento de 24.45 cm equivalente a una tasa de crecimiento de 0.35 cm/día; luego se presenta un incremento significativo de las alturas máximas media hasta la semana 20ª (24 de junio de 2012) al pasar de 93.48 cm a 122.69 cm, lo que significa un incremento de 29.21 cm equivalente a una tasa de crecimiento de 1.04 cm/día; posteriormente a partir de la 20ª semana la tasa disminuye significativamente al pasar de 122.69 cm a 138.07 cm , lo que significa un incremento de 15.38 cm equivalente a una tasa de crecimiento de 0.10 cm/día.

El incremento en el desarrollo para las alturas máximas medias alcanzó durante las 42 semanas de periodo vegetativo alcanzo a ser de 110.07 cm, lo que significa una tasa de crecimiento de la macolla de 0.40 cm/día, sin embargo, existieron

alturas máximas máxima que alcanzaron los 162 cm lo que significa un incremento de 142 cm con una tasa decrecimiento de 0.48 cm/día y alturas máximas mínima que alcanzaron los 114 cm lo que significa un incremento de 94.00 cm con una tasa decrecimiento de 0.32 cm/día.

Figura 42 Evolución de la altura máxima de la macolla del Vetiver sembrado en tierra



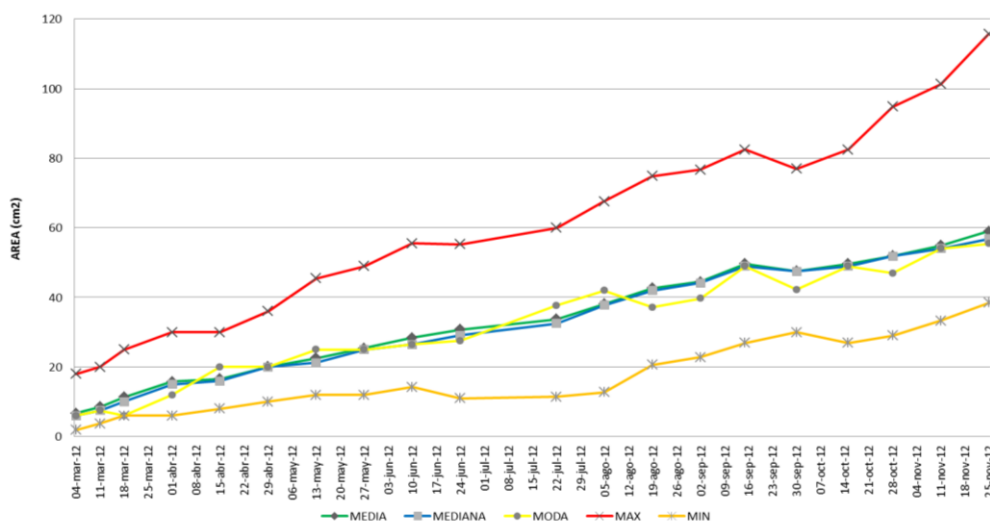
Fuente: Autor.

En conclusión se obtuvieron en éste experimento alturas máximas medias de 138.07 cm con alturas máximas de 162.00 cm y mínimas de 114.00 cm. Es importante anotar que experiencias desarrolladas en Australia, determinaron que los tallos erguidos del Pasto Vetiver en forma recta alcanzan una altura entre 0,50 m a 1,50 m (Orihuela & Barriga, 2007). Por lo anterior, se puede concluir que en la zona donde se estableció el Pasto Vetiver se lograron mayores alturas de las macollas y por ende mayor desarrollo de estas.

Con relación al área transversal de la macolla, como se observa en la Figura 43, en su base se logró establecer la tasa de crecimiento de ella través del periodo vegetativo analizado, encontrándose un crecimiento significativo de estos en dos periodos plenamente identificados, es así como se tiene que durante las primeras 8 semanas (abril 1 de 2012) se presenta el mayor incremento del área trasversal al pasar de 6.68 cm² a 15.83 cm², lo que representa un incremento de 9.15 cm² equivalente una tasa de crecimiento del área transversal de la macolla en su base de 0.33 cm²/día, luego se presenta una disminución en la tasa de crecimiento del

área transversal de la macolla al pasar de 15.83 cm² a 33.76 cm² lo que representa un incremento del área de 17.93 m² equivalentes a una tasa de crecimiento del área de 0.16 cm²/día, la mitad de lo que traía en las primeras semanas. Luego se presenta un ligero incremento entre 24^a semana (22 de julio de 2012) a la 32^a semana (16 de septiembre de 2012) al pasar de 33.76 cm² a 49.71 cm² lo que representa un incremento de 15.95 cm² equivalente a una tasa de crecimiento del área de 0.28 cm²/día, posteriormente se presenta una nueva disminución en el área transversal de la base de la macolla al pasar de 49,71 cm² a 59.97 cm² en la 42^a semana (25 de noviembre de 2012) lo que representa un incremento de 9.36 cm² equivalente a una tasa de crecimiento del área de 0.13 cm²/día.

Figura 43 Evolución del área de la macolla del Vetiver sembrado en tierra



Fuente: Autor.

La base de la macolla del vetiver sembrado en tierra alcanzo un incremento en las 42 semanas de periodo vegetativo de 59.07 cm² equivalente una tasa de crecimiento del área de 0.18 cm²/día.

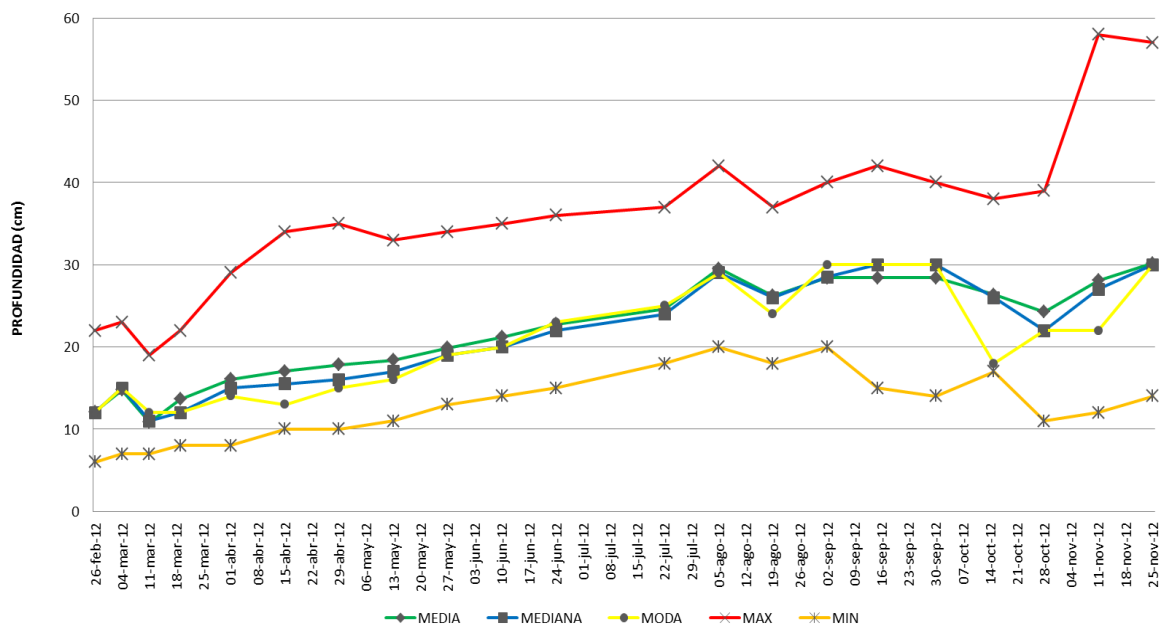
Así mismo se encontró que las áreas máximas logradas en las 42 semanas de periodo vegetativo alcanzo a llegar a 115.70 cm² equivalentes a 0.33 cm²/día y para las áreas máximas mínimas alcanzo a llegar a 38.50 cm² equivalentes a 0.12 cm²/día.

- **Crecimiento de la raíz de pasto Vetiver en medio acuático**

La Figura 44 muestra la evolución que presentó la profundidad media del pasto vetiver sembrado sobre la bandeja flotante y en contacto permanente con el agua residual provenientes de los estanques piscícolas. En él se observa que las raíces de pasto vetiver obtuvieron un crecimiento acelerado en la profundidad media de

raíces durante las primeras 6 semanas (22 de enero de 2012- 4 de marzo de 2012), llegando a obtenerse una profundidad media de 14.7 cm, obteniendo un crecimiento de 0.38 cm/día en su profundidad media de raíces, sin embargo, se lograron alturas medias máximas de 23.00 cm, lo que significa que algunas plantas lograron incrementar su altura media en 10,41 cm en estas 6 semanas, lo que arroja un incremento diario de 0,72 cm/día.

Figura 44 Evolución del crecimiento de raíces del Vetiver en medio acuático

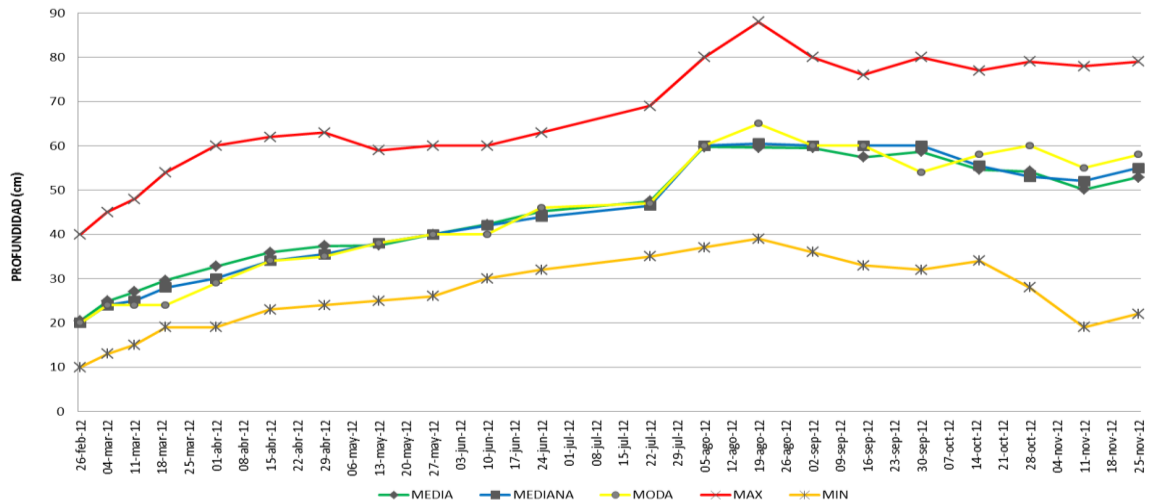


Fuente: Autor.

Las plantas presentan una disminución drástica en la tasa de crecimiento de la profundidad media de raíces que traían a partir de la 6ª semana (4 de marzo de 2012) hasta la 7ª semana (11 de marzo de 2012) pasando su profundidad media de 14.76 a 10.87 cm, lo que equivale a una disminución en la profundidad de raíces 3.89 cm ocasionada por paso de alevinos a los canales de tratamiento que pudieron haber consumido las raíces del vetiver. A partir de la 7ª semana hasta 36ª semana (30 de septiembre de 2012) se presentó nuevamente un crecimiento de raíces pasando de 10.87 cm a 28.43 cm representado un incremento de 17.56 cm equivalentes a una tasa de crecimiento de 0.09 cm/día, posteriormente se observó una disminución en la profundidad media de raíces entre la 36ª y la 40ª semana pasando de 28.43 cm a 24.26 cm disminución ocasionada por extracción de algunos esquejes y pudrición de raíces por condiciones de anoxia en el canal de tratamiento quizás por la falta de un tratamiento primario o secundario de las aguas residuales. Sin embargo se encontraron profundidades medias máximas de raíces de 57 cm y medias mínimas de 14.00 cm al finalizar el periodo de medición.

Con relación a la Figura 45 las profundidades máximas medias de raíces se obtuvieron profundidades que oscilaron entre 20 cm en la 5ª semana hasta 47.46 cm representando incrementos de 27.46 cm con tasa decrecimientos de 0.19 cm/día , observándose además un incremento significativo en la profundidades máximas medias de raíces en el periodo comprendido entre la 26ª y 30ª semana (22 de julio – 19 de agosto de 2012) que coincide con la época de menor precipitación y mayor radiación solar en la zona de estudio, a partir de allí se encontró una disminución de la profundidades máximas medias de raíces ocasionada por anoxia en el canal de tratamiento.

Figura 45 Evolución del crecimiento máximo de raíces del Vetiver en medio acuático

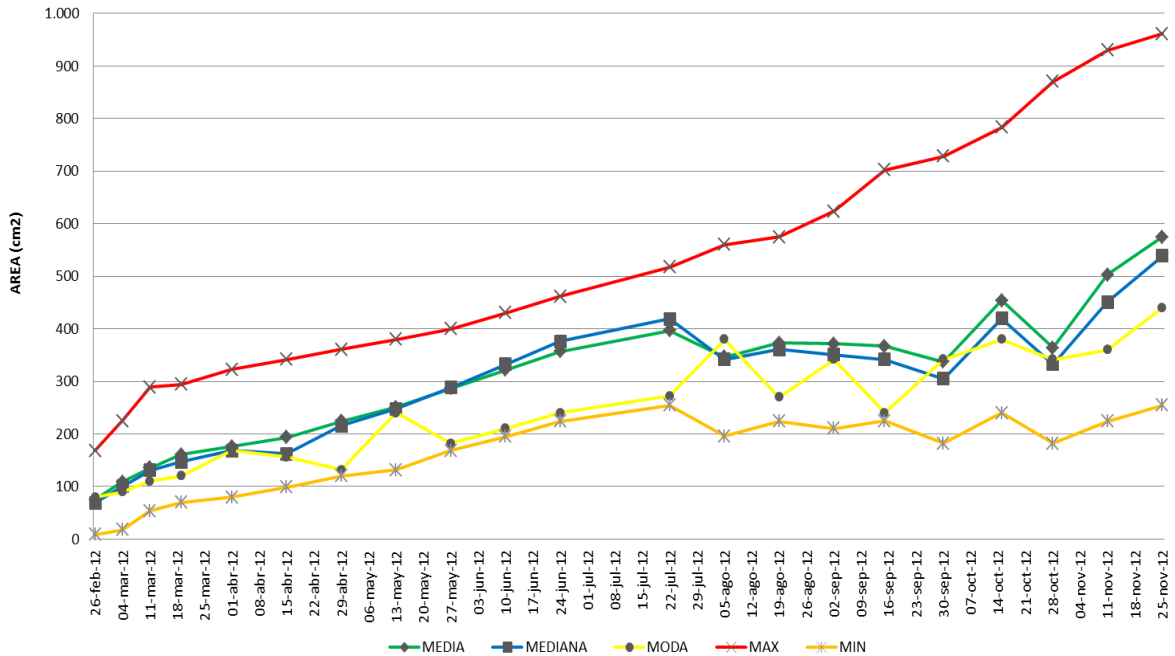


Fuente: Autor.

Dentro de la observación se encontraron profundidades máximas de raíces que alcanzaron los 88 cm y mínimas de 19 cm.

Con relación al área transversal de raíces se logró establecer la tasa de crecimiento de estas durante las primeras 26 semanas alcanzo a tener una área transversal media de 396,66 cm² arrojando un incremento de 321.86 cm² equivalentes a un atas de crecimiento del área de 2.19 cm²/día, a partir de la 26ª semana hasta la 44ª semana las raíces presentaron una variabilidad en el área trasversal de raíces ocasionada por retiro de esquejes y pudrición del agua del canal de tratamiento. Es de anotar, que se lograron al finalizar la 44ª semana valores máximos de 961 cm² y máximos mínimos de 255 cm²; lo que significa que existe un buen desarrollo de raíces del pasto vetiver en contacto permanente con aguas residuales de la actividad piscícola, sin embargo se requiere la instalación de un tratamiento primario previo al paso por el biofiltro de vetiver ver Figura 46.

Figura 46 Evolución del área transversal de raíces del Vetiver en medio acuático



Fuente: Autor.

6.2. EQUIPOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS PARA EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Para los trabajos de análisis de resultados, toma de datos y elaboración de los ensayos se usaron los equipos y la oficina a cargo de la proponente del presente proyecto de grado en laboratorio de la Universidad Cooperativa de Colombia sede Neiva. Los equipos utilizados fueron los siguientes:

- Navegador GPS 62SC Garmin
- Estación total GOWIN TOPCON TKS 202.
- Bastón con prisma King.
- Estacas en madera, mojones y piquetes.
- Cinta métrica.
- Medidor de distancias "Keson" RR3M
- Cronometro digital Casio PG-611.
- Probeta plástica.
- Pala, pica, hoyadora y barra.
- Bolsas plásticas, costales, papel viniltex.
- Cajas en madera para transporte de muestras.
- Termómetro digital y análogo marca Hanna.
- Balanza digital.
- Recipientes plásticos y metálicos.

- Equipo de cono de arena para toma de densidades en campo.
- Humedómetro o Speedy.
- Equipo neumático para ensayos de Corte Directo y Residual, Marca: Humbolt, Modelo HM-2560A.
- Equipo para ensayos a la tensión de las raíces Marca: Humbolt, Modelo HM-3000.
- Torno manual para tallado de muestras de suelos.
- Guías refrentadoras para muestras de suelos.
- Matraces o picnómetros.
- Bomba de vacío.
- Termómetros.
- Penetrómetro de bolsillo
- Cazuelas de Casagrande
- Juego de serie de tamices
- Hornos
- Software para adquisición de datos para máquina de corte directo Humboldt, ref: HM-2700SW
- Software AutoCad Civil 3D 2015
- Software Slide (Análisis de estabilidad)
- Software Argis ArcMap
- Google Earth
- Software Microsoft window Excell y Word
- Cámara fotográfica digital Sony.
- Computador de mesa y portátil.
- Memoria USB.

6.3. METODO UTILIZADO EN EL ESTUDIO

Se realizaron ensayos de corte directo sobre dos tipos de muestras para evaluar la influencia del Vetiver en la resistencia de los materiales a esfuerzos cortantes. Las muestras corresponden a Arena Limosa (SM) y a Arena Arcillo Limosa (SM-SC). Estas muestras se evaluaron con y sin la presencia de raíces del Vetiver en ellas, las muestras sin raíces en su composición son llamadas muestras de control.

Se obtuvieron muestras inalteradas y se dispusieron en la caja de corte de forma tal que se mantuviera las características del suelo natural durante el ensayo realizado.

En total se realizaron 29 ensayos de corte directo, la modalidad del ensayo y el tipo de muestra ensayada se discrimina en la Tabla 16.

Tabla 16 Cantidades y condiciones de los ensayos de Corte Directo

| Tipo de Muestra | Condición | Modalidad del Ensayo | Cantidad de Ensayos |
|-----------------|-------------|--------------------------------|---------------------|
| SM | Sin Vetiver | Consolidado Drenado (CD) | 2 |
| SM | Con Vetiver | Consolidado Drenado (CD) | 4 |
| SM | Sin Vetiver | Consolidado No-Drenado (CU) | 3 |
| SM | Con Vetiver | Consolidado No-Drenado (CU) | 3 |
| SM | Sin Vetiver | No Consolidado No Drenado (UU) | 3 |
| SM | Con Vetiver | No Consolidado No Drenado (UU) | 3 |
| SM-SC | Sin Vetiver | Consolidado Drenado (CD) | 1 |
| SM-SC | Con Vetiver | Consolidado Drenado (CD) | 4 |
| SM-SC | Sin Vetiver | Consolidado No-Drenado (CU) | 2 |
| SM-SC | Con Vetiver | Consolidado No-Drenado (CU) | 2 |
| SM-SC | Sin Vetiver | No Consolidado No Drenado (UU) | 1 |
| SM-SC | Con Vetiver | No Consolidado No Drenado (UU) | 1 |

Fuente: Autor.

La primera fase del análisis consistió en identificar las muestras ensayadas en condiciones consolidadas drenadas, ya que son las condiciones sobre las que se deben realizar los análisis de estabilidad de taludes permanentes (NSR 10), para los esfuerzos de corte aplicados se tomó como referencia el esfuerzo vertical inicial, para la arena limosa SM se obtuvieron valores de 31.5 kPa y 42 kPa, mientras que para la muestra de arena arcillosa limosa SM-SC valores de 28.5 kPa y 38 kPa, de acuerdo con estos valores las cargas de confinamiento de trabajo son de 25 Kpa – 50 Kpa – 100 Kpa considerando confinamientos y esfuerzos no mayores a cinco metros (5 m) esfuerzos típicos en superficies de fallas superficiales principal aplicación de este estudio. Sin embargo se trabajó con esfuerzos superiores como 50Kpa-100kpa-200 Kpa, para verificar la influencia del confinamiento.

Para la determinación de la velocidad de falla en condiciones consolidadas drenadas del corte directo se tomó a partir del tiempo en el que ocurre el 90% de la consolidación (t_{90}) obteniendo un valor mínimo de trabajo para las muestras de 0.05 mm/min, estipulándose este valor de velocidad de falla para todas los ensayos en estas condiciones.

De los ensayos de corte directo se obtuvieron las curvas de deformación horizontal, deformación vertical y fuerza registrada por la máquina de corte directo para generar dicha deformación.

La segunda fase correspondió a la interpretación de los valores obtenidos en el ensayo de corte, además de los análisis correspondientes a las gráficas obtenidas de esfuerzo cortante τ contra esfuerzo vertical σ , para la construcción de la envolvente de falla siguiendo el criterio de Mohr-Coulomb y con ello la obtención

de los parámetros de resistencia la cohesión c y el ángulo de fricción interna ϕ , para las muestras de control como para la muestras con vetiver.

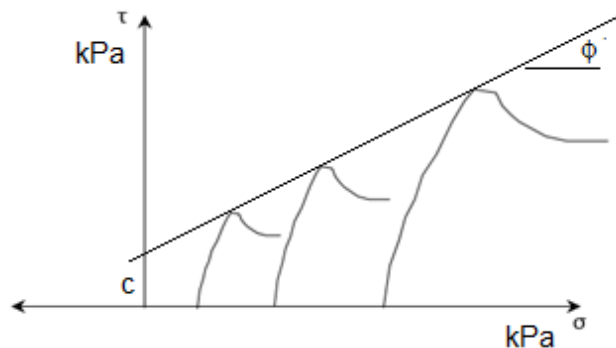
El análisis de las deformaciones durante el ensayo de corte directo, tanto horizontal como vertical la cual puede asociarse con procesos como la dilatancia y con la influencia del Vetiver en las muestras ensayadas.

La tercera fase consistió en la explicación física y numérica del proceso que se registró en los ensayos de corte directo y las conclusiones respecto al estudio.

6.4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Teniendo los valores de referencia del el esfuerzo normal y cortante que se desarrolla durante el ensayo de corte directo, se obtiene la envolvente de falla de Morh Coulomb, como se presenta en la Figura 47.

Figura 47 Curvas de la envolvente de falla Morh Coulomb



Fuente: Autor.

En la resistencia de materiales en la teoría elástica, se define la falla como el estado de un material que ante la ausencia de incrementos de esfuerzos la deformación se prolonga de forma indefinida. En el caso estudiado, donde se analizan los esfuerzos sobre una superficie de falla predefinida, la falla del material se logra en tres posibles casos:

- Cuando el Esfuerzo cortante llegue a un pico definido y posteriormente el mismo descienda.
- Cuando el incremento del escuerzo cortante sea nulo.
- Cuando el Incremento del esfuerzo cortante sea constante.

Como se mencionó anteriormente, en el ensayo de corte directo, se deben obtener como mínimo tres curvas que relacionen el esfuerzo normal y cortante (aunque

esto suponga la ejecución de más ensayos). Adicional a lo anterior, los tipos de comportamiento antes mencionado se deben replicar en las curvas obtenidas.

En el análisis de materiales granulares como lo son los suelos, el modelo más utilizado es el de Mohr-Coulomb el cual define que tras el análisis de la los esfuerzos normales y cortantes sobre la superficie de falla se llega a un valor constante de la relación $\frac{\tau}{\sigma}$ la cual define la pendiente de la envolvente, adicionalmente se puede definir un intercepto con las abscisas fijo tras el desarrollo y el análisis del ensayo de corte.

Debido a que el ensayo de corte directo es un ensayo de deformación controlada, se intuye que la muestra llega a la falla cuando la variación del esfuerzo cortante llegan a un valor fijo, en este punto, se asocia el estado de esfuerzos final con los esfuerzos de falla de la muestra ensayada, o lo que es lo mismo, que el círculo de Mohr es tangente a la envolvente de falla.

Teniendo en cuenta lo anterior, se traza la línea que mejor se aproxima a estos niveles de esfuerzos y se analiza la pendiente y el corte con el eje de las ordenadas, con esto se obtiene el ángulo de inclinación de la envolvente y corte con el eje vertical (ángulo de fricción ϕ y cohesión c). Adicionalmente, según la teoría de la elasticidad se puede obtener la resistencia a la tensión de un material (aunque los suelos no soportan tensión).

Hay que destacar que para un material definido solo habrá una envolvente de falla, la cual se alcanza cuando el material ensayado llega a la falla o a deformación infinita sin incremento de esfuerzo.

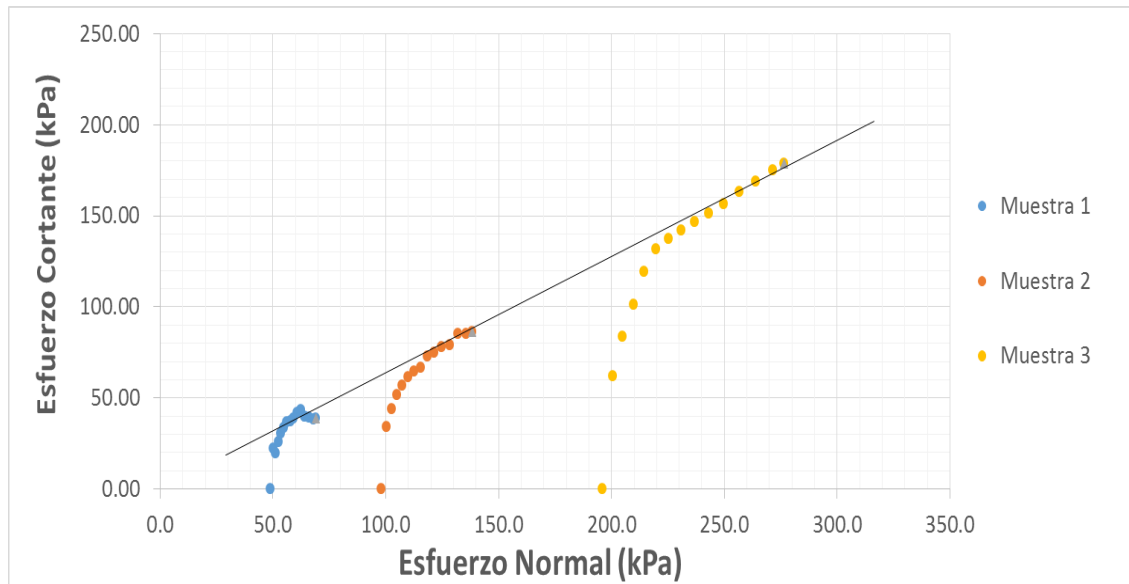
Los resultados y los análisis realizados se discriminan según el material ensayado y la inclusión o no de las raíces. Así pues, se realizará el análisis para la Arena Limosa (SM) de forma independiente y posteriormente para la Arena Arcillo Limosa (SM-SC).

6.4.1 ARENA LIMOSA (SM).

6.4.1.1 Ensayo Consolidado Drenado

En la Figura 48 muestran los valores obtenidos de los ángulos de fricción y la cohesión en la envolvente de falla y la Figura 49 muestran la deformación horizontal contra esfuerzo cortante sobre muestras de control de Arena Limosa SM en la modalidad de Consolidado Drenado.

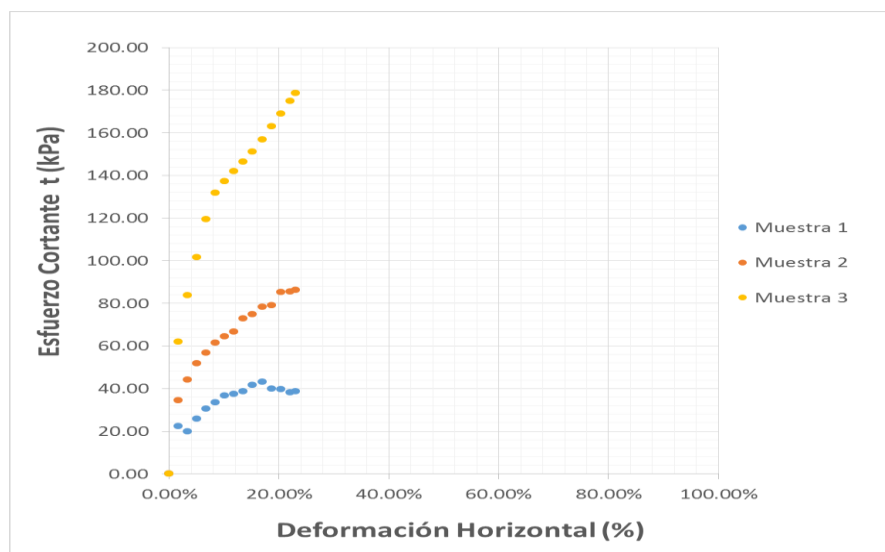
Figura 48 Envolvente de falla Arena Limosa muestra de Control-Ensayo A Consolidado Drenado



Fuente: Autor.

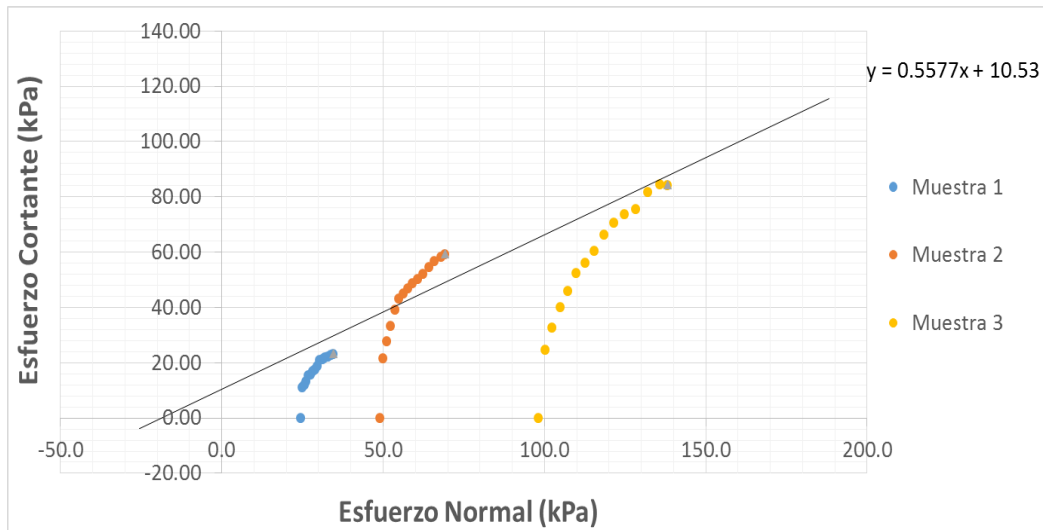
| $\phi(^{\circ})$ | C (kPa) | T (kPa) |
|------------------|---------|---------|
| 33 | 0.0 | 0.0 |

Figura 49 Esfuerzo Cortante Vs Deformación Horizontal - Arena Limosa muestra de control - Ensayo A Consolidado Drenado



Fuente: Autor.

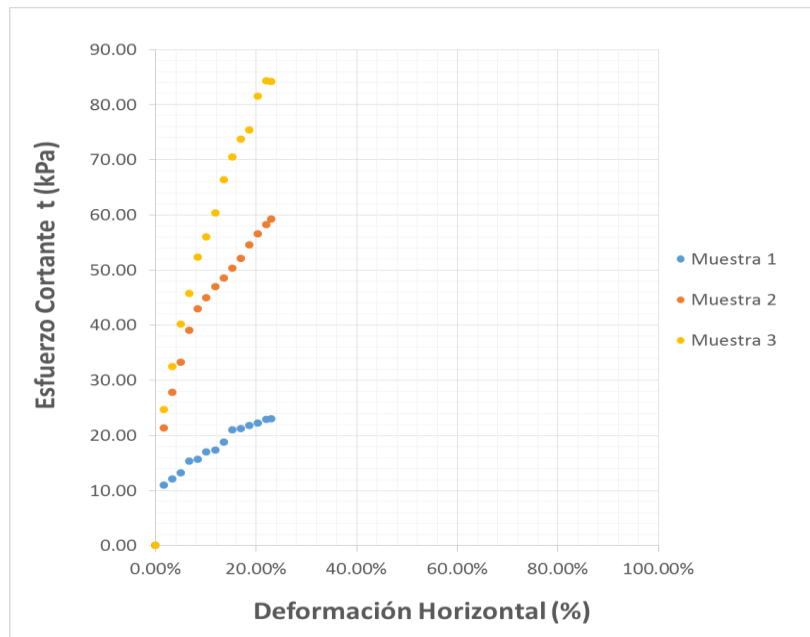
Figura 50 Envolvente de falla Arena Limosa muestra de control – Ensayo B Consolidado Drenado



Fuente: Autor.

| $\phi(^{\circ})$ | C (kPa) | T (kPa) |
|------------------|---------|---------|
| 29 | 10.5 | -18.881 |

Figura 51 Esfuerzo Cortante Vs Deformación Horizontal - Arena Limosa muestra de control – Ensayo B Consolidado Drenado



Fuente: Autor.

Tabla 17 Tabla resumen de resultados obtenidos en el ensayo de corte directo en muestras sin Vetiver

| Muestra | Angulo de fricción ϕ (°) | Cohesión c (kPa) | Tensión T (kPa) |
|---------|-------------------------------|------------------|-----------------|
| A | 33 | 0.0 | 0.0 |
| B | 29 | 10.5 | -18.88 |

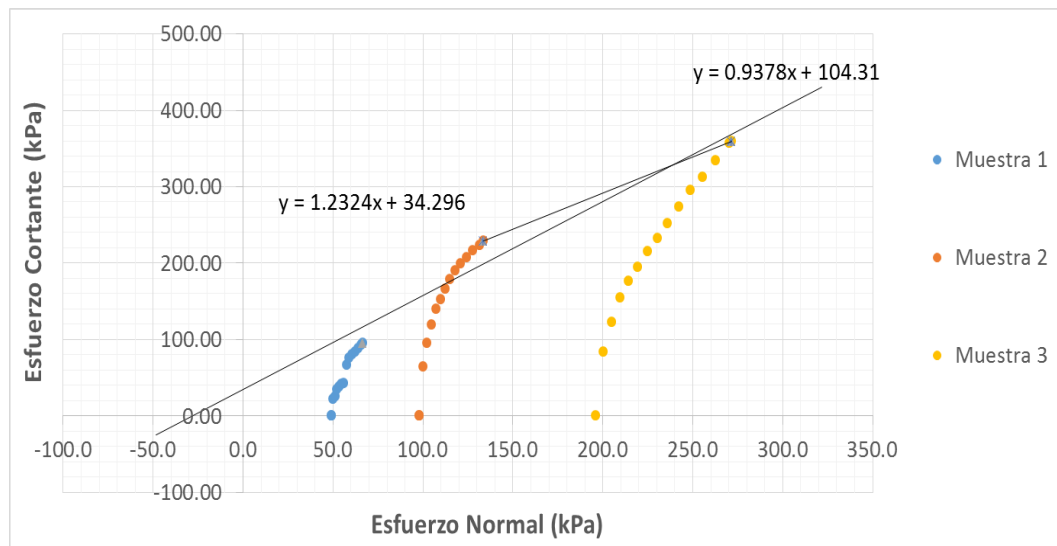
Fuente: Autor

Como se observa en los resultados de los ensayos de corte directo el valor del ángulo de fricción ϕ obtenido para ambos casos es muy similar, con valores entre 29° y 33°, la cohesión c con valores entre 0.0 kPa a 10.5 kPa y la tensión T entre 0.0 kPa a -18.88 kPa.

Los valores de ángulo de fricción y cohesión son coherentes a los dados por la literatura para este tipo de material.

Con respecto a la Figura 51 que relaciona la deformación horizontal contra esfuerzo cortante, se observa claramente en las muestras de control que las deformaciones de falla para los diferentes niveles de confinamiento se localizan entre el 10% y el 20%.

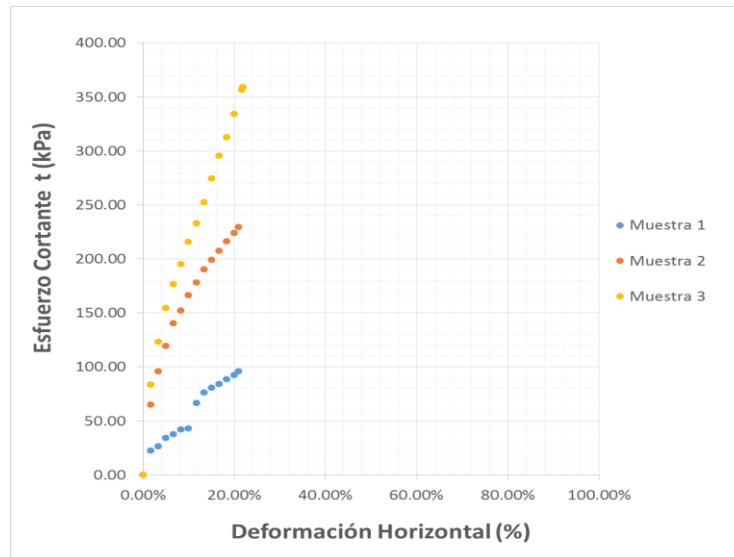
Figura 52 Envolvente de falla Arena Limosa muestra con Vetiver – Ensayo A Consolidado Drenado



| ϕ_1 (°) | C_1 (kPa) | T_1 (kPa) |
|--------------|-------------|-------------|
| 51 | 34.3 | -27.8 |

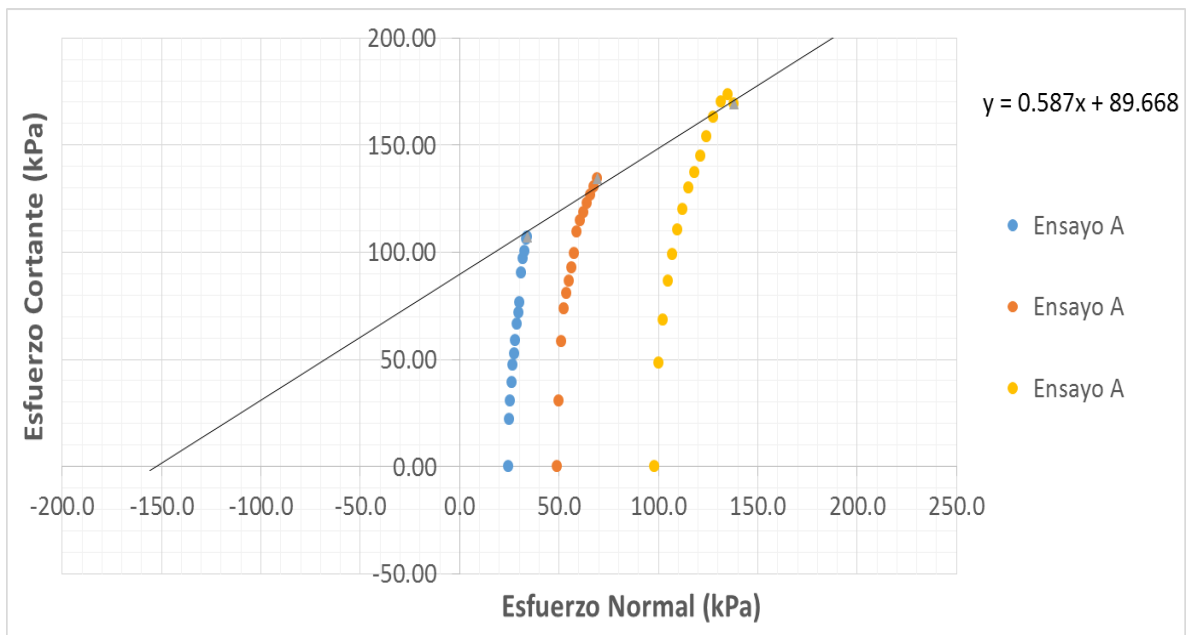
| ϕ_2 (°) | C_2 (kPa) | T_2 (kPa) |
|--------------|-------------|-------------|
| 43 | 104.3 | -111.23 |

Figura 53 Esfuerzo Cortante Vs Deformación Horizontal Arena Limosa muestra con Vetiver – Ensayo A Consolidado Drenado



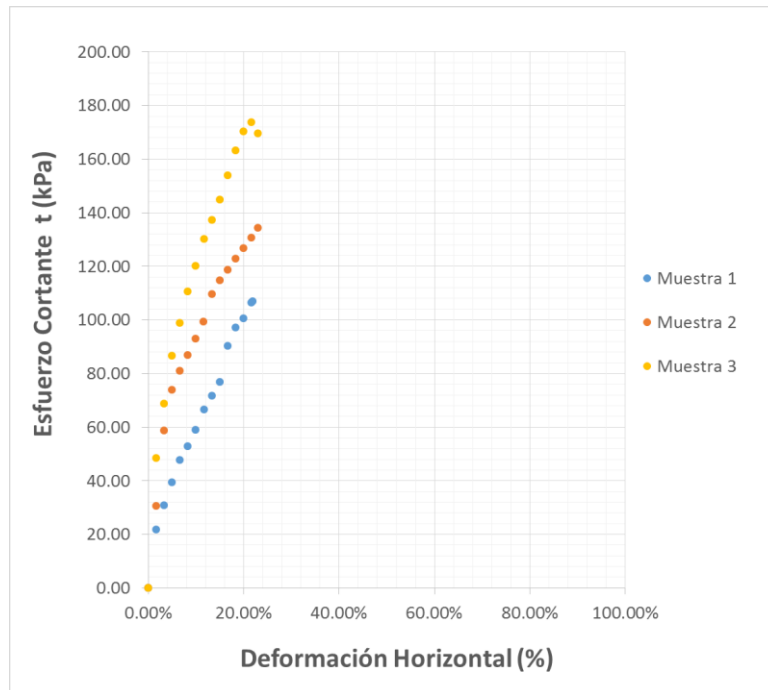
Fuente: Autor.

Figura 54 Envolvente de falla Arena Limosa muestra con Vetiver – Ensayo B Consolidado Drenado



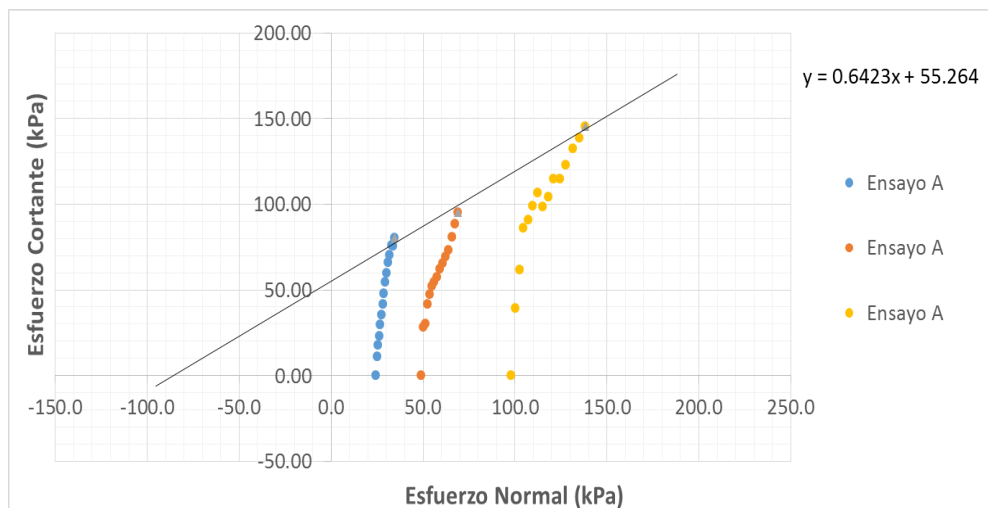
| $\phi(^{\circ})$ | C (kPa) | T (kPa) |
|------------------|---------|---------|
| 30 | 89.7 | -152.76 |

Figura 55 Esfuerzo Cortante Vs Deformación Horizontal Arena Limosa muestra con Vetiver – Ensayo B Consolidado Drenado



Fuente: Autor.

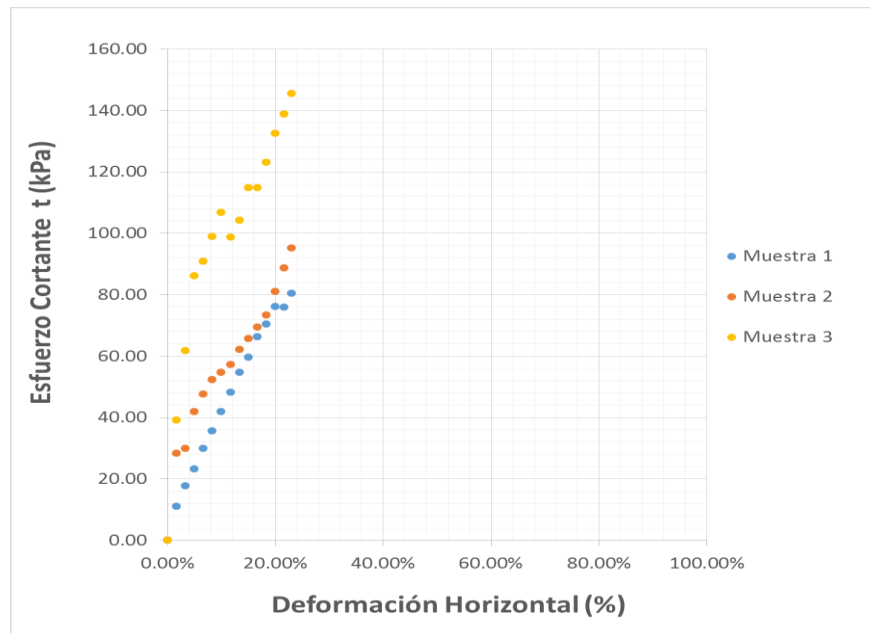
Figura 56 Envoltante de falla Arena Limosa muestra con Vetiver – Ensayo C Consolidado Drenado



Fuente: Autor.

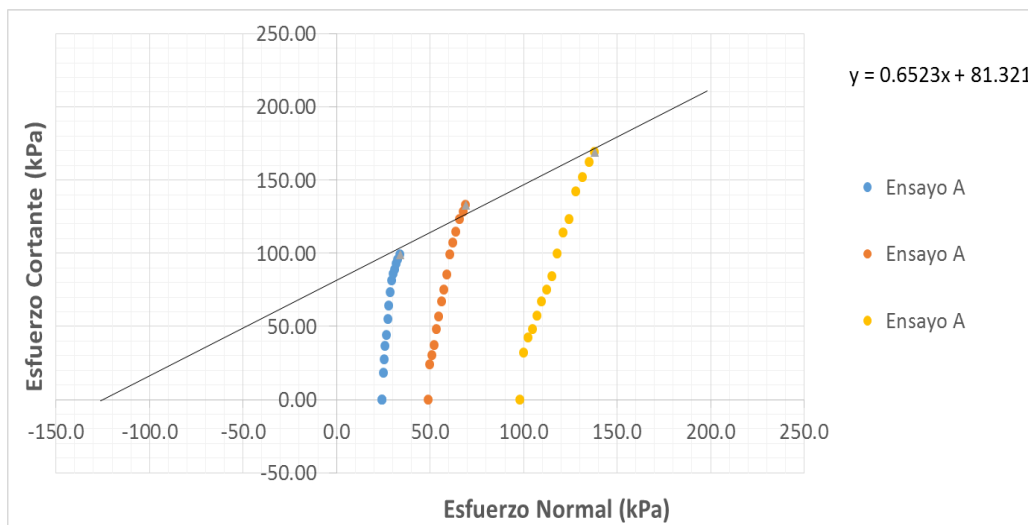
| $\phi(^{\circ})$ | C (kPa) | T (kPa) |
|------------------|---------|---------|
| 33 | 55.3 | -86.04 |

Figura 57 Esfuerzo Cortante Vs Deformación Horizontal Arena Limosa muestra con Vetiver – Ensayo C Consolidado Drenado



Fuente: Autor.

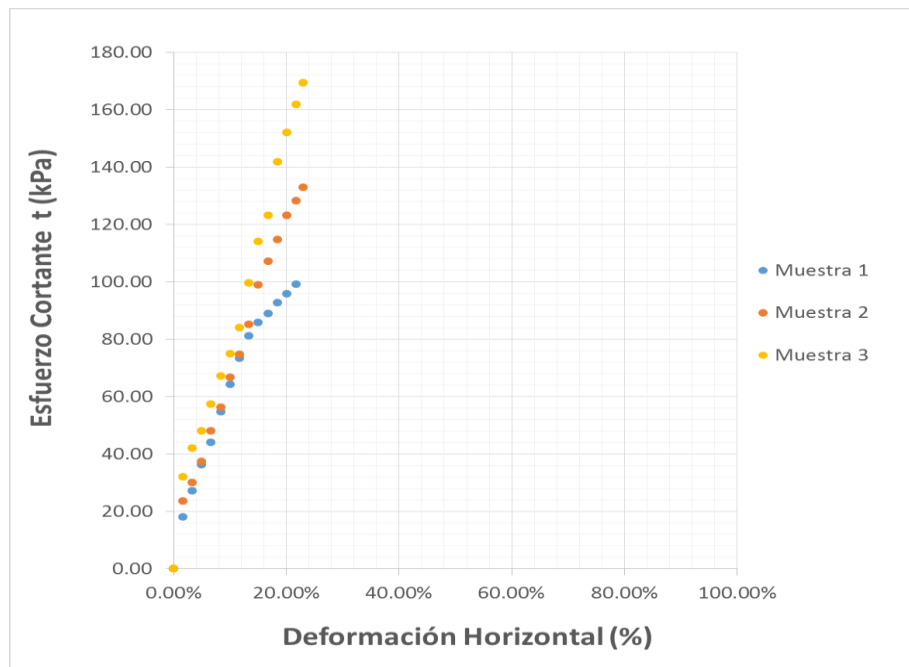
Figura 58 Envoltante de falla Arena Limosa muestra con Vetiver – Ensayo D Consolidado Drenado



Fuente: Autor.

| $\phi(^{\circ})$ | C (kPa) | T (kPa) |
|------------------|---------|---------|
| 33 | 81.3 | -124.67 |

Figura 59 Esfuerzo Cortante Vs Deformación Horizontal Arena Limosa muestra con Vetiver – Ensayo D Consolidado Drenado

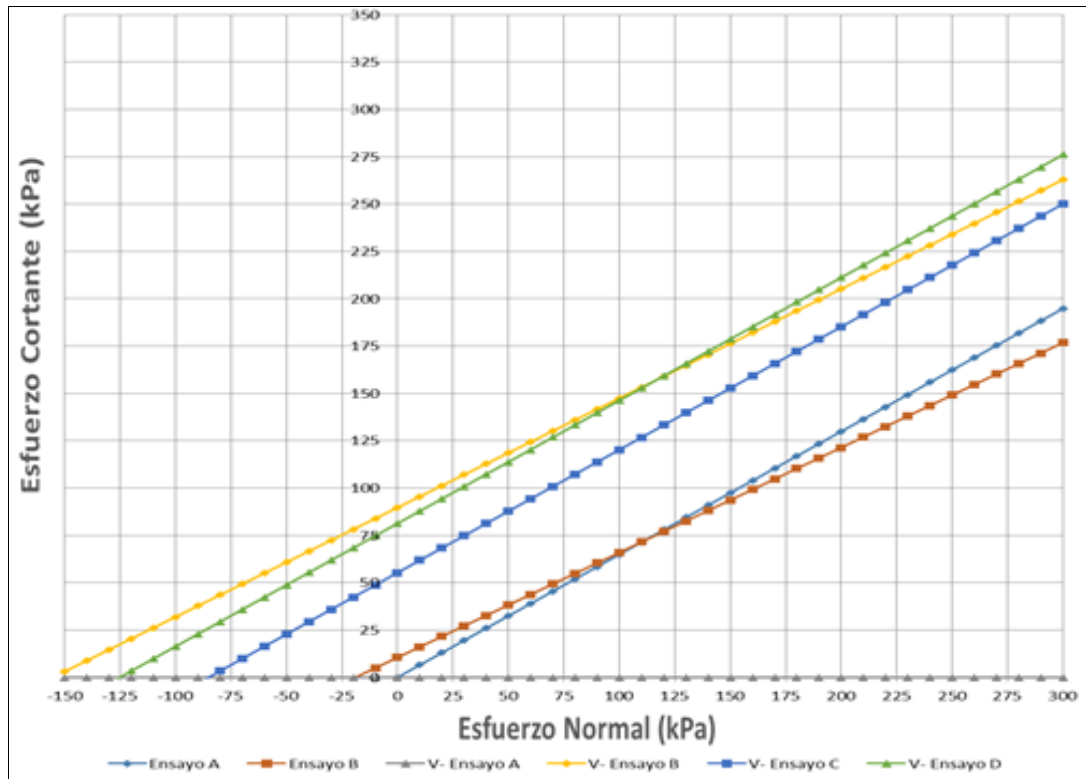


Fuente: Autor.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores se puede concluir que la muestra A en su primer punto por el nivel de esfuerzo de confinamiento se encuentra en un estado sobreconsolidado haciendo que el material presente dilatancia y por ende un ángulo de fricción muy elevado no característico del tipo de material ensayado por tal razón se realiza el análisis tomando solamente los dos últimos esfuerzos. Observando que hubo un incremento en el ángulo de fricción en la muestra con vetiver con respecto al ángulo de fricción en la muestra de control del orden de 10° a 20°. Sin embargo dadas las características del material ensayado la muestra A presenta importantes variaciones y por tal motivo genera un sesgo en los análisis.

En las muestras B, C y D se observa que el ángulo de fricción de los materiales obtenidos se mantiene constantes con respecto a las muestras de control. La inclusión de las raíces de vetiver en las muestras generó un incremento en la cohesión del material entre 500 % y 850% y la tensión entre 150% y 810%. Esta variación depende de la cantidad de raíces, el nivel de confinamiento y la resistencia de tensión la cual depende del diámetro de las raíces.

Figura 60 Envolventes de falla – Arena Limosa – Ensayo Consolidado Drenado



Fuente: Autor.

Tabla 18 Tabla resumen de resultados obtenidos en el ensayo de corte directo SM

| Muestras de control (Sin Vetiver) | | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|------------------|-----------------|
| Muestra | Angulo de fricción ϕ (°) | Cohesión c (kPa) | Tensión T (kPa) |
| A | 33 | 0.0 | 0.0 |
| B | 29 | 10.5 | -18.88 |
| Muestras con Vetiver | | | |
| Muestra | Angulo de fricción ϕ (°) | Cohesión c (kPa) | Tensión T (kPa) |
| B | 30 | 89.7 | -152.76 |
| C | 33 | 55.3 | -86.04 |
| D | 33 | 81.3 | -124.67 |

Fuente: Autor.

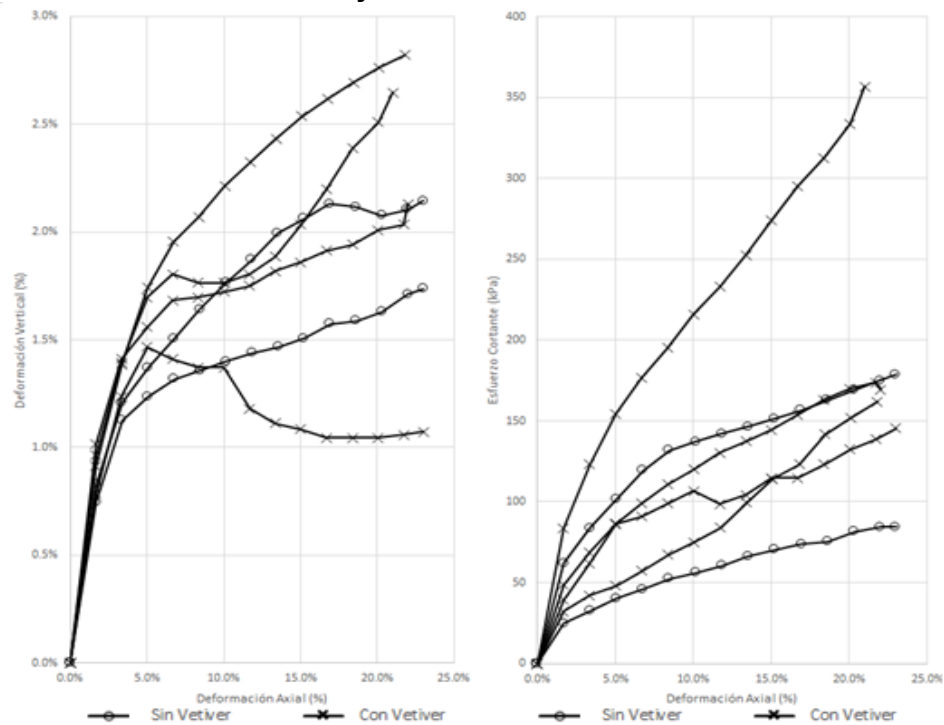
La Figura 60 agrupa las envolventes obtenida para los ensayos realizados, para las muestras sin y con Vetiver. En ésta figura se observa la clara influencia del vetiver en las envolventes, aumentando de forma evidente el valor de cohesión de

la muestra de suelo y dando una resistencia adicional a la tracción en las muestras evaluadas, que osciló entre 86 y 153 kPa.

No obstante lo anterior, la inclinación de las envolventes de falla no presenta una variación considerable, las curvas cambian pero permanecen relativamente paralelas entre sí.

Los resultados obtenidos de los ensayos de corte directo mostraron que las muestras no presentan comportamientos frágiles, es decir que no hay un pico de resistencia en el esfuerzo cortante y un posterior descenso, su comportamiento tiende a ser más dúctil. Dicho comportamiento está asociado por la composición de la muestra, que si bien es predominantemente arena, la fracción limosa en la muestra permite que los esfuerzos de falla se desarrollen de forma progresiva.

Figura 61 Deformación Vertical y Esfuerzo Cortante en función de la deformación horizontal – Arena Limosa – Ensayo Consolidado Drenado



Fuente: Autor.

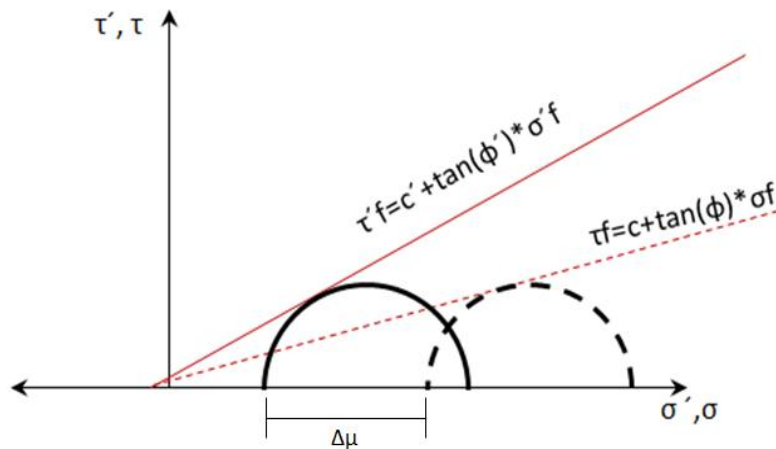
La Figura 61 muestra la deformación vertical y el esfuerzo cortante en función de la deformación horizontal. En las mismas, se observa que el comportamiento de las muestras es predominantemente dúctil. Así mismo la influencia del Vetiver en las muestras, con respecto a las deformaciones verticales, es concluyente debido a que no cambia su comportamiento.

6.4.1.2 Ensayo Consolidado No Drenado.

La condición no drenada en el desarrollo del ensayo de corte directo, genera que durante la deformación se generen esfuerzos de presiones de poros. Por lo cual la envolvente de resistencia producto del ensayo es diferente a la envolvente en términos de esfuerzos efectivos.

La envolvente de resistencia en término de esfuerzos totales, no es en realidad una envolvente de resistencia al corte, dado que en los suelos la resistencia al corte depende de los esfuerzos efectivos. Figura 62.

Figura 62 Envolvente de Falla en término de esfuerzos efectivos y en totales



Fuente: Autor.

Debido a que los ensayos de corte directo realizados no cuentan con mediciones de la presión de poros no es posible obtener la envolvente de falla real, que relaciona los esfuerzos efectivos con el valor de cohesión y ángulo de fricción interna del material.

No obstante lo anterior es posible comparar lo obtenido en muestras con Vetiver y sin Vetiver en ensayos de corte directo Consolidados No drenados y así evaluar la influencia en los datos obtenidos.

Figura 63 Envolventes de falla – Arena Limosa – Ensayo Consolidado No Drenado

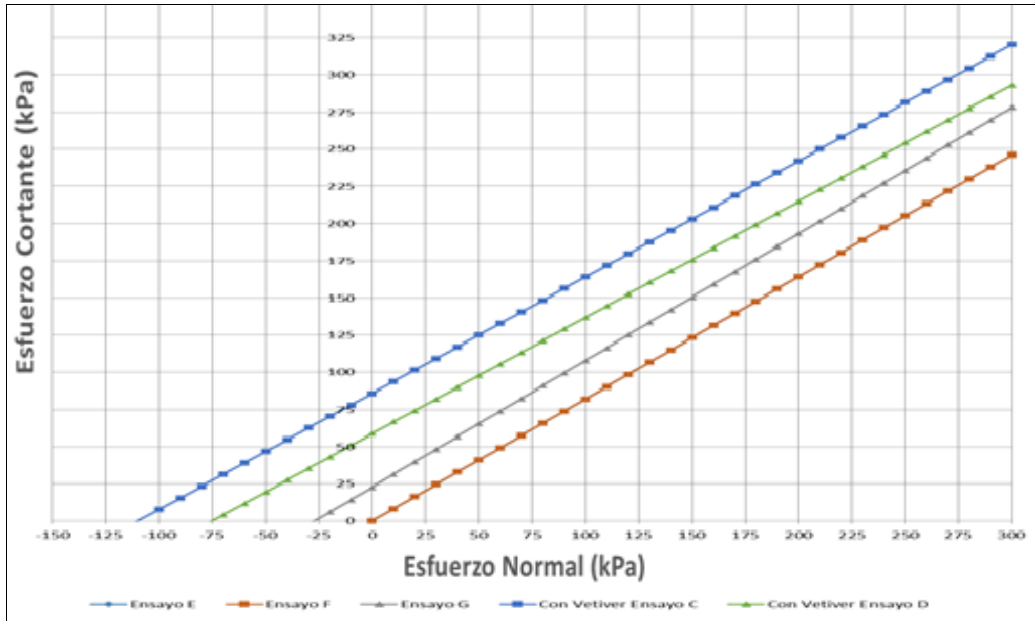
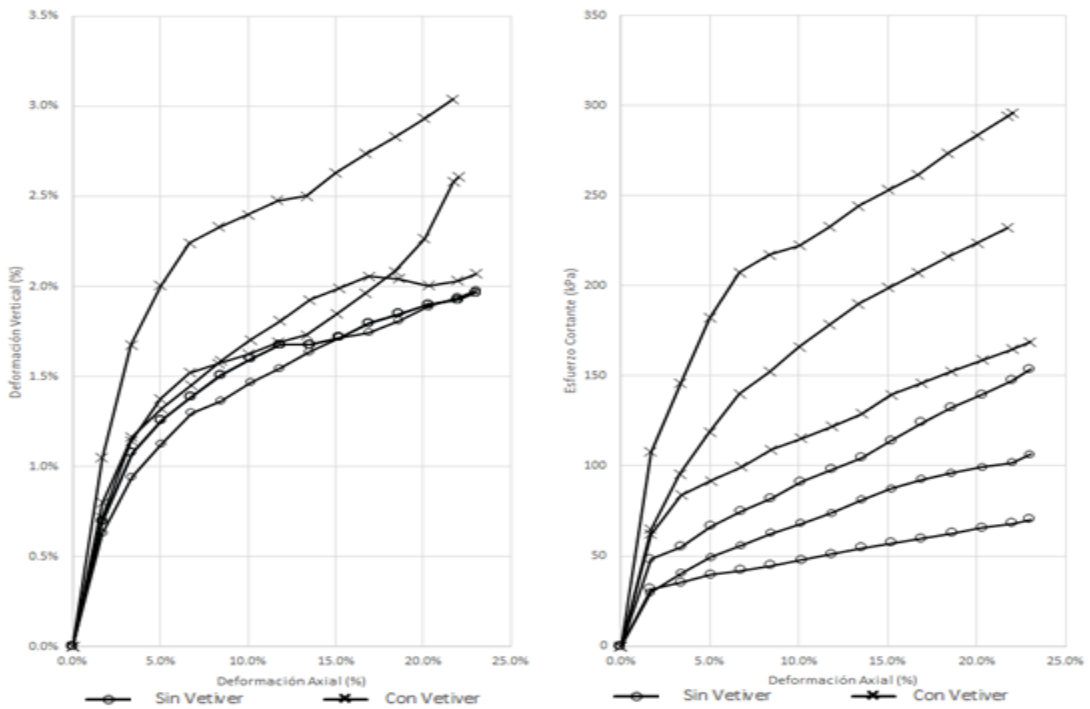


Figura 64 Deformación Vertical y Esfuerzo Cortante en función de la deformación horizontal – Arena Limosa – Ensayo Consolidado No Drenado



Fuente: Autor.

La Figura 63 que representa las envolventes obtenidas para los cortes de la modalidad consolidado no drenado. Estas curvas muestran que los ensayos no drenados tienden a tener valores mayores de cohesión para las muestras de control, este comportamiento ya fue descrito anteriormente y estas curvas muestran de forma clara este comportamiento.

Ahora bien, es evidente en las curvas obtenidas, que la inclinación de las envolventes es considerablemente mayor para las muestras con vetiver. Adicionalmente los valores de cohesión que se obtienen tras el análisis son mayores para las muestras, los valores de cohesión obtenidos para estos casos son altos. Valores entre 59 y 86 kPa son considerablemente altos para arenas limosas aun cuando la modalidad del ensayo es consolidado no drenado.

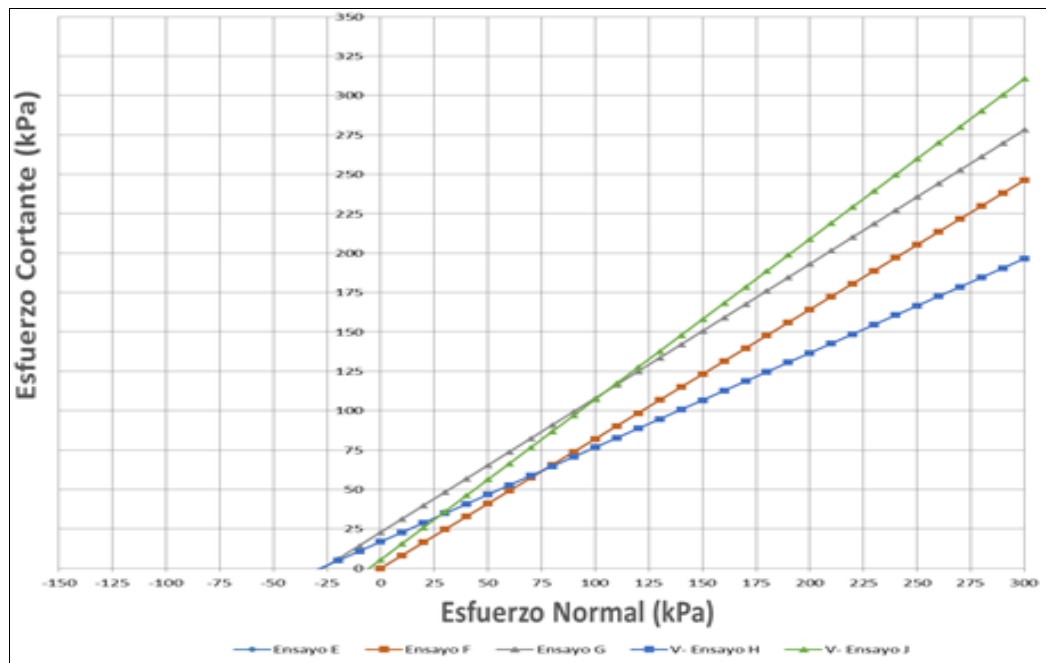
La Figura 64, que agrupa la deformación vertical y el esfuerzo cortante en función de la deformación horizontal, muestra que las curvas de deformación vertical tienden a agruparse en un valor fijo, tienen una tendencia muy similar entre ellas; no obstante los esfuerzos necesarios para llegar a estas deformaciones son considerablemente mayores para las muestras con vetiver, un claro incremento en estos valores se observa en la figura correspondiente.

6.4.1.3 Ensayo No Consolidado No Drenado.

De forma similar a como se describió anteriormente, el ensayo de corte directo no consolidado no drenado, no arroja por si solo una condición real en la falla. Producto de este ensayo se obtiene un envolvente de falla para la condición evaluada, más no la correspondiente al material, y en el caso específico en que la muestra no está consolidada, la interpretación de los valores obtenidos tiende a ser compleja y depende de la condición de análisis posterior y no solo de los valores arrojados por el ensayo.

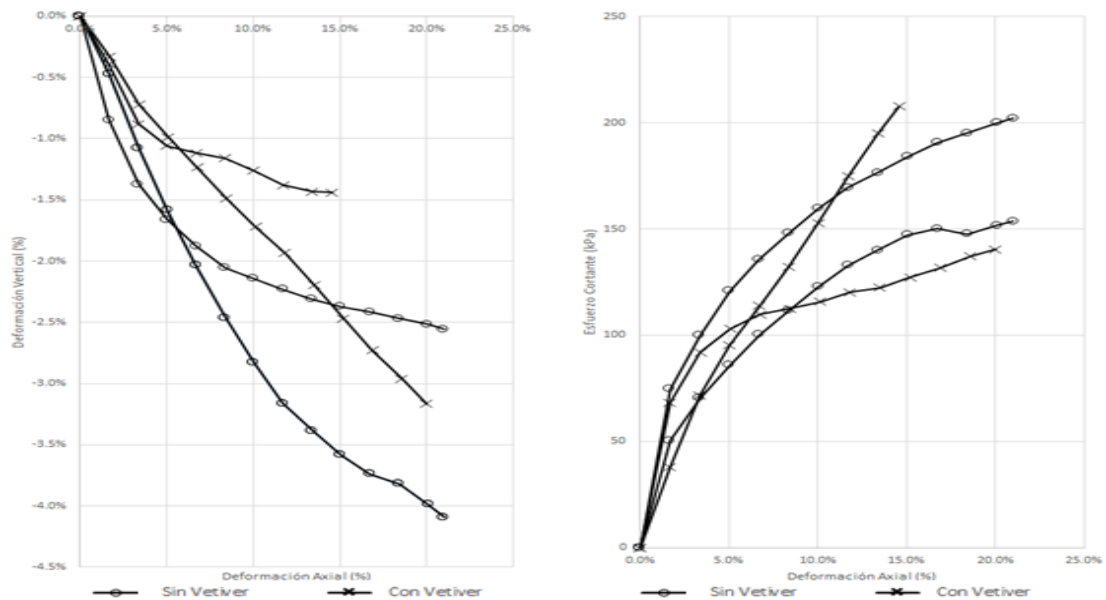
Con los valores obtenidos de cohesión y ángulo de fricción se construyeron las envolventes de falla correspondientes presentadas, las cuales se presentan en la Figura 63. Esta figura muestra que las envolventes de falla obtenidas son muy similares entre sí, no hay una clara diferencia entre las que tienen vetiver con las que no lo tienen.

Figura 65 Envolventes de falla – Arena Limosa – Ensayo No Consolidado No Drenado



Fuente: Autor.

Figura 66 Deformación Vertical y Esfuerzo Cortante en función de la deformación horizontal – Arena Limosa – Ensayo No Consolidado No Drenado



Fuente: Autor.

La Figura 66 la cual muestra la deformación vertical y el esfuerzo cortante en función de la deformación horizontal, muestra la influencia de la condición no consolidada del ensayo. Es por esto que la deformación vertical registrada en el ensayo es negativa, es decir que su volumen disminuye a medida que se desarrolla la deformación horizontal. En este caso se ve un comportamiento leve de las muestras con Vetiver a resistir el proceso de deformación.

Respecto a los valores de esfuerzos cortantes desarrollados durante el ensayo, no hay una tendencia que permita discriminar entre el comportamiento de las muestras con y sin Vetiver, las muestras siguen una tendencia muy parecida y siempre creciente con el desarrollo de las deformaciones horizontales.

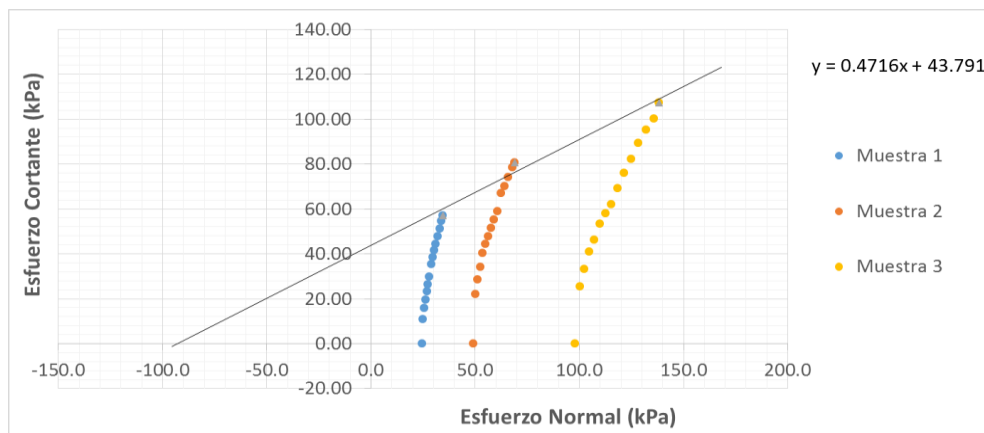
6.4.2 ARENA ARCILLO LIMOSA (SM-SC)

De forma similar a lo desarrollado para la Arena Limosa, se realizaron ensayos de corte directo para muestras de Arena Arcillo Limosa, analizando la influencia del Vetiver en los parámetros de resistencia y en su comportamiento en general. Los siguientes numerales resumen lo obtenido en estos ensayos.

6.4.2.1 Ensayo Consolidado Drenado

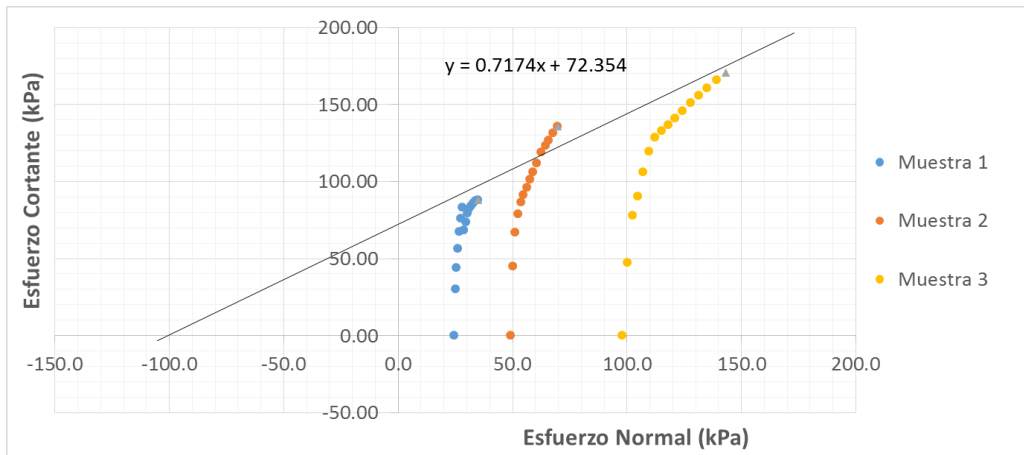
Las muestras ensayadas corresponden a Arenas Arcillo Limosas, es de esperar que la presencia de materiales como las arcillas en la composición de la muestra tenga efecto en el valor de cohesión que al final de los ensayos se obtenga. Respecto al ángulo de fricción, si bien la fracción granular de la muestra no se ve alterada según su descripción, es común que el valor del ángulo de fricción ϕ se vea reducido con respecto a los valores obtenidos para la Arenas Limosa.

Figura 67 Envoltente de falla Arena Arcillo Limosa muestra Control – Ensayo A Consolidado Drenado



| ϕ (°) | C (kPa) | T (kPa) |
|------------|---------|---------|
| 25 | 43.8 | -92.86 |

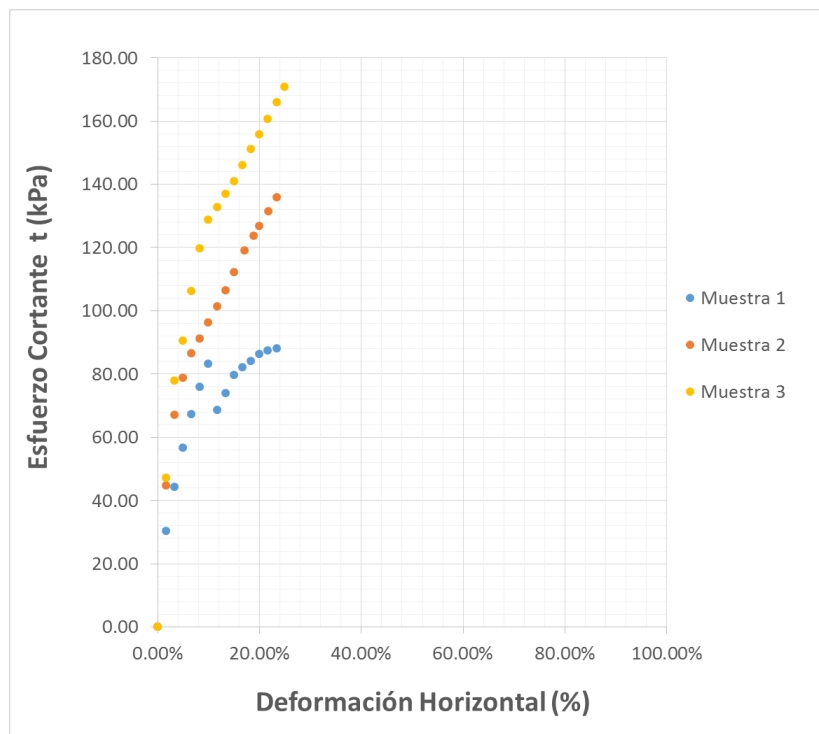
Figura 68 Envolvente de falla Arena Arcillo Limosa muestra con Vetiver – Ensayo A Consolidado Drenado



Fuente: Autor.

| $\phi(^{\circ})$ | C (kPa) | T (kPa) |
|------------------|---------|---------|
| 36 | 72.4 | -100.86 |

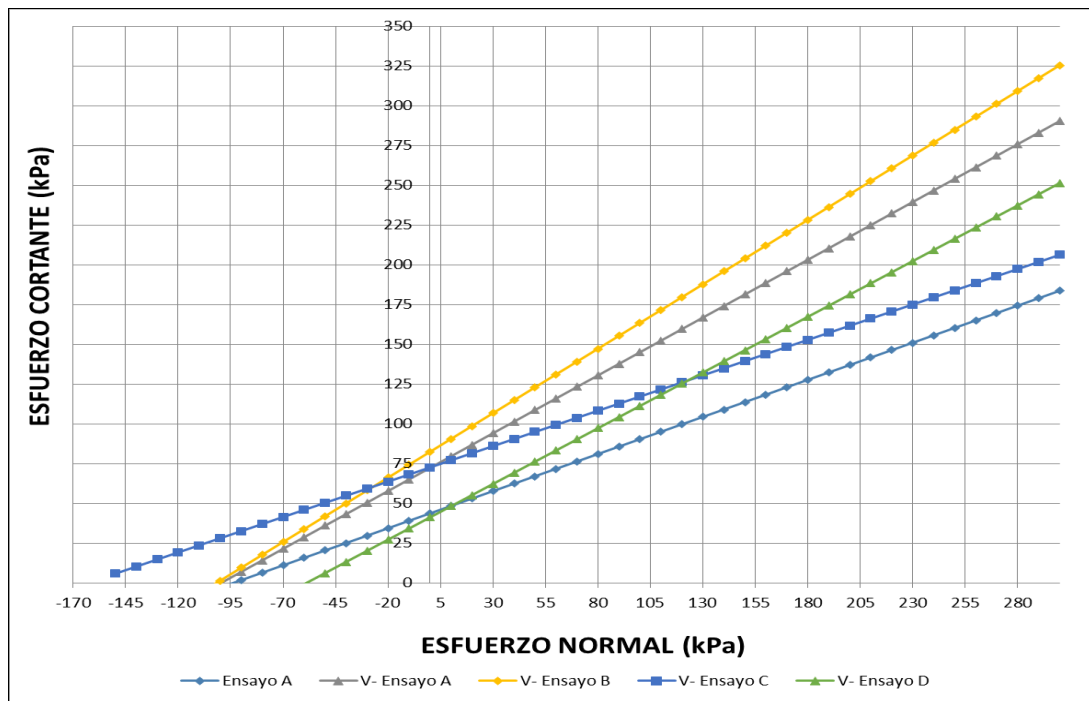
Figura 69 Esfuerzo Cortante Vs Deformación Horizontal Arena Limosa muestra con Vetiver – Ensayo A Consolidado Drenado



Fuente: Autor.

La Figura 70, que compila las envolventes de falla obtenidas muestra un claro cambio entre las muestras con y sin Vetiver, siendo estas últimas las que presenta propiedades más bajas, es decir, menores valores de cohesión y de ángulo de fricción. Las envolventes de las muestras con vetiver son muy similares, sobre todo en la inclinación, aun cuando el valor de cohesión cambia levemente la inclinación de cada una varía muy poco.

Figura 70 Envolventes de falla – Arena Arcillo Limosa – Ensayo Consolidado Drenado



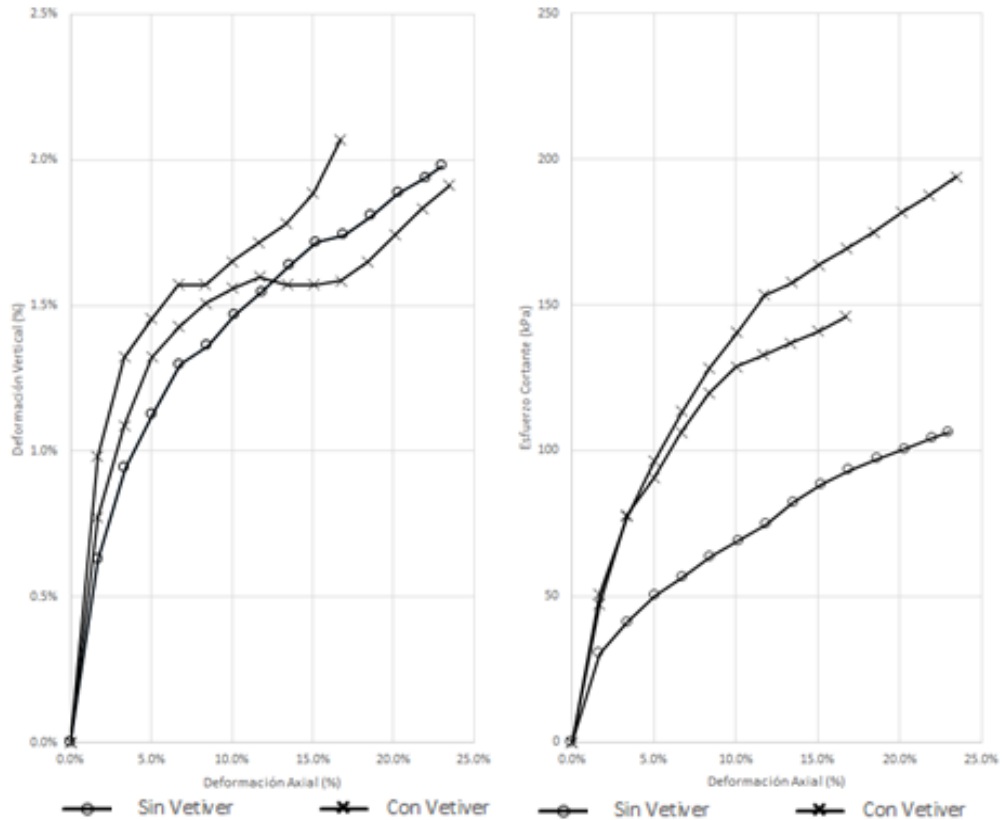
Fuente: Autor.

Tabla 19 Tabla resumen de resultados obtenidos en el ensayo de corte directo SM-SC

| Muestras con Vetiver | | | |
|--|-------------------------------|------------------|-----------------|
| Muestra | Angulo de fricción ϕ (°) | Cohesión c (kPa) | Tensión T (kPa) |
| A | 36 | 72.4 | -100.86 |
| B | 39 | 82.5 | -101.103 |
| C | 24 | 72.7 | -162.28 |
| D | 35 | 41.3 | -58.48 |
| Muestras de control (Sin Vetiver) | | | |
| Muestra | Angulo de fricción ϕ (°) | Cohesión c (kPa) | Tensión T (kPa) |
| A | 25 | 43.8 | -92.86 |

Fuente: Autor.

Figura 71 Deformación Vertical y Esfuerzo Cortante en función de la deformación horizontal – Arena Arcillo Limosa – Ensayo Consolidado Drenado



Fuente: Autor.

Ahora bien, la deformación vertical en función de la deformación horizontal (Figura 64), muestra un comportamiento muy similar entre las muestras con y sin Vetiver, ambos casos, hay un claro aumento en la deformación vertical en el desarrollo del ensayo. Respecto del esfuerzo cortante necesario para deformar la muestra, es evidente la diferencia entre las muestras con y sin Vetiver. Este comportamiento fue observado y comentado en numerales anteriores.

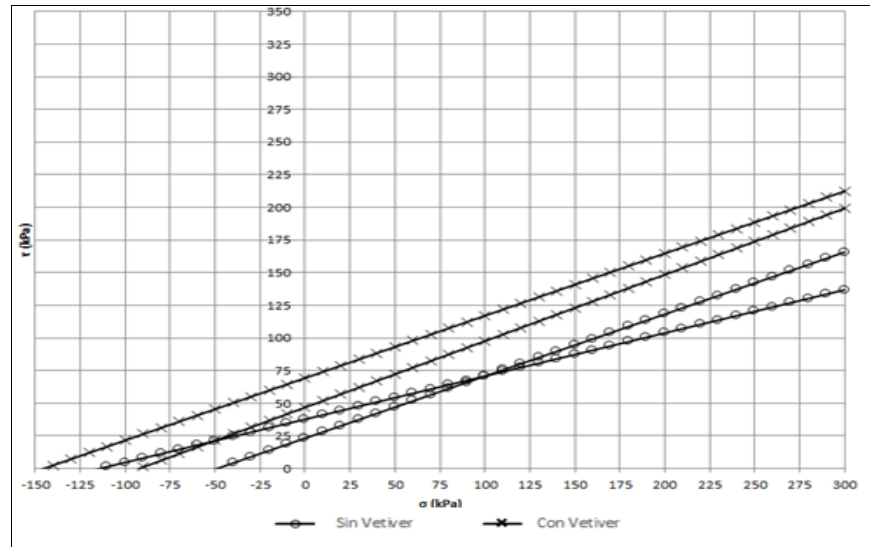
6.4.2.2 Ensayo Consolidado No Drenado.

Los valores de la inclinación de la envolvente de falla obtenidos tras el análisis (Figura 72), muestra una clara tendencia hacia 25°, tanto para las muestras con presencia de Vetiver como las de control. El valor máximo obtenido se obtiene a bajas deformaciones, antes del 5%, esto ha comparación de otros ensayos cuyos valores máximos se obtienen después del 10% de deformación.

Las envolventes obtenidas del análisis de la cohesión y ángulo de fricción muestran una clara tendencia a ser paralelas entre sí, no obstante los cambios en el valor de cohesión obtenido para cada caso es evidente, siendo este último

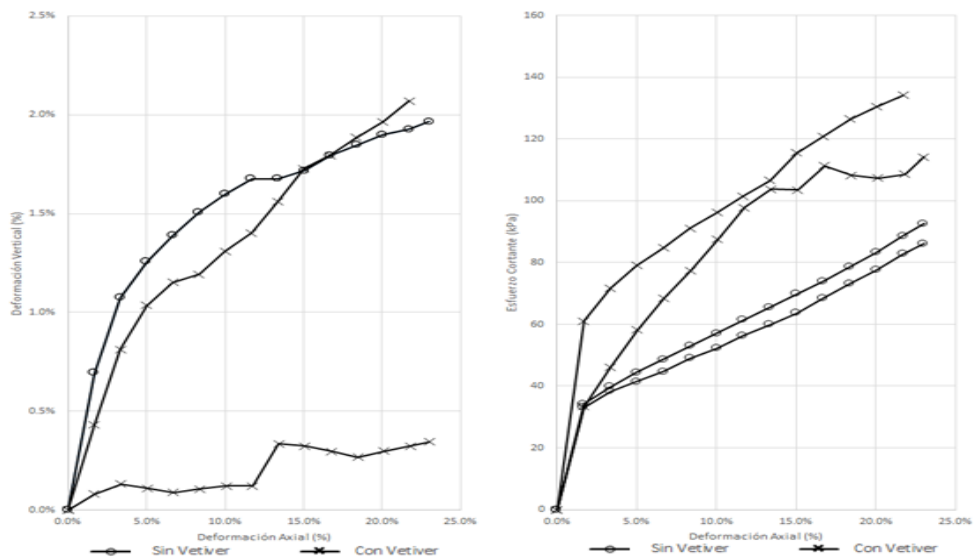
parámetro el que más llama la atención en la comparación entre muestras con y sin Vetiver.

Figura 72 Envolventes de falla – Arena Arcillo Limosa – Ensayo Consolidado No Drenado



Fuente: Autor.

Figura 73 Deformación Vertical y Esfuerzo Cortante en función de la deformación horizontal – Arena Arcillo Limosa – Ensayo Consolidado No Drenado

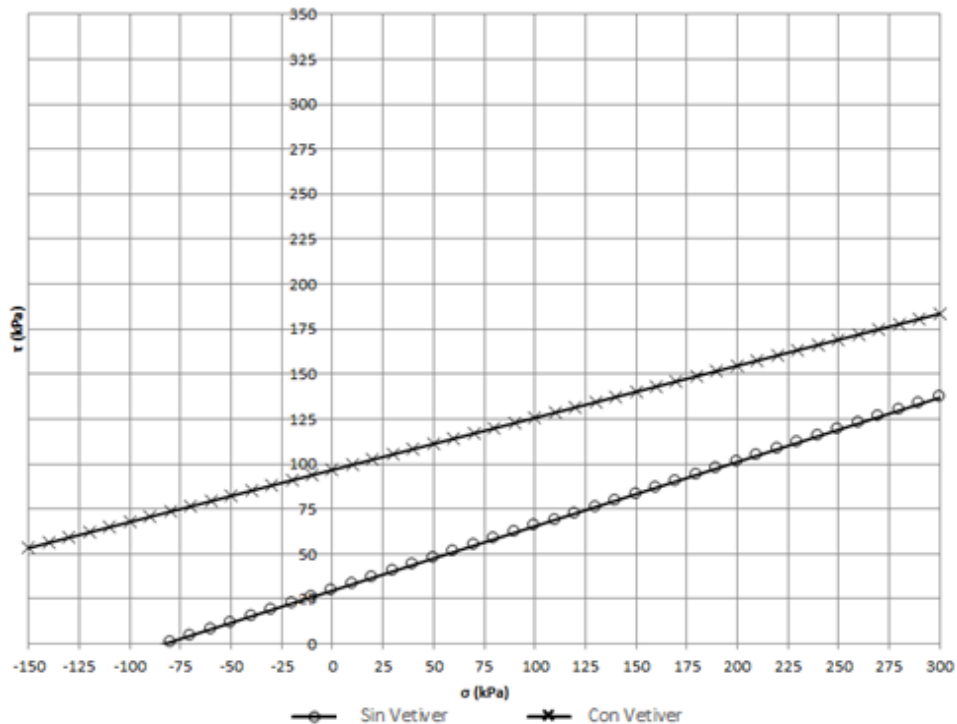


Fuente: Autor.

La Figura 73 muestra que tanto las muestras con presencia de Vetiver como las que no tienen, en función de la deformación vertical. Los esfuerzos registrados muestran que si bien se logran las mismas deformaciones el esfuerzo cortante en las muestras con Vetiver es considerablemente mayor, respecto a las muestras de control.

6.4.2.3 Ensayo No Consolidado No Drenado.

Figura 74 Envolventes de falla – Arena Arcillo Limosa – Ensayo No Consolidado No Drenado

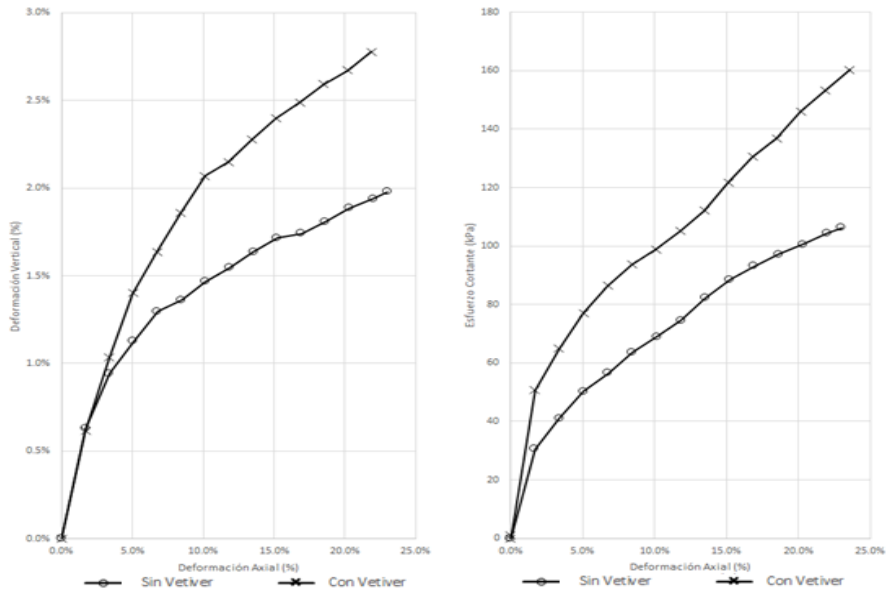


Fuente: Autor.

Las envolventes obtenidas muestran que la presencia de vetiver en las muestras no genera un cambio considerable en la inclinación de la envolvente de falla, no obstante el valor de cohesión obtenido del análisis es considerablemente mayor y muy cercano a 100 kPa.

La Figura 75, muestra que tanto la muestra con vetiver como la que no tiene vetiver en su composición tienen deformación vertical en el desarrollo del ensayo, la muestra con Vetiver llega a deformaciones mayores. Así mismo los esfuerzos registrados durante el desarrollo del ensayo, para las muestras con vetiver, se desarrollan mayores niveles de fuerza, esto con respecto a las muestras de control.

Figura 75 Deformación Vertical y Esfuerzo Cortante en función de la deformación horizontal – Arena Arcillo Limosa – Ensayo No Consolidado No Drenado

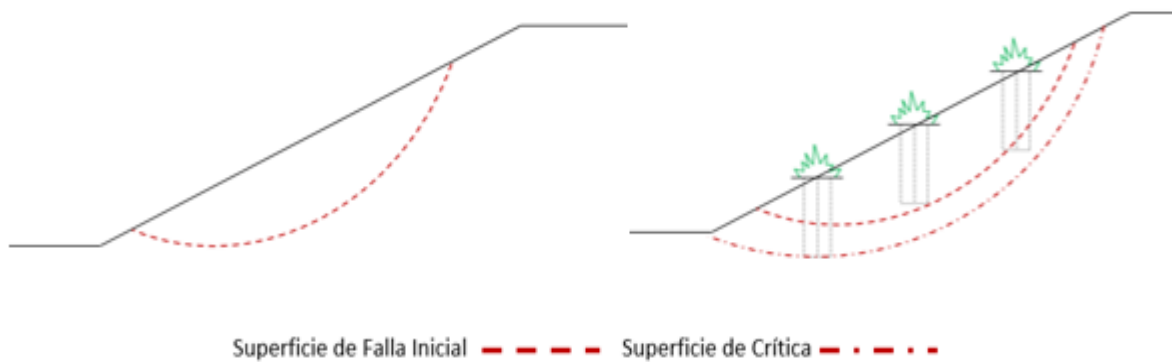


Fuente: Autor.

6.5. SIMULACIÓN

No basta con la obtención de los parámetros geomecánicos de los materiales si no es posible simular las condiciones de las laderas y como el cambio de estos parámetros influyen la estabilidad de la misma. Con tal fin, se simulará la variación del factor de seguridad de taludes homogéneos, de pendientes definidas.

Figura 76 Superficies de falla en el análisis de estabilidad



Fuente: Autor.

El proceso de simulación de la influencia de la variación de los parámetros geomecánicos del suelo por la presencia del Vetiver en su composición, se realizará teniendo en cuenta tres condiciones: la primera la variación del factor de seguridad de la ladera en función de la inclinación del talud de corte, teniendo este valor como base, se modifican los parámetros de los materiales en función a lo obtenido en el anterior análisis y se obtiene un nuevo factor de seguridad el cual se variará debido a la inclinación de la ladera, finalmente se analizará la resistencia al corte de estructuras sobre la ladera para obtener los mismos factores de seguridad que se obtuvieron con la simulación del Vetiver.

6.5.1 Parámetros de Análisis.

Como resultado de los análisis del ensayo de corte directo se obtuvieron los parámetros de análisis necesarios para la evaluación de los factores de seguridad de los taludes. Los parámetros consisten en la cohesión del material y el ángulo de fricción, tanto para la muestra de suelo como para el conjunto ensayado de suelo con presencia de raíces del Vetiver. Los valores utilizados se presentan en la Tabla 16.

Tabla 20 Parámetros de Análisis

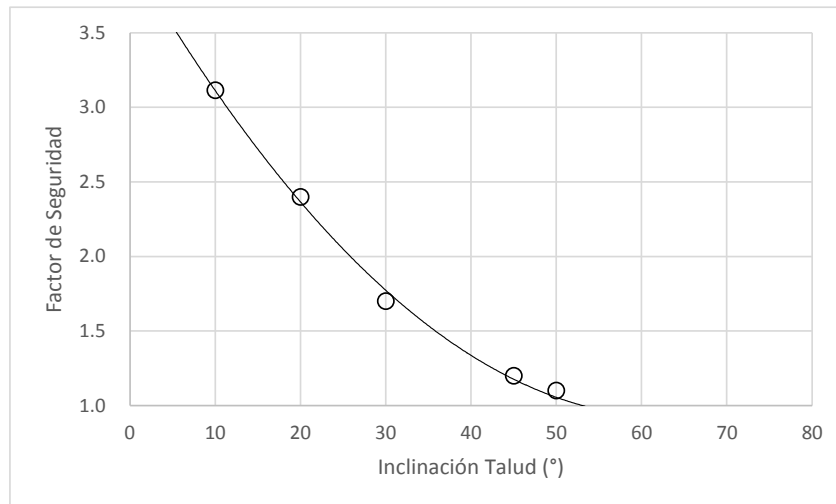
| Nombre | γ (kN/m ³) | c (kPa) | ϕ (°) |
|-----------------|-------------------------------|---------|------------|
| Suelo | 21 | 5 | 32 |
| Suelo y Vetiver | 19 | 65 | 37 |

Fuente: Autor.

6.5.2 Análisis Sin Vetiver.

El análisis sin Vetiver consiste en la obtención del factor de seguridad de la ladera con parámetros geomecánicos fijos y solo cambiando la inclinación de los taludes, la altura de los mismos es fija, siempre de 5.0 metros y las pendientes evaluadas se utilizarán para formar una curva de pendiente contra factor de seguridad. La Figura 77 agrupa los factores de seguridad obtenidos para cada pendiente analizada.

Figura 77 Variación del factor de seguridad en función de la inclinación del talud- Sin Vetiver.



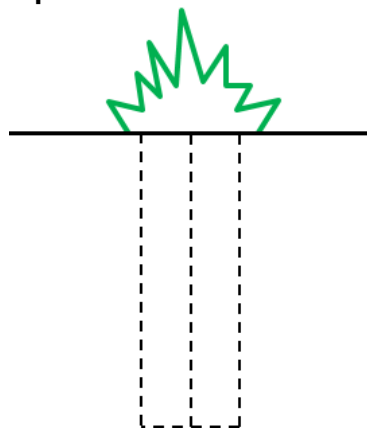
Fuente: Autor.

Como se observa el factor de seguridad desciende a medida que la inclinación del talud aumenta, obtenido el valor de equilibrio límite (factor de seguridad igual a la unidad) cuando la inclinación del mismo es cercana a 55°.

6.5.3 Análisis Con Vetiver.

Tras obtener los valores del factor de seguridad los taludes en ausencia de Vetiver es posible configurar los taludes de forma tal que en las zonas donde se proyecta la disposición de la planta las propiedades del suelo cambien de forma tal que se simule las condiciones de la ladera con Vetiver.

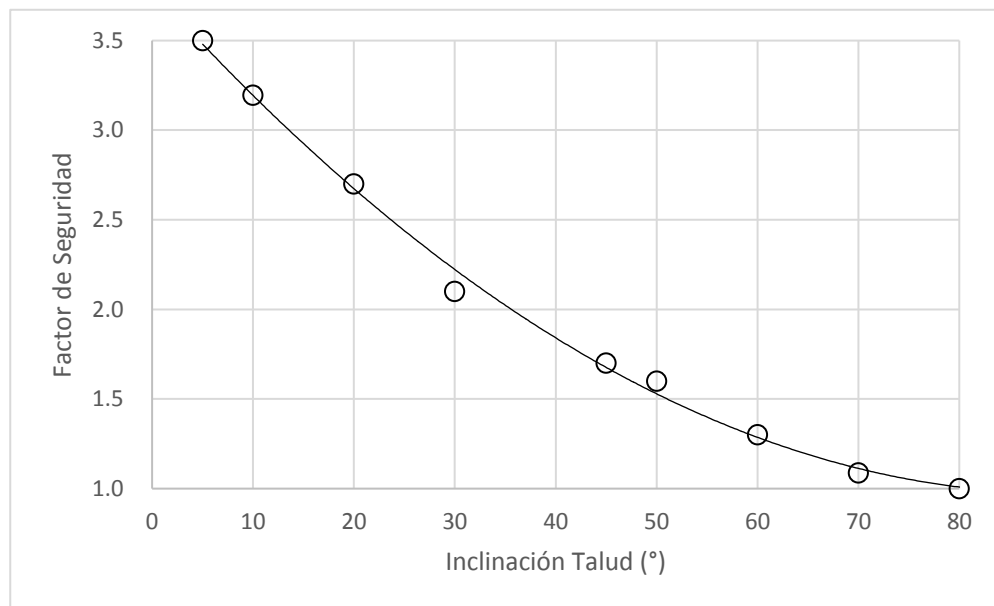
Figura 78 Corte transversal de pasto Vetiver con area de influencia de la planta



Fuente: Autor.

Para tal fin se definieron cinco modelos de taludes con altura de 5 m, variando sus pendientes (20°,30°,45°,50° y 60°), para los cuales se especificó un área de influencia de la siguiente manera; la profundidad corresponde a un cilindro de altura igual a 2.0 metros (40% de la altura total del talud) y un radio de 0.3 metros correspondientes al diámetro total de la macolla del Vetiver. Una vez definida la geometría del modelo se procede a introducir las propiedades de los materiales (suelo y planta) las cuales se obtuvieron mediante ensayos de laboratorio y campo.

Figura 79 Variación del factor de seguridad en función de la inclinación del talud- Con Vetiver-Superficie de falla Crítica

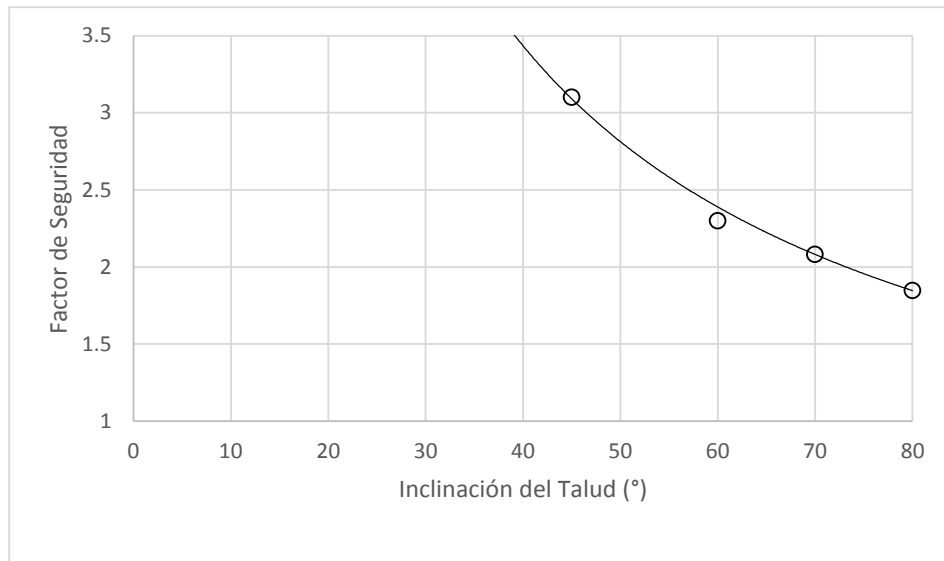


Fuente: Autor.

Como se observa el factor de seguridad desciende a medida que la inclinación del talud aumenta, obtenido el valor de equilibrio límite (factor de seguridad igual a la unidad) cuando la inclinación del mismo es cercana a 80°.

El anterior análisis correspondió a la superficie de falla con el menor factor de seguridad, y no al análisis de la superficie obtenida en el análisis sin la presencia de la planta, por lo cual se analiza nuevamente el factor de seguridad de la ladera teniendo fija la superficie de falla obtenida en el análisis sin Vetiver.

**Figura 80 Variación del factor de seguridad en función de la inclinación del talud-
Con Vetiver-Superficie de falla Inicial**

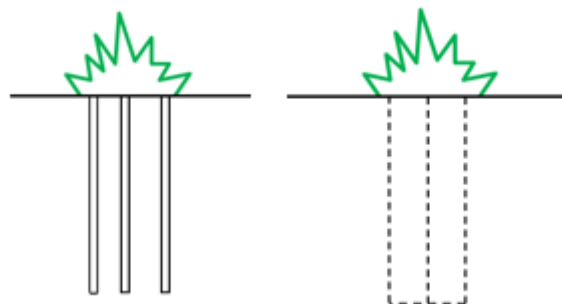


Fuente: Autor.

Como se observa en la Figura 79, hay un aumento considerable de los factores de seguridad obtenidos, no obstante siendo que este no es el factor de seguridad crítico de la ladera es una buena forma de aproximarse al análisis de la influencia del Vetiver en la estabilidad de la ladera.

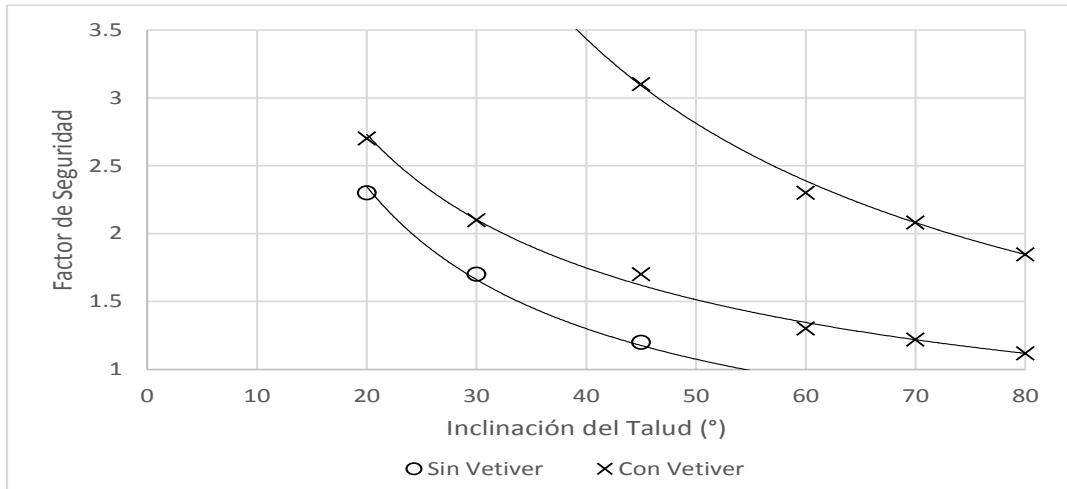
Una propuesta adicional para el análisis de la influencia del Vetiver en la ladera es simular el factor de seguridad obtenido en los análisis anteriores con la presencia de estructuras tales como micropilotes, los cuales se caracterizan por disposición en la ladera y su espaciamiento en profundidad y por su resistencia al cortante.

Figura 81 Analogía del Vetiver con Micropilotes



Fuente: Autor.

Figura 82 Análisis del Factor de Seguridad

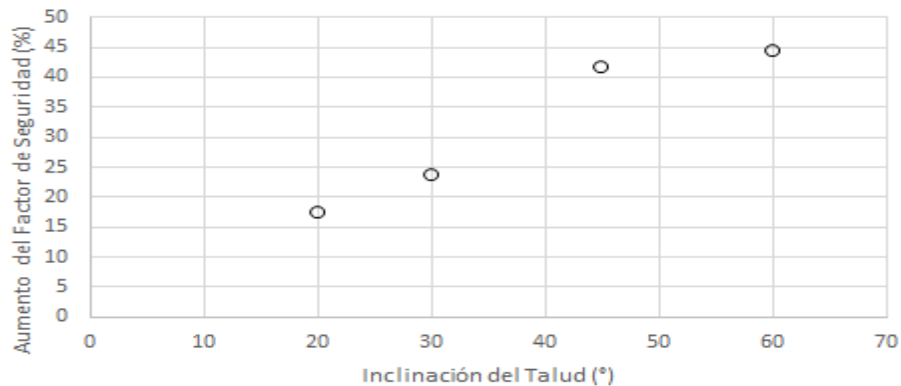


Fuente: Autor.

La Figura 82, la cual agrupa los factores de seguridad obtenidos tras el análisis de estabilidad de los taludes con la presencia del Vetiver y sin la presencia del mismo, muestra que es evidente el aumento del factor de seguridad tras la simulación de la planta en los taludes.

La influencia del factor de seguridad con la superficie de falla crítica es mucho menor que el valor obtenido para la superficie de falla inicial, esto es de esperarse ya que el aumento de las propiedades del suelo no solo influencia el factor de seguridad también la forma como el talud se comporta frente a procesos que lo pueden inestabilizar.

Figura 83 Aumento del factor de seguridad en función de la inclinación del talud



Fuente: Autor.

Adicionalmente el efecto es más notorio en taludes con pendientes altas que con pendientes bajas, es decir el porcentaje en que el factor de seguridad sube es mayor para pendientes altas que para pendientes bajas. La Figura 83 muestra el aumento del factor de seguridad en función de la pendiente del talud.

CONCLUSIONES

- Geológicamente la zona del proyecto hacia el lado del río Las Ceibas se conforma por depósitos cuaternarios recientes, mientras que el sitio objeto de estudio está constituido por materiales sedimentarios de edad terciaria.
- Geomorfológicamente en la zona del proyecto se presentan diversas geoformas como son el cauce aluvial del río Las Ceibas, el vallecito que forma el río y las laderas o sierras estructurales que dejan ver un conjunto de lomas.
- El pasto Vetiver es un cultivo ecológico y rentable con el cual se logran objetivos multipropósitos en cuanto al desarrollo en el tratamiento de aguas residuales, máxime cuando se tiene presencia de macronutrientes en dichas aguas.
- En conclusión se obtuvieron en éste experimento alturas medias de 138.07 cm con alturas máximas de 162.00 cm por las plantas de vetiver sembradas en suelo y mínimas de 114.00 cm. Determinado así que estas plantas tuvieron un mayor desarrollo aéreo en cuanto a la altura de sus macollas que las que fueron sembradas en las bandejas flotantes.
- Es importante anotar que las plantas sembradas en suelo tienden a tener mayor desarrollo en su parte foliar (altura) sin necesidad de estar en contacto directo o permanente con el agua.
- Se determinó que el pasto vetiver tiene un mejor desarrollo cuando la parte foliar está totalmente expuesta a la luz solar, debido a que es una planta C4 dando lugar a la presencia de una fotosíntesis modificada donde el CO₂ está incorporado en una combinación de cuatro átomos de carbono, por lo que las C4 son mucho más eficientes que las tradicionales C3 en el proceso fotosintético, permitiendo así tener un mejor desempeño en su actividad descontaminadora.
- Es evidente que la presencia de Vetiver en las muestras, a la luz del ensayo de corte directo, tiene influencia en el comportamiento de la muestra y en los parámetros de resistencia según el criterio de falla de Mohr-Coulomb.
- De forma general, las deformaciones verticales registradas durante los ensayos de corte directo son muy similares para las muestras con y sin vetiver.

- Si bien las deformaciones verticales son similares para los dos tipos de muestras, los esfuerzos soportados son mayores para las muestras que tienen Vetiver en su composición.
- Los parámetros de resistencia, cohesión y ángulo de fricción obtenidos en los ensayos, son claramente mayores para las muestras con Vetiver. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21 Parámetros obtenidos de los ensayos de corte directo

| Material | Condición | c (kPa) | ϕ (°) |
|----------|-------------|-----------|------------|
| SM | Sin Vetiver | 10,5 | 29 |
| SM | Sin Vetiver | 0,0 | 34 |
| Promedio | | 5 | 32 |
| SM | Con Vetiver | 34,3 | 51 |
| SM | Con Vetiver | 89,7 | 30 |
| SM | Con Vetiver | 55,3 | 33 |
| SM | Con Vetiver | 81,3 | 33 |
| Promedio | | 65 | 37 |
| SM-SC | Sin Vetiver | 43,8 | 25 |
| Promedio | | 43 | 25 |
| SM-SC | Con Vetiver | 72,4 | 36 |
| SM-SC | Con Vetiver | 82,5 | 39 |
| SM-SC | Con Vetiver | 72,7 | 24 |
| SM-SC | Con Vetiver | 41,3 | 35 |
| Promedio | | 67 | 34 |

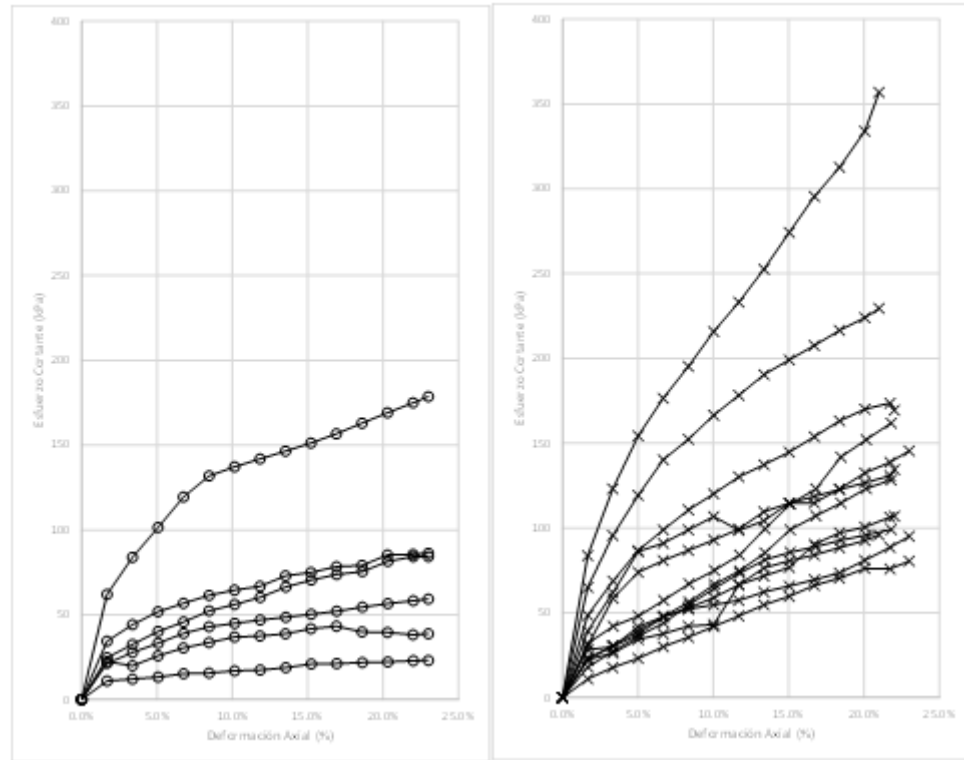
Fuente: Autor.

- En general la presencia de Vetiver incrementa la resistencia de los materiales.
- A medida que la deformación que se desarrolla en el ensayo de corte directo aumenta, así mismo lo hace el esfuerzo cortante que la muestra experimenta. Cuando este último (el esfuerzo cortante) se grafica en función de la deformación, se puede notar una clara diferencia entre las muestras de control y las que tienen Vetiver en su composición.

El esfuerzo cortante en las muestras de control presenta una tendencia asintótica, con un pico de máximo esfuerzo cortante al alcanzar el 10% de la deformación. Por otro lado, las muestras con Vetiver no presentan esta tendencia, y las curvas de esfuerzo cortante contra deformación horizontal

se desarrollan con una pendiente constante pero sin tener un máximo de esfuerzo cortante.

Figura 84 Esfuerzo Cortante en función de la deformación horizontal

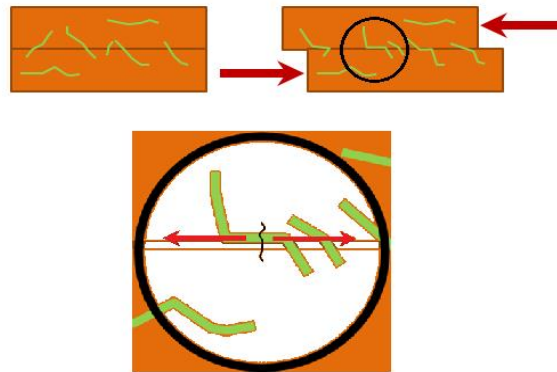


Fuente: Autor.

Este comportamiento muestra una clara tendencia dúctil del desarrollo del esfuerzo cortante en las muestras de control, en contraste con un claro comportamiento frágil de las muestras con Vetiver. El primer comportamiento es similar al desarrollo de esfuerzos en un modelo tipo Tresca y el segundo es similar a un modelo elástico en serie con un elemento friccional.

- La variación de la cohesión en función de la deformación horizontal, para las muestras con raíces en su composición, muestra una tendencia ascendente del valor de la cohesión. Esto es debido a que para los niveles de deformación del ensayo de corte directo, las raíces presentes en las muestras no fallan (Figura 75).

Figura 85 Raíces en el Corte Directo



Fuente: Autor.

- El aumento de la cohesión de las muestras con raíces es debido a que las raíces presentes se alinean sobre la superficie de corte y si la raíz es lo suficientemente larga, se verá sometida a esfuerzos de tracción. Este fenómeno otorga a la muestra una resistencia adicional a la tracción y así mismo, un aumento en el valor de cohesión.
- Para determinar los parámetros de resistencia reales, de las muestras con presencia de Vetiver en su composición, es necesario el desarrollo de ensayos con niveles de deformaciones mayores, que lleven a las raíces que se encuentren en las muestras a la falla y a un nivel residual de fricción tras el desarrollo del pico de cohesión.
- Es importante comparar el pasto Vetiver con otras plantas con el fin de establecer nuevas alternativas de mejoramiento para la erosión y estabilización.
- Respecto al análisis de estabilidad. La presencia de Vetiver en el suelo lleva a que la superficie de falla crítica se encuentre más profunda respecto a la evaluada sin la planta. Adicionalmente, la masa de suelo, en presencia de las raíces, puede experimentar mayores niveles de deformación sin llegar a

la falla o eventualmente hacer de la falla un proceso más lento y no súbito como sucedería en ausencia de la planta en la masa de suelo.

- El vetiver permite mayores deformaciones de la falla sin que colapse el talud.

BIBLIOGRAFÍA

- Der-Guey Lin (2011). Estimating the effect of shear strength increment due to root on the stability of makino bamboo forest slopeland.
- E. Comino and A. Druetta (2009). In situ Shear Tests of Soil Samples with Grass Roots in Alpine Environment.
- Golssmith Wendi (2006). Soil Strength Reinforcement by Plants.
- Heng-Lin Xiao (2014). Research on Direct Shear Test of Undisturbed Root-soil Composition.
- Normaniza Osman, Mohamad Nordin Abdullah & Che Hassandi Abdullah (2011). Pull-Out and Tensile Strength Properties of Two Selected Tropical Trees.
- Ram Chandra Tiwari. (2011). Simulation of Root-Reinforcement Effect in Natural Slopes Based on Progressive Failure in Soil-Root Interaction.
- Sasumua Backslope, Nyandarua District, Kenya. Osano Simpson Nyambae (2011). Root tensile strength of 3 typical plant species and their contribution to soil shear strength; a case study.
- ALEGRE ORIHUELA, Julio. Manual sobre el uso y manejo del pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*). Organización Panamericana de la Salud - Ministerio de Vivienda Construcción y saneamiento (Perú), 2007. [En línea]: http://www.vetiver.org/TVN_manualvetiver_spanish-o.pdf. Citado el 12 de mayo de 2012.
- BANCO MUNDIAL. Vetiver. La barrera contra la erosión. ISBN 0-8213-1706-7. Washington, 1995.
- COLOMBIA. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS -INVÍAS-. Documentos técnicos. [En línea]. <http://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq>
- Manual para construcción de carreteras –Prólogo-. [En línea]. <http://www.ablisa.com/DOCUMENTOS/Especificaciones%20INVIAS.pdf>
- DAS, Brajas. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Traducción: José de la Cera. ISBN 970-686-061-4. México: Thomson, 2001
- Erosión y desertización: consecuencias y causas. [En línea]: <http://www.xuletas.es/ficha/erosion-y-desertizacion-consecuencias-y-causas/> España, 2008.

GOBERNACIÓN DEL HUILA. Departamento del Huila. [En línea]: <http://huilandia.blogspot.com/2011/02/origen-del-departamento-del-huila.html>
IDEAM-. *Atlas climatológico de Colombia*. ISBN 958-8067-14-6. Bogotá: Imprenta Nacional, 2006.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI -IGAC- Atlas Básico de Colombia. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia, 2008.

LE VAN DU and Truong, P. (2006). Vetiver grass for sustainable agriculture on adverse soils and climate in South Vietnam. Proc. Fourth International Vetiver Conf. Venezuela, Octubre 2006 (Citados en: The Vetiver Network International).

The Vetiver Network International. Aplicaciones del sistema vetiver. Manual técnico de referencia. Traducido por el profesor Oscar Simón Rodríguez P. Universidad Central de Venezuela, 2009.

MALAGÓN CASTRO, Dimas. Los suelos de Colombia. Sociedad Geográfica de Colombia- SOGEOCOL. [En línea]: [ww.sogeocol.edu.co/documentos/05loss.pdf](http://www.sogeocol.edu.co/documentos/05loss.pdf)

MONTAÑO, Jhon. "Vegalarga es la estación más asediada del país por la violencia". Bogotá: Periódico "El Tiempo". Publicado el 20 de febrero de 2011. [En línea] <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-8885126>.

MUELAS RODRÍGUEZ, Ángel. Manual de Mecánica de Suelos y cimentaciones. Capítulo I. Caracterización de los suelos. [En línea]: www.uned.es/dpto-icf/...del.../mecansueloycimentacionescap_3.pdf

PEREA, Carlos Alberto y LIZCANO DURÁN, Jorge. Uso del pasto Vetiver como una propuesta de Bioingeniería en la estabilización de taludes. Trabajo de Grado. Director Ing. Jaime Suárez Díaz. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, 2007. [En línea]: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7547/2/144371.pdf>

RED COLOMBIANA DE VETIVER. Normas técnicas de la tecnología vetiver para la implementación en control de erosión y protección de infraestructura. Medellín: Bioingeniería Colombiana. [En línea]. http://vetivernet.com.co/norma_vetiver.pdf

RODRÍGUEZ PINEDA, Carlos Eduardo. Estabilidad de taludes factores asociados con procesos de inestabilidad de taludes. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, 2013.

TRUONG, P. N. (1998). Vetiver Grass Technology as a bio-engineering tool for infrastructure protection. Proceedings of North Region Symposium. Queensland Department of Main Roads, Cairns 1998. Citado en The Vetiver Network International. (Citado en The Vetiver Network International).

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Instituto de Estudios Ambientales.
“La erosión de suelos” [En línea].
http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/IDEA/2007223/lecciones/lect8/lect8_2.html