



**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE LA RAIZ DEL VETIVER
Y SU INTERACCIÓN CON SUELOS DE CENIZA VOLCÁNICA PARA LA
ESTABILIZACIÓN DE SUELOS**

FEDERICO GÓMEZ BENAVIDES

**Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Maestría en infraestructura vial y sistemas de transporte
Manizales, Colombia
2022**

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE LA RAIZ DEL VETIVER
Y SU INTERACCIÓN CON SUELOS DE CENIZA VOLCÁNICA PARA LA
ESTABILIZACIÓN DE SUELOS**

FEDERICO GÓMEZ BENAVIDES

**Monografía presentada como requisito para optar al título de:
Magíster en Ingeniería**

Director (a):

Carlos Enrique Escobar Potes

**Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Maestría en infraestructura vial y sistemas de transporte
Manizales, Colombia
2022**

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

— Federico Gómez B. —

Federico Gómez Benavides

Fecha 24/10/2022

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 9

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... 11

1.1. Descripción del problema 11

1.2. Objetivos..... 14

1.2.1. General..... 14

1.2.2. Específicos 14

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO..... 15

2.1. Antecedentes..... 15

2.2. Marco teórico..... 19

2.2.1. Introducción al tema de suelos..... 19

2.2.2. Raíz Vetiver 19

2.2.3. Origen de la raíz Vetiver..... 20

2.2.4. Especies y variedades de Raíz Vetiver..... 22

2.2.5. Características de la Raíz Vetiver 23

2.2.6. La Raíz..... 28

2.2.7. Efectos Mecánicos de las Raíces según la Variación del Esfuerzo Cortante..... 29

2.2.8. Modelo Teórico del Suelo Reforzado con Raíces 31

2.2.10. Relación entre la deformación del suelo y el esfuerzo en la raíz: 35

2.2.11. Relación de contacto friccionante entre el suelo y la raíz, esfuerzo y elongación de la raíz .. 37

2.2.12. Equilibrio de Fuerzas en una Raíz 37

2.2.13. Limitantes de los esfuerzos en la raíz 38

2.2.14. Limitantes de los esfuerzos de fricción B sobre el contacto suelo - raíz: 40

2.2.16. Suelos Derivados de la Ceniza Volcánica..... 43

2.2.17. Suelos Derivados De Cenizas Volcánicas En Colombia 46

2.2.18. Ensayos en suelos..... 48

2.2.18.1 Tensión raíz..... 51

2.2.18.2 Corte Raíz: 55

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO..... | 58 |
| CAPÍTULO 4. RESULTADOS..... | 66 |
| 4.1. Análisis de los resultados obtenidos en los ensayos | 66 |
| CONCLUSIONES | 75 |
| Referencias Bibliográficas..... | 77 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Cronograma de Acontecimientos de la Raíz Vetiver..... | 21 |
| Tabla 2. Características de la Raíz Vetiver | 23 |
| Tabla 3. Esfuerzo de tensión de la raíz de diferentes plantas..... | 27 |
| Tabla 4. Fuerza a la tensión de diferentes plantas Vs. Diámetro raíces | 27 |
| Tabla 5. Antecedentes Modelo de Suelo Reforzado con Raíces..... | 30 |
| Tabla 6. Identificación de los diferentes tipos de vidrios volcánicos..... | 44 |
| Tabla 7. Carga máxima y cortante máximo de los ensayos realizados..... | 62 |
| Tabla 8. Datos requeridos para graficar Envolvente de falla..... | 63 |
| Tabla 9. Cohesión Vs Angulo de fricción..... | 64 |
| Tabla 10. Relación de resultados | 67 |
| Tabla 11. Relación Área raíz (A_r) / Área suelo (A_s), Esfuerzo cortante, tablas A, B, C..... | 69 |
| Tabla 12. Tendencia - envolvente de rotura..... | 72 |
| Tabla 13. Resistencia de las raíces de algunas plantas a la tensión. | 73 |
| Tabla 14. Resistencia a la tensión. | 74 |
| Tabla 15. Tendencia - envolvente de rotura Vs. % Raíces | 76 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Raíz interceptando una zona de corte | 31 |
| Figura 2. Raíz interceptando una zona de corte | 32 |
| Figura 3 Ángulo entre la zona de corte y la zona de raíz después del desplazamiento..... | 32 |

| | |
|--|----|
| Figura 4. Ensayo de corte directo..... | 35 |
| Figura 5. Relación de contacto friccionante entre el suelo y la raíz..... | 37 |
| Figura 6. Interacción entre el suelo y la raíz en un deslizamiento directo. | 40 |
| Figura 7. Líneas de deslizamiento debido a un movimiento a lo largo del eje principal de la raíz. | 41 |
| Figura 8. Formación de los suelos derivados de cenizas volcánicas..... | 43 |
| Figura 9. Morfología de los 4 tipos de vidrios volcánicos..... | 45 |
| Figura 10. Partícula de vidrio volcánico | 46 |
| Figura 11. Perfil estratigráfico típico de cenizas volcánicas en Colombia | 47 |
| Figura 12. Extracción de muestra en terreno | 50 |
| Figura 13. Ensayo de corte suelo – Raíz. Figura 14. Ensayo de tensión en Raíz | 51 |
| Figura 15. Máquina de tensión..... | 52 |
| Figura 16. Curva Esfuerzo – Deformación | 53 |
| Figura 17. Criterio de rotura de Mohr-Coulomb para suelos puramente | 56 |
| Figura 18. Descripción de la planta | 58 |
| Figura 19. Descripción de la planta | 59 |
| Figura 20. Serie de ensayos de la raíz en estudio en suelos derivados de ceniza volcánica | 59 |
| Figura 21. Serie de ensayos de la raíz en estudio en suelos derivados de ceniza volcánica | 60 |
| Figura 22. Plantación de Vetiver en cajones..... | 60 |
| Figura 23. Plantación de Vetiver en campo abierto | 61 |
| Figura 24. Crecimiento las plantas..... | 61 |
| Figura 25. Envolvente de esfuerzo..... | 64 |
| Figura 26. Clasificación de cantidad de raíces por área..... | 65 |
| Figura 27. Relación AR/A Esfuerzo cortante | 69 |
| Figura 28. Corte directo | 70 |
| Figura 29. Curva esfuerzo de formación..... | 71 |
| Figura 30. Corte directo | 71 |
| Figura 31. Envolventes de rotura | 72 |

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE LA RAÍZ DEL VETIVER Y SU INTERACCIÓN CON SUELOS DE CENIZA VOLCÁNICA PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

RESUMEN

En esta monografía, se adelantó un estudio, para determinar la resistencia mecánica de la raíz del vetiver (*Vetiveria zizanioides*) en suelos derivados de ceniza volcánica. Partiendo del objetivo general, denominado: evaluar la resistencia mecánica de la raíz del vetiver y su interacción con suelos de ceniza volcánica para estabilización de suelos, en el marco de referencia, se recopila los antecedentes, el marco teórico y el marco conceptual que apoyaron el desarrollo de los ensayos y los resultados obtenidos, partiendo de los postulados de Valdés, Jiménez, Servín y Andrade (2020), Rodríguez (2019), Wellmann (2017), Banco mundial, (2018), Truong, (2016), Mejías, (2018), Aysalla, (2017), Sánchez y Oviedo (2019), Ponce (2020), entre otros. El método de estudio se dividió en 3 fases principales, la primera enfocada a la recolección de información acerca de la descripción de la planta, sus características climatológicas y estudios relacionados con la gramínea en los suelos derivados de ceniza volcánica, además de los proyectos en los que se ha implementado, paralelamente se adelantó la gestión de materiales e insumos para la siembra de especies a estudiar. En la segunda etapa se adelantaron ensayos de laboratorio referente a la resistencia y corte de suelo – raíz. Para finalizar, la tercera fase posibilitó el análisis de los resultados y establecer conclusiones.

Finalmente, el estudio para evaluar la resistencia mecánica de la raíz del vetiver y su interacción con suelos de ceniza volcánica para estabilización de éstos, permite concluir que la planta objeto de estudio aporta a la resistencia al corte del suelo y se considera un material alternativo para la estabilización de taludes.

Palabras clave: resistencia mecánica, raíz vetiver, suelos de ceniza volcánica, estabilización de suelos, ensayos de interacción, ensayos de tensión y corte

EVALUATION OF THE MECHANICAL RESISTANCE OF THE VETIVER ROOT AND ITS INTERACTION WITH VOLCANIC ASH SOILS FOR SOIL STABILIZATION**ABSTRACT**

In this monograph, a study was carried out to determine the mechanical resistance of the vetiver root (*Vetiveria zizanioides*) in soils derived from volcanic ash. Starting from the general objective, called: to evaluate the mechanical resistance of the vetiver root and its interaction with volcanic ash soils for soil stabilization, in the reference framework, the background, the theoretical framework and the conceptual framework that supported the development of the tests and the results obtained, based on the postulates of Valdés, Jiménez, Servín and Andrade (2020), Rodríguez (2019), Wellmann (2017), World Bank, (2018), Truong, (2016), Mejías, (2018), Aysalla, (2017), Sánchez and Oviedo (2019), Ponce (2020), among others. The study method was divided into 3 main phases, the first focused on collecting information about the description of the plant, its climatological characteristics and studies related to the grass in soils derived from volcanic ash, in addition to the projects in the that it has been implemented, at the same time the management of materials and supplies for the planting of species to be studied was advanced; In the second stage, laboratory tests were carried out regarding the resistance and cutting of the soil – root. Finally, the third phase made it possible to analyze the results and draw conclusions. Finally, the study to evaluate the mechanical resistance of the vetiver root and its interaction with volcanic ash soils for soil stabilization, allows us to conclude that the plant under study contributes to the shear resistance of the soil and is considered an alternative material for slope stabilization.

Keywords: mechanical resistance, vetiver root, volcanic ash soils, soil stabilization, interaction tests, tension and shear tests.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de explorar alternativas para mitigar los impactos generados en su entorno, el hombre ha desarrollado diferentes métodos con los cuales puede obtener resultados similares a los usados tradicionalmente, menos invasivos y más económicos, por esto ha incluido nuevas técnicas y productos con los cuales se aporta valiosamente a la estabilidad de suelos. Todas estas técnicas que se han adelantado y estudiado a través de la bioingeniería han significado un gran aporte a la ingeniería geotécnica, en la cual se hace uso de plantas de diferentes especies para contribuir a la estabilidad de suelos y preservar los ecosistemas. En esta monografía se hace un estudio a la raíz del vetiver y se busca establecer el comportamiento del sistema suelo raíz como una alternativa en la que las plantas vivas son aprovechadas como estructuras vivas, conjuntamente con material inerte para generar progreso y así mismo proteger su entorno.

De acuerdo con el planteamiento inicial, este estudio tiene una estructura dividida en cuatro capítulos, los cuales se presentan a continuación:

Capítulo I: Planteamiento del problema, en el cual se hace referencia a la formulación del problema, los objetivos que se quieren alcanzar, tanto general como específicos, la justificación y delimitación del estudio.

Capítulo II: El marco teórico, están citados los antecedentes, incluyendo los aspectos teóricos, consultados de diferentes autores para desarrollar definiciones que permitan cumplir con los objetivos descritos anteriormente.

Capítulo III: En el marco metodológico se establecen las técnicas utilizadas en el desarrollo del estudio, en este apartado se detallan aspectos como: tipo de investigación y diseño y las técnicas de observación.

Capítulo IV: Los resultados de la Investigación contienen el análisis y la discusión de los resultados obtenidos, comparando los datos expuestos con la metodología de trabajo descrita en el capítulo anterior, dando lugar a la discusión e interpretación de los mismos.

Por último, se presentan las conclusiones, a través de las cuales, se busca brindar información referente a esta especie que aporta de manera eficiente a la estabilización de taludes y la optimización de recursos.

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

En el siglo XX, el vertiginoso aumento de la contaminación ambiental ha generado gran preocupación en el mundo y ha llevado al hombre a buscar alternativas cada vez más eficaces para tratar de reducir la contaminación ambiental, que está directamente relacionada con la deforestación y las prácticas constructivas tradicionales. De acuerdo con (Domínguez, León, Samaniego, y Sunkel, 2019), “las implicaciones que la gestión de los recursos naturales tiene en la economía, la sociedad y el ambiente, ha alertado y emitido numerosos posicionamientos al respecto de cómo contrarrestar esta contaminación ambiental, que ha incorporado los desafíos mundiales y regionales, y se ha nutrido de muchos aportes internos y externos”

Desde sus inicios el hombre ha explorado diferentes métodos y más prácticas para mitigar el riesgo ambiental, adecuando terrenos para la construcción y la mejora de vías de acceso pensando cada vez más en la sostenibilidad de los ecosistemas ambientales, es decir, la necesidad de explorar múltiples técnicas con materiales que contribuyan al equilibrio del entorno social, económico y ambiental, un ejemplo de esta exploración, es la bioingeniería del suelo considerada como una “alternativa de la ingeniería en la que las plantas vivas se utilizan como estructuras vivas, conjuntamente o con material inerte (material leñoso, piedras, enrocados ligados con concreto, mallas, geotextiles o productos sintéticos)” (CELIS, 2019)

Según Sangalli y Valenzuela (2016), La Bioingeniería es una disciplina constructiva que persigue objetivos técnicos, ecológicos, estéticos y económicos, utilizando sobre todo materiales vivos como semillas, plantas, partes de plantas y comunidades vegetales. Estos objetivos se consiguen aprovechando los múltiples rendimientos de las plantas y utilizando técnicas de construcción de bajo impacto ambiental” (Sangalli y Valenzuela, 2016).

La Bioingeniería del suelo tiene el potencial de solucionar problemas en varios ámbitos de las obras civiles, especialmente en la estabilización de taludes, protección de riberas de cauces y en el control de la erosión. “A veces, se considera la bioingeniería del suelo como sustitución de la

ingeniería clásica, sin embargo, hay que entenderlo como un elemento necesario y complementario en las obras de ingeniería convencional” (Zeh, 2007)

De acuerdo con lo expuesto, a fin de generar un mayor conocimiento de esta técnica, se plantean estudios para determinar la resistencia mecánica de la raíz del vetiver (*Vetiveria zizanioides*) en suelos derivados de ceniza volcánica, abriendo las puertas a la posibilidad de implementar esta técnica en el departamento de Caldas aportando a la estabilización de suelos, teniendo en cuenta que los depósitos de suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia ocupan cerca del 11,6% del territorio y se localizan en regiones montañosas de importante crecimiento demográfico y económico. (A. Lizcano, 2016). En Colombia los departamentos de Antioquia, Caldas, Quindío, Risaralda Tolima, Cauca y Nariño presentan suelos con estas características.

En otras regiones del oriente de Colombia, como Bogotá y los Llanos Orientales, se han encontrado depósitos de estos suelos, distribuidos aleatoriamente, sin que presenten un patrón definido (A. Lizcano, 2006).

Torres, Torres, Coromoto, Picón, Guarache, Méndez y Calderas (2020), señalan que “en los últimos años existen intentos por establecer el comportamiento del sistema suelo raíz, sin embargo, cuando se analizan los modelos de resistencia, existen propiedades de difícil determinación, como la adherencia, fricción suelo-raíz y el módulo de elasticidad de la raíz (especialmente en los modelos de estiramiento y deslizamiento)”. Además, los modelos para obtener un factor de seguridad en taludes estabilizados con bioingeniería, asumen un sistema suelo-raíz, homogéneo e isótropo, bajo el modelo de rotura de raíces, considerando un valor nominal de resistencia al material sin factor de reducción para el diseño.

Si bien, existen estudios que soportan las bondades del vetiver, para el caso de esta gramínea y la resistencia mecánica de su raíz en suelos derivados de cenizas volcánicas no se conocen estudios basados en ensayos donde se analice la interacción suelo raíz y se determine el aporte en la prevención de los movimientos en masa de suelos superficiales. Por lo anterior el uso de métodos

convencionales aún es alto y esto se debe en la mayoría de casos a desconfianza debido desconocimiento de este tipo de alternativas.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Evaluar la resistencia mecánica de la raíz del vetiver y su interacción con suelos de ceniza volcánica para estabilización de suelos.

1.2.2. Específicos

- Identificar por medio de ensayos la interacción de la raíz de vetiver en suelos derivados de ceniza volcánica (Ensayos de corte y tensión).
- Adelantar ensayos de tensión y corte de raíces de vetiver.
- Realizar los análisis de los resultados obtenidos en los ensayos.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

En este apartado se presentan los aspectos conceptuales necesarios para evaluar la resistencia mecánica de la raíz del vetiver y su interacción con suelos de ceniza volcánica para estabilización de suelos, pasando primeramente por los antecedentes que dan paso a la contextualización y los argumentos de los autores.

Según Sangalli, “las técnicas de Ingeniería Biológica se hicieron más visibles en la época medieval, en la que los únicos elementos constructivos que existían eran suelos, piedras y madera. La estabilización de deslizamientos, de caminos y la recuperación de terrenos erosionados por arroyos, aludes y cárcavas se efectuaban con estos materiales combinados con plantas vivas”.

El vetiver es una planta nativa de la India, donde su uso puede remitirse aproximadamente 200 años para fines agrícolas y medicinales, sin embargo, hasta hace pocas décadas su uso en la ingeniería ha traído resultados favorables por lo que ha sido objeto de estudio e investigaciones. (Ecured, 2019)

Malasia es un país pionero en la aplicación del vetiver en la ingeniería. En 1982 se sembró vetiver con el fin de contener riveras escarpadas y más recientemente se han estabilizado taludes y rellenos a lo largo de la autopista Kuala Lumpur a Karak, en Australia. Un programa de protección de las líneas de ferrocarril ha incorporado vetiver como tecnología básica, también se ha utilizado para proteger carreteras y estructuras de control de inundación en Queensland; en China se aplicó la metodología en la Autopista Nacional y a raíz de esta experiencia estimaron que el sistema de vetiver cuesta del 12% al 20% de los costos de los sistemas convencionales, en Zimbabue para mantenimiento de 21.500 km de carreteras primarias, en Madagascar en un programa para proteger secciones de autopistas sujetas a inundaciones con un costo estimado del 50% por debajo del diseño convencional, en la autopista de las tierras altas de Camerún donde

hay desniveles de 150 metros y lluvias de 3000 mm al año, en Latinoamérica el Salvador es el país que tiene la mayor experiencia en el uso de vetiver para la bioingeniería. (Gonzales, 2014)

El vetiver (*Vetiveria zizanioides* L. Nash) es una planta perteneciente a la familia de las gramíneas del tipo C4, que crece preferiblemente a plena exposición solar y cuyo origen se localiza en las planicies inundables del norte de la India, Bangladesh y Birmania.

Se han reconocido, como especie silvestre del norte de la India, que florece y produce semillas viables cuando se encuentra en su hábitat natural o sea en zonas pantanosas y riveras de los cursos de agua, pero en condiciones agrícolas es considerado estéril y este es el que se ha difundido por todas partes del mundo.

En Latinoamérica, desde hace aproximadamente 15 años el Vetiver es usado en programas de conservación de suelo, protección de infraestructuras rurales, como carreteras, etc., con el apoyo de programas del Banco Mundial, y otras agencias. (Böhnert, 2013)

John Greenfield y Richard Grimshaw asesores técnicos del Banco Mundial en el Asia han sido los pioneros en la aplicación y difusión del uso del vetiver como planta para el control de erosión en diversos países como India, Malasia, Tailandia y el sudeste asiático. Esta iniciativa se ha extendido a otros países del mundo mediante la formación de una red mundial de usuarios y promotores del vetiver. (Orihuela, 2019)

Sanches R (2019), realizó su investigación llamada “Control de la erosión de taludes mediante el uso de Vetiver y micorrizas arbusculares, zona de Soceagro en el municipio de Villavicencio – Meta”. Un Trabajo presentado como opción de grado, para optar por el título de Ingeniero Civil. Universidad Santo Tomas, Villavicencio. Este trabajo de investigación, evalúa una solución eficaz, económica y natural a la problemática de erosión de taludes, mediante el cubrimiento total del área vulnerable, con un esquema matricial de plantas de la especie Vetiver, colonizadas con hongos formadores de Micorrizas Arbusculares. Esto es un proceso biológico, producto de la relación simbiótica entre ambos organismos, que obtiene una alteración positiva de las características biológicas y propiedades físicas de la planta, entre lo que se destaca, un

comprobado y considerable aumento en la longitud radicular de la misma, obteniendo así mejoras en cuanto a la estabilización del talud y control de la erosión, gracias al aumento de las propiedades mecánicas del suelo por acción de la raíz potencializada por las Micorrizas. En este estudio se concluyó que la implementación de Vetiver es un camino viable y rentable económicamente para el control de la erosión en taludes y suelos de gran parte del Piedemonte, previniendo así la vulnerabilidad.

Se encontró información verás que el vetiver puede contrarrestar los procesos de erosión y esta investigación adicionó que con ayuda de las Micorrizas Arbusculares se potencializa el crecimiento y el número de sus características físicas. De igual manera el departamento del Meta es una potencia agrícola del país y se podrían realizar estudios basados en la aplicación de pasto y Micorrizas para prevenir la pérdida de suelos por esta actividad.

La metodología presento un aumento en las propiedades del pasto Vetiver positivas, pero aún no considerables para plantar un cambio realmente significativo esta por la imposibilidad de extender la investigación y debido al tiempo de desarrollo del pasto.

Por otra parte, Ponce (2020), llamo su investigación “*Evaluación del Potencial de Vetiver Vetiveria zizanioides (L.) Nash. Para Establecerse en Suelos de Zonas Mineras en Madre de Dios*” una Tesis para optar al título de profesional Ingeniería Forestal y Medio Ambiente en la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios. Señala que la actividad minera en Madre de Dios, ha generado 50.000 hectáreas deforestadas, también que estos suelos degradados contienen altas concentraciones de mercurio y el porcentaje de materia orgánica es mínimo e insuficiente para la adaptación de cultivos dificultando la recuperación de dichos suelos, por ello, el presente estudio es uno de los primeros que se realiza para la especie fitorremediadora Vetiveria zizanioides (L.) Nash en el cual se utilizó 800 plántulas de Vetiveria zizanioides (L.) Nash, su metodología comprende de un diseño experimental de bloques completos al azar con 4 tratamientos diferentes, la selección de las plantas madres se realizó al azar, seleccionando 12 plantas madres, las cuales se extrajeron del suelo enteras (con raíz) con la finalidad de obtener los 800 macollos elegidos al azar, el mantenimiento fue estrictamente de riego con regadora y de limpieza de maleza realizada manualmente.

En este mismo orden de ideas, “los resultados de la investigación concluyen en que la sobrevivencia de las plántulas es altamente exitosa en los sustratos de arena con material rocoso estéril residuales de las zonas mineras de Madre de Dios, además que la especie *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash. desarrolla brotes y hojas eficazmente adaptándose a los escasos nutrientes del sustrato de arena con piedras y la capacidad de propagación de esta especie es alta en cuanto al desarrollo de macollos en suelo con sustrato de arena residual, por lo que el potencial de *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash. para establecerse en suelos de zonas mineras es exitoso”, de acuerdo con (Ponce, 2020). Esta investigación es de importancia porque se expone el potencial de Vetiver *Vetiveria zizanioides*, que es coincidente para la investigación.

Igualmente, Mejía, Macías, Velázquez, y Alvarado (2019), presentaron una investigación titulada “*Bioacumulación de Pb, Hg y As in vitro en pasto vetiver (Chrysopogon zizanioides)*”. En una Revista de Biotecnología y Sustentabilidad señalan que “los metales pesados pueden estar presentes de manera natural en el medio ambiente, sin embargo, en algunos casos las actividades antropogénicas introducen cantidades elevadas que resultan dañinos para la biodiversidad. El objetivo de este trabajo fue el exponer plántulas de pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) in vitro a concentraciones de sales de metales pesados Plomo (Pb), Mercurio (Hg) y Arsénico (As) con la finalidad de saber si esta especie es tolerante y/o es capaz de acumular estos elementos en sus tejidos. Plántulas con un sistema radical abundante y vigoroso fueron enraizadas en medio de cultivo líquido MS, con sales de Pb, Hg y As e incubadas en tubos de ensayo tomando como referencia los valores máximos. Después de 12 semanas de incubación, las plantas y el medio líquido remanente se analizaron por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA) y se calcularon los factores de bioconcentración (FBC) y traslocación (FT)” (Mejía, Macías, Velázquez, y Alvarado, 2019).

2.2. Marco teórico

2.2.1. Introducción al tema de suelos

Cuando se habla de suelos se hace referencia a la capa más externa de la corteza terrestre. El suelo tiene diferentes orígenes y clasificaciones, dependiendo entre otras del proceso de formación, origen del material parental y tipo de depositación; clasificándolos por ejemplo como suelos residuales y de depósito. En el caso específico de este trabajo se tratará con suelos derivados de ceniza volcánica.

En este mismo orden de ideas, los suelos residuales vienen de una formación por meteorización de una roca parental la cual por efectos de intemperismo, oxidación, infiltración, presiones y otros procesos, sufre una degradación que va desde la roca parental sana a un suelo completamente meteorizado sin presencia de bloques de roca (Valdés O., Jiménez Á., Servín A., y Andrade J. (2020)).

2.2.2. Raíz Vetiver

De acuerdo con Rodríguez (2019), El vetiver (*Vetiveria zizanioides*) es una planta de la familia de las gramíneas, nativa de la India, crece en grandes sepas, es estéril no invasiva por lo tanto no se convierte en maleza. Sus tallos erguidos alcanzan una altura que oscila entre 0,5 y 1,5 m, las 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.

Además, es resistente a diferentes condiciones climáticas, inundaciones y hasta agentes contaminantes. Una de las mayores virtudes del vetiver son sus raíces, las cuales crecen verticalmente y su afectación en área se limita a menos de un metro de diámetro alrededor de la planta. A diferencia de la mayoría de las gramíneas, las raíces del vetiver crecen exclusivamente de manera vertical y alcanzan una profundidad de hasta 4 metros; con una resistencia a la tensión

promedio de $75\text{MPa} = 765 \text{ Kg/cm}^2$ lo cual le convierte en un excelente estabilizador de bordes y terrazas, incrementando la resistencia al corte del suelo hasta en un 40%.

Es por lo que el Sistema de raíz Vetiver (SV), es un concepto que integra principios científicos relacionados a la hidrología, la mecánica de suelo y los procesos naturales que se asimilan con el manejo de la tierra y del agua desde una escala paisajista. El concepto destaca mejor cuando es implementado y aplicando bien desde el diseño y ejecución del proyecto teniendo claro los conceptos de bioingeniería, agronomía, curvas de nivel, microbiología del suelo. (Ramírez, 2019)

Asimismo, señala Rodríguez (2019), que 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 deslaves, la restauración y la protección del ambiente, la retención de la humedad del suelo, la biorremediación y la bioingeniería, los forrajes para animales, la agroforestación (mezcla de árboles y arbustos con cultivos o sistemas de producción animal para obtener beneficios ambientales, económicos y sociales), el uso medicinal, la fabricación de artesanía y como fuente energética.

2.2.3. Origen de la raíz Vetiver

Para Wellmann (2017), el vetiver es una planta que cuenta con características especiales que la hacen una especie de importancia para el desarrollo de diferentes actividades, entre ellas, su uso y el empleo de esta para el desarrollo de obras de bioingeniería.

A continuación, en la tabla n. 1 cronograma de acontecimientos de la raíz del vetiver, se presenta un cuadro cronológico, donde se enumera el proceso año a año a nivel mundial de los avances en torno a la implementación y uso de la planta.

En este aspecto, ha sido tan importante el aporte de esta planta, que los conocedores de ella a nivel mundial han tratado de implementarla en muchos de sus campos como elemento útil según Wellmann (2017).

A continuación, se cita un orden cronológico de información conocida.

Tabla 1. Cronograma de Acontecimientos de la Raíz Vetiver

| AÑO | ACONTECIMIENTO |
|--------------|---|
| 1800 | Empleados para tejados de las casas, y todavía se utiliza en techos y paredes. |
| 1930 | Inicia en la India el uso de la planta para el control de erosión bancas de ríos, terrazas de cosecha y demarcación de fronteras agrícolas |
| 1950 | Se empieza a utilizar como mecanismo de control de erosión de los suelos en India (Truong, P. et al, 2000)12. |
| 1986 | Se introduce la técnica vetiver a proyectos de distribución y manejo de aguas patrocinados por el Banco Mundial. |
| 1987 | Greenfield y otros autores publican el manual, “Pasto Vetiver – el seto contra la erosión” difundiendo aún más su conocimiento y recomendando su uso. |
| 1986 1993 | - En India inician las investigaciones desde la Academia enfocadas a conservación de suelo y agua utilizando el sistema Vetiver, los resultados indicaron una reducción del 90% en la pérdida de suelo y una reducción del 70% por escorrentía de aguas lluvias |
| 1988 | Grimshaw introdujo la técnica vetiver al proyecto chino de suelos rojos |
| 1990 | El Banco Mundial crea la Red de Información del Vetiver y el rey de Tailandia inicia y promueve la técnica del vetiver entre los granjeros de su país, se desarrollan talleres de trabajo en Etiopia |
| 1991 1993 | - El Dr. Yoon, hace investigaciones con el sistema Vetiver en Malasia y genera el reporte “Mire, observe el pasto Vetiver en Malasia”, con el fin de difundir sus estudios. |
| 1992 | Se realiza el primer taller internacional de vetiver, patrocinado por el Instituto de Investigaciones del caucho en Malasia |
| 1993 | Paul Truong y las universidades en Australia comienzan la investigación sobre el sistema vetiver y en el mismo año la Academia Nacional de ciencias de este país hace una revisión de la historia del vetiver y apoya la tecnología, publicando el documento “pasto Vetiver, una delgada línea contra la erosión”. En este mismo año se crea el programa de premios del Vetiver por parte del rey de Tailandia. |
| 1995 | Se establece la Red Vetiver Internacional como una entidad sin ánimo de lucro en Virginia USA |

| AÑO | ACONTECIMIENTO |
|------|--|
| 1996 | El sistema Vetiver se establece como una herramienta o técnica de la bioingeniería para hacer control de taludes, luego de la presentación de resultados del Doctor Yoon sobre la fuerza de tensión promedio de las raíces del pasto Vetiver estimada en 9400 psi (libras de presión por pulgada cuadrada) |
| 1997 | Se establece la red Vetiver en China, Sur África, Latino América, el Pacífico, las Filipinas, Venezuela y el Oeste de África, en el mismo año varias ONG's, promueven el uso de la técnica y la Red Vetiver, auspician con \$200 mil dólares a las ONG que operan proyectos piloto del sistema Vetiver y se extienden las actividades del uso de la técnica a El Salvador, Malawi, Tanzania, Costa Rica, Simbawe y Madagascar, finalmente se establece la página web de la red ¹⁴ |
| 1999 | La red se establece en el Oriente Medio y en Europa |
| 2005 | Se introduce mediante un estudio del Dr. Jaimes, N. [et ál], 2005, denominado "control biomecánico de laderas en zonas mineras abandonadas utilizando pasto vetiver, una prueba piloto en unas zonas del Barrio La Nidia, de la ciudad de Cúcuta, en zonas desprotegidas. |
| 2013 | Se realiza la segunda conferencia regional latinoamericana en la ciudad de Medellín, Colombia. |
| 2015 | Se empieza a implementar más técnicamente en Colombia, debido a estudios desarrollados por Herrera, J. llamado Evaluación de parámetros de resistencia al corte en suelos de ladera cubiertos con pasto vetiver (<i>Chrysopogon zizanioides</i>) en la vía Neiva-Vega larga departamento del Huila |

Como se observa en la tabla 1, la implementación de esta especie en Colombia inicia para el 2005, lo que hace que esta especie sea relativamente nueva y desconocida para muchas personas, incidiendo en la confianza y uso de esta.

2.2.4. Especies y variedades de Raíz Vetiver

De las 10 ó 12 especies conocidas de vetiver sólo tres se emplean en sistemas de Tecnología Vetiver (TV), para conservación de suelos, estas son *Vetiveria zizanioides*, *V. nigrítana* y *V. nemoralis*. Muy importante: *Vetiveria nigrítana* (África Subsahariana), *nemoralis* (Tailandia) y los cultivares no estériles de *V. zizanioides* (Norte de India), al ser fértiles, sólo deben emplearse en el área de distribución natural de los mismos. En otros lugares sólo se deben emplear los cultivos estériles de *V. zizanioides* originarios de material del sur de la India, que además son los

únicos que se emplean también en la producción de aceites esenciales. Los principales cultivares estériles de desarrollo rápidos son: Vallonia (Sudafrica), Monto (Australia), Sunshine (Estados Unidos) y Guiyang (China). Además, estas especies se diferencian prácticamente sólo en el nombre, pues análisis de ADN han demostrado que no existen diferencias genéticas entre ellas, siendo todos del mismo origen. (Banco mundial, 2018)

2.2.5. Características de la Raíz Vetiver

Vetiver es un pasto de crecimiento rápido. Una vez plantado, puede desarrollar una altura de 2 metros, con raíces de 1 m de largo que llegan a la madurez a los 18-24 meses con raíces de hasta 4 m. La planta tiene una longevidad alta, de más de 50 años.

En cultivo, las plantas o barreras de vetiver ocupan muy poco espacio y no compiten con otras plantas. Las raíces se desarrollan verticalmente y se extienden sólo unos 0,5 m alrededor de la planta. Sólo en casos de aguda sequía puede haber problemas de competencia, pero sólo con plantas de raíces pequeñas que estén plantadas a menos de 0,70 m del vetiver. Además, las raíces del vetiver, gracias a la acción de micorrizas con las que están asociadas incrementa de forma significativa el aporte de nitrógeno al suelo.

A continuación, se hace referencia a las características de la raíz del vetiver en la Tabla 2, la cual, nos permite identificar elementos claves que posibilitan la descripción de la misma.

Tabla 2. Características de la Raíz Vetiver

| |
|--|
| CARACTERISTICAS DEL VETIVER |
| CARACTERISTICAS MORFOLOGICAS |
| 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. |
| 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. |
| CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS |
| Nuevos brotes se forman desde la corona subterránea haciendo al vetiver resistente al fuego, heladas, tráfico y alta presión por 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. |
| 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 si se añaden 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, sodicidad y Mg. |
| Alta tolerancia al Al, Mn y metales pesados tales como As, Cd, Cr, Ni, Pb, Hg, Se y Zn en los suelos. |
| CARACTERÍSTICAS ECOLÓGICAS |
| No tolera la sombra, en algunos casos extremos altera su proceso de crecimiento, hasta eliminarlo. |
| 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. |

En este sentido, la planta cuando es sembrada en hileras simples forma una barrera que es muy efectiva para atenuar y dispersar las aguas de escorrentía, reduciendo la erosión,

conservando la humedad y atrapando sedimentos y agroquímicos en el sitio. Aunque cualquier barrera puede prestar esa función, el pasto vetiver, debido a sus características morfológicas y fisiológicas únicas mencionadas anteriormente, lo puede hacer mejor que otros sistemas evaluados. Adicionalmente, el sistema de raíces extremadamente profundo, masivo y denso amarra el suelo y al mismo tiempo impide que sea erosionado por flujos de agua de alta velocidad. El sistema de raíces muy profundo y de rápido crecimiento hace también al vetiver muy tolerante a la sequía y muy apto para la estabilización de taludes inclinados (Truong, 2016).

Por otra parte, las laderas están expuestas a procesos de erosión y de meteorización que imponen una pérdida de resistencia de los materiales térreos. El vetiver tiene la capacidad de retener las partículas de suelo con sus macollas y de reforzar el terreno con las raíces, induciendo resistencia a la tracción, que se manifiesta como un incremento en los valores de los parámetros de resistencia al corte del terreno. El sistema vetiver plantea una solución particular a este problema. Al ser dispuesto de manera sistemática en la ladera, no sólo aumenta la cobertura vegetal superficial, controlando procesos erosivos superficiales, sino que también mejora las condiciones de estabilidad, influenciando los materiales térreos en profundidad. (Herrera, 2017)

Igualmente, 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 debido parcialmente al hecho de que hay más información disponible para los ingenieros sobre la vegetación, y también parcialmente debido a que su relación costo/efectividad y ser amigable al ambiente considerándose un enfoque de ingeniería “ligera” (Herrera, 2017).

En este mismo orden de ideas, el Vetiver es muy efectivo cuando se planta junto a corta distancia sobre hileras en contorno en las pendientes. Las líneas de contorno con vetiver pueden estabilizar pendientes naturales, pendientes de corte y de relleno, y terraplenes de relleno. Su sistema de raíces profundo y vigoroso puede estabilizar estructuralmente las pendientes y al mismo tiempo su vástago dispersa la escorrentía superficial, reduce la erosión, y atrapa sedimentos que facilitan el crecimiento de especies nativas. (Truong, 2016)

En un estudio realizado por 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 finas, más fuertes, 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 (.008-.08”). La fuerza de tensión promedio de diseño es de 75 MPa para diámetros de raíz de 0.7-0.8 mm (.03”), 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.

En un ensayo de resistencia al corte en un bloque de suelo, Méndez, Rojas, Torres, Torres, Rada, y Calderas (2015), encontraron que la penetración de raíces de una barrera de vetiver de dos años de establecida con una separación entre plantas de 0.15m, puede aumentar la resistencia al corte del suelo en los 0.50 m de la anchura de la franja adyacente en un 90% a 0.25 m de profundidad. El incremento fue del 39% a 0.50 m de profundidad y gradualmente se redujo a 12.5% a un metro 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.

Los autores explican esto cuando las raíces de las plantas atraviesan el plano de una superficie potencial de corte en un perfil de suelo, cuando esto ocurre se presenta una 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. (Truong, 2016).

A continuación en la **tabla 3**, se observa el esfuerzo a tensión aplicado a raíces de diferentes plantas, entre ellas, el pasto vetiver, donde se observa un desempeño superior al ser sometido a fuerza de tensión.

Tabla 3. Esfuerzo de tensión de la raíz de diferentes plantas

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

Fuente: Truong & Tan (2009).

Seguidamente en la **tabla 4** se observa la relación de la fuerza de la tensión Vs. el diámetro, donde se concluye que a pesar de tener un diámetro menor, la fuerza a la tensión es mayor comparada con los demás plantas, siendo este un dato considerable en este estudio.

Tabla 4. Fuerza a la tensión de diferentes plantas Vs. Diámetro raíces

| Pasto, grama o hierba | Diámetro promedio de la raíz (mm) | Fuerza tensión promedio (MPa) |
|---|-----------------------------------|-------------------------------|
| Juncia (<i>Juncellus serotinus</i>) | 0.38±0.43 | 24.50±4.2 |
| Pasto miel, grama de agua (<i>Paspalum dilatatum</i>) | 0.92±0.28 | 19.74±3.00 |
| Trébol blanco (<i>Trifolium repens</i>) | 0.92±0.28 | 19.74±3.00 |
| Vetiver | 0.66±0.32 | 85.10±31.2 |
| Gramma cienpiés (<i>Eremochia aphiuroides</i>) | 0.66±0.05 | 27.30±1.74 |
| Pasto Bahía (<i>Paspalum notatum</i>) | 0.73±0.07 | 19.23±3.59 |
| Gramma de Manila (<i>Zoysia</i>) | 0.77±0.67 | 17.55±2.85 |
| Pasto Bermuda (<i>Cynodon dactylon</i>) | 0.99±0.17 | 13.45±2.18 |

Fuente: Truong, (2016).

De acuerdo con Méndez, Rojas, Torres, Torres, Rada, y Calderas (2015), también 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 en comparación con que otras plantas. Otra característica menos obvia que lo coloca aparte de la raíz de otros árboles es su capacidad de penetración. 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 2-3 m (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. (Paul Truong, 2008)

En este mismo orden de ideas, a pesar de que el sistema radical del vetiver ofrece un gran trabajo en cuanto a resistencia, es importante aclarar que, el papel desempeñado por las raíces en términos del refuerzo del suelo no es tan simple, como lo es el de las estructuras artificiales; si bien las raíces no tienen la resistencia mecánica de las bandas de acero, en el suelo se comportan de una manera más compleja, ya que ejercen fuerzas de amarre compresivo, a lo largo y ancho del refuerzo.

Puntos a favor del carácter propio de las raíces y su capacidad de recuperación y regeneración frente a daños físicos, así como en la bioadaptación, a través de la cual responden una vez se presentan condiciones desfavorables de topografía y disponibilidad de agua, entre otros (edafoecotropismo). De esta manera, se plantea reconocer el comportamiento de una estructura radicular en una masa de suelo, lo cual se tendrá en cuenta a continuación:

2.2.6. La Raíz

La raíz es la parte terrestre de la planta que se encuentra en el suelo o el agua y brinda soporte a ésta, sin embargo, existen raíces que se desarrollan en otros medios como son el aire. Al conjunto de raíces que una planta tiene en el suelo se le denomina sistema radicular. De acuerdo con (Mejías, 2018)

Asimismo, la raíz le permite a la planta sujetarse al suelo, adquirir el agua y nutrientes necesarios para realizar sus funciones vitales en primera instancia. Para Valdés (2010), “Al mismo tiempo las raíces desempeñan una función ecológica porque su estructura forma una malla que protege el suelo evitando que se desprenda ante los elementos que lo golpean. Adicionalmente, al adherirse a las partículas del suelo, las raíces lo mantienen unido como si tuviese una especie de pegamento. Por último, las raíces absorben el exceso de agua que al acumularse debilita el terreno y puede ocasionar que se desprenda, como en el caso de las pendientes inclinadas. Y algo mejor, entre mayor cantidad de raíces a lo largo y a lo ancho, mayor protegido queda el suelo, porque más extensa es la malla que lo cubre. De ahí que se diga que las raíces son retenedoras de suelos. Su importancia es tal que aun cuando se eliminen los vegetales que cubren un suelo; si se dejan sus raíces enterradas, éstas pueden mantener sujeto el suelo durante varios meses, o incluso años después, mientras permanezcan dentro del mismo sin desintegrarse.

En este mismo orden de ideas, las características de las raíces como la capacidad de absorción de agua, el diseño y distribución de esta han sido de gran utilidad en los procesos de bioingeniería. En la estabilización de pendientes las raíces hacen parte importante, ya que alteran las propiedades mecánicas e hidrológicas del suelo, mejorando la estabilidad de las pendientes, influyendo en procesos hidrológicos y modificando las propiedades de estos, por ejemplo: las raíces por medio de la absorción reducen el contenido de agua en el suelo, la densidad de las raíces dentro de la masa del suelo puede mejorar la capacidad de la resistencia frente a cargas de corte (Contreras, 2017).

2.2.7. Efectos Mecánicos de las Raíces según la Variación del Esfuerzo Cortante

Los efectos mecánicos de las raíces se visibilizaron después de ver los resultados exitosos de la estabilización con concreto y cables, el cual hizo sus primeras apariciones en 1930 aproximadamente, con el primer anclaje permanente en roca, el cual según (Aysalla, 2017). lo llevó a cabo el ingeniero francés Coyne en 1930, la estructura anclada fue el faro “La Jeumont”, ubicado en la costa noroeste de Francia. Los estudios relacionados con raíces se centraron

especialmente en la magnitud de los efectos estabilizadores generados por estas, despreciando un poco el enfoque teórico y prestándole mayor atención a la parte práctica.

Tabla 5. Antecedentes Modelo de Suelo Reforzado con Raíces.

| ANTECEDENTES MODELO DE SUELO REFORZADO CON RAICES | |
|---|---|
| Métodos utilizados para medir la resistencia en un suelo con y sin raíces: pruebas corte directo in situ y muestra, prueba de cizallamiento por compresión no confinada. | Burroughs y Thomas 1977 Zimer 1981 Waldron 1977 |
| Método de análisis posterior de una masa de suelo fallida - Modelo de equilibrio límite para estimar la fuerza extra necesaria para obtener un factor de seguridad de 1 | Riestenberg y Sovonick - Dunforol 1983 |
| La succión del suelo tiene una influencia considerable en la resistencia del suelo. | Anderson y Pope 1984 Fredlund 1987 |
| Los métodos mencionados anteriormente tienen limitaciones debido a la variabilidad de las propiedades del suelo y densidad de raíces, lo que marca una diferencia entre los enraizados y los no enraizados. | Ferwilliger y Waldron, 1990 |
| Otra limitación es el tamaño de la muestra debido a que estas influyen en el fallo, ya que los valores de resistencia al corte de pequeñas muestras de suelo no perturbadas parecían ser un orden de magnitud mayor que la resistencia medida de muestras más grandes | Terwillwer y Waldron 1990 Schultz 1957 |
| Una matriz de suelo con elementos más grandes como raíces, piedras y agregados de suelo, pueden mostrar una resistencia del suelo mucho mayor en núcleos pequeños que en núcleos grandes. | Terwillwer y Waldron 1990 Schultz 1957 |

Debido a las limitaciones anteriores (tabla 5) se emprendieron enfoques teóricos para evaluar la magnitud del refuerzo de la raíz de la resistencia al corte de los suelos. De acuerdo con los postulados de (Vidal, 1969), *“Un suelo reforzado con fibra (raíz), puede analizarse como si fuera un material compuesto en el que están incrustadas fibras de resistencia a la tracción relativamente alta, en una matriz de menor resistencia. La resistencia adicional de*

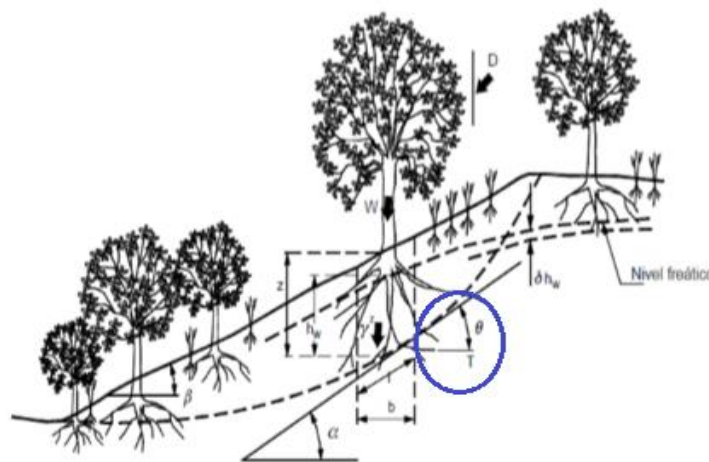
dicho suelo reforzado es el resultado de fuerzas de fricción que se desarrollan entre el suelo y las fibras”

2.2.8. Modelo Teórico del Suelo Reforzado con Raíces

Los modelos de reforzamiento del suelo por raíces están basados en el siguiente concepto propuesto por Vidal: Una raíz que cruce una zona de corte puede sufrir elongación debido a desplazamientos, generando en sus fibras esfuerzos de tensión, los cuales son transmitidos a la zona de corte como esfuerzos adicionales. El esfuerzo en la raíz es transmitido al suelo por esfuerzos de fricción sobre el contacto raíz-suelo.

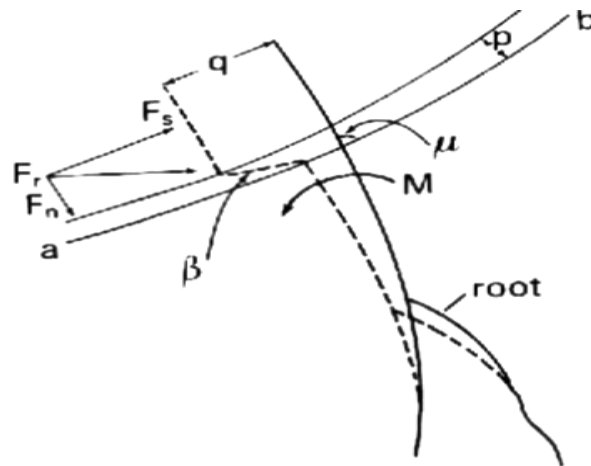
Otros conceptos usados por Wu et al (1979), Waldron (1977), Gray y Okashi(1983), y Waldron y Dakessian (1981) difieren del anterior pues ellos asumen que el esfuerzo en la raíz se debe a esfuerzos en el suelo y estos son transferidos a la raíz por fricción en el contacto raíz-suelo. El esfuerzo de fricción en este contacto causa un anclaje de la raíz en el suelo. Vidal además afirma que la fuerza total que puede aplicarse a la raíz es limitada por el esfuerzo a la tensión de la raíz o por el desplazamiento de la raíz a través del suelo. Consideramos un talud cualquiera en el cual un sistema radical está cruzando la superficie de falla como se muestra en la siguiente figura.

Figura 1. Raíz interceptando una zona de corte



Fuente: Suarez, J, Control de la erosión en zonas tropicales, Capítulo 8, 2001

Figura 2. Raíz interceptando una zona de corte

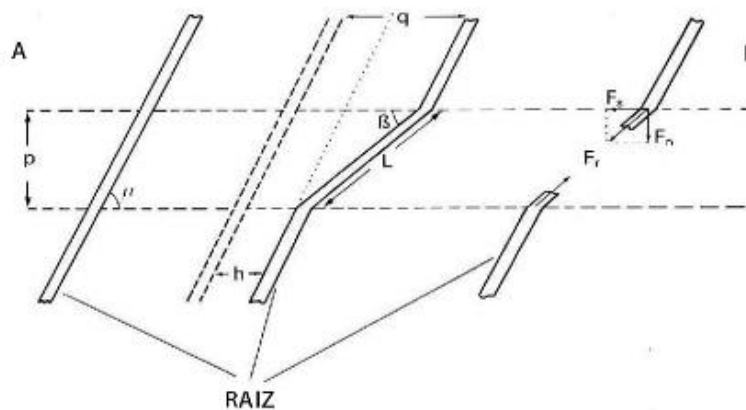


Fuente: H.F.H.M. Mulder. Assessment of landslide hazard. Utrecht: Facultad de Ciencias Geográficas. Ámsterdam, 1991.

$a-b$ (Zona de corte), F_n (Fuerza normal), F_s (Fuerza de Corte), F_r (Fuerza de raíz), β (ángulo entre la zona de corte y la zona de raíz después del desplazamiento), μ (ángulo inicial entre la zona de corte y la raíz), p (espesor de la zona de corte), q (desplazamiento de la parte superior), M (momento flector). (Mulder, H.F.H.M 1991)

Ahora se considera el mismo talud fallado; la situación de las raíces en la zona de corte sería:

Figura 3 Ángulo entre la zona de corte y la zona de raíz después del desplazamiento



Fuente: H.F.H.M. Mulder. Assessment of landslide hazard. Utrecht: Facultad de Ciencias Geográficas. Ámsterdam, 1991.

2.2.9. Fuerzas actuantes sobre una raíz que cruza una zona de corte

Mulder, H.F.H.M 1991, señala que el movimiento de la masa de suelo perpendicular y paralela a la superficie de la raíz genera unos esfuerzos en esta, a los cuales se les suma un esfuerzo de flexión, pero si la raíz es pequeña podemos despreciar la fuerza y el momento resultante (M) por flexión. El esfuerzo en la raíz σ_a (kPa):

$$\sigma_a = \frac{F_R}{A_R}$$

F_R = Fuerza en la raíz debido a desplazamiento

A_R = Área de las raíces que cruzan la sección (m²)

El área de sección transversal de una raíz dentro de un área transversal de suelo A, puede derivarse con un número de raíces n_i en clases dimétricos y con a_i que es el área transversal promedio de una raíz:

$$A_R = \sum n_i a_i$$

Ahora si despejamos F_R de la formula inicial y obtenemos sus componentes rectangulares nos queda:

$$F_s = F_R \cos \beta \quad \text{ó} \quad \tau_r = \left(\frac{A_R}{A} \right) \sigma_a \cos \beta$$

$$F_N = F_R \sin \beta \quad \text{ó} \quad \sigma_{nr} = \left(\frac{A_R}{A} \right) \sigma_a \sin \beta$$

F_s componente que produce una resistencia adicional al corte, y F_N componente normal la cual se suma a la fuerza de confinamiento sobre la zona de corte.

Si combinamos estas ecuaciones con la Ley de Coulomb obtenemos:

$$S_{RAIZ} = C + \tau_r + (\sigma_N + \sigma_{NR} - u) \tan \varphi$$

$$\sigma_N = \gamma^* z = \text{Esfuerzo normal total (kPa)}$$

$$\gamma = \text{Peso unitario (kPa/m)}$$

Z = Profundidad (m)

S_{RAIZ} = Esfuerzo de corte en un suelo penetrado por raíces (kPa)

C = Cohesión (kPa)

u = Presión de poros (kPa)

φ = Angulo de fricción interna ($^{\circ}$)

Para obtener el efecto neto del refuerzo radicular (S_R)

$$S_R = S_{RAIZ} - S_{LIBREDELAIZ}$$

$$S_R = \sigma_A \left(\frac{A_R}{A} \right) (\sin \beta \tan \varphi + \cos \beta)$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{1}{\frac{(q-h)}{p} + \frac{1}{\tan u}}$$

Dónde:

S_R = Refuerzo radical (kPa)

$S_{LIBREDELAIZ}$ = Esfuerzo de corte en un suelo libre de raíces (kPa)

μ = Ángulo inicial entre la raíz y la zona de corte ($^{\circ}$)

p = Espesor de la zona de corte (m)

q = Desplazamiento de la masa superior del suelo (m)

h = Desplazamiento de la raíz perpendicular a la superficie de falla (m)

Figura 4. Ensayo de corte directo

Este equipo hace parte del laboratorio de suelos de la Universidad Nacional, Sede Manizales y fue diseñada por el docente Carlos Enrique Escobar Potes

Por otro lado, El esfuerzo radicular S_R depende del factor $\sin \beta \tan \varphi + \cos \beta$ que a su vez depende de μ y de la deformación por corte $\frac{(q-h)}{p}$; algunos autores asumen diferentes valores para este factor.

Wu et al: 1.2

Greenway: 1.15

Waldron y Dakessian: 1 (asumen $\beta=0$)

2.2.10. Relación entre la deformación del suelo y el esfuerzo en la raíz:

La elongación de una raíz que atraviesa una zona de corte y que se produce cuando el desplazamiento ocurre a lo largo de esta zona está dada por:

$$j = L - \frac{p}{\sin \mu} = p \sqrt{\frac{2}{\tan \mu} \frac{q-h}{p} + \left(\frac{q-h}{p}\right)^2}$$

Dónde:

j = Elongación de la raíz (m)

L = Longitud de la raíz en la zona de corte (m)

μ = Ángulo inicial entre la raíz y la zona de corte (°)

p = Espesor de la zona de corte (m)

q = Desplazamiento de la masa superior de suelo (m)

h = Desplazamiento de la raíz perpendicular a la superficie de falla (m)

Si relacionamos el esfuerzo y elongación de la raíz para una tensión uniaxial en el rango elástico, obtenemos (Ley de Hook):

$$\sigma_A = E_r \frac{dj}{dx}$$

Dónde:

σ_A = Esfuerzo en la raíz (kPa)

E_r = Módulo de elasticidad de la raíz (kPa)

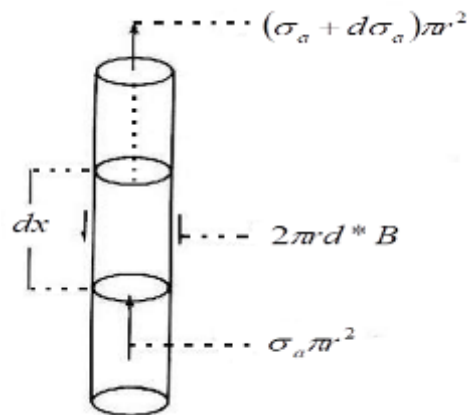
$\frac{dj}{dx}$ = Deformación unitaria de la raíz.

Observando las ecuaciones anteriores, se concluye que los esfuerzos en raíces con diferentes ángulos iniciales μ , en la zona de corte no serán los mismos con iguales desplazamientos, lo que indicaría que las raíces no alcanzan simultáneamente el esfuerzo de ruptura como la asumía Wu et al (1979) y Riestenberg y Sovonick – Dunford (1983).

2.2.11. Relación de contacto friccionante entre el suelo y la raíz, esfuerzo y elongación de la raíz

Según Mulder, una raíz ubicada sobre una zona de corte soporta desplazamientos debido a su elongación, produciendo dos tipos de fallas: una por deslizamiento de la raíz a través del suelo y otra por fractura total de la raíz. La respuesta de la raíz es determinada por su anclaje sobre lados de la zona de falla, debido a la fricción que se desarrolla entre la raíz y el suelo. El esfuerzo de fricción es tangente a la superficie de la raíz y aparece como una reacción a la elongación de la raíz, este esfuerzo de fricción (B) se desarrolla cuando existe contacto directo entre el sistema suelo-raíz, si este contacto existe solo en una fracción de la longitud de la raíz, el esfuerzo (B) puede ser multiplicado por un factor (CO) para hallar la fricción aparente (B'), este esfuerzo es el hallado en el ensayo de adherencia (pull-out test). Considerando una raíz de sección cilíndrica, de radio r , longitud dx , y contacto perfecto con el suelo obtenemos:

Figura 5. Relación de contacto friccionante entre el suelo y la raíz.



Fuente: Mulder, H.F.H.M, Equilibrio de fuerzas de una raíz

2.2.12. Equilibrio de Fuerzas en una Raíz

$$\pi r^2 d\sigma_A = 2\pi B r dx \quad \text{ó} \quad r d\sigma_A = 2B dx$$

(B , esfuerzo por fricción en el contacto raíz – suelo)

Luego:

$$B = \frac{rd\sigma_A}{2dx} = \text{Constante}$$

Ahora si integramos desde $X=0$ y $\sigma_A = \sigma_0$ (esfuerzo en la zona de corte)

Obtenemos:

$$\sigma_A(x) = 2B \frac{x}{r} + \sigma_0$$

Si σ_0 es conocido, la distancia X_0 antes que σ_A llegue a cero es:

$$X_0 = \frac{\sigma_0 r}{2B}$$

De acuerdo a lo que asume Waldron (1977) una distribución simétrica de esfuerzos alrededor de la zona de corte, la longitud X_s donde los esfuerzos son equivalentes está dada por:

$$X_s = \frac{\sigma_0 r}{B}$$

Dónde:

X_s = longitud de la raíz bajo esfuerzos (m)

2.2.13. Limitantes de los esfuerzos en la raíz

- El anclaje de una raíz al suelo, no es suficiente y esta se desplaza.
- La raíz falla por esfuerzos de tensión.

El esfuerzo de tensión en una raíz que empieza a desplazarse a través de suelo está dado por:

$$\sigma_0 = \frac{X_b B}{r}$$

Donde:

X_b = longitud de anclaje. (m),

r = radio

B = esfuerzo de fricción del contacto raíz suelo.

La longitud de anclaje se entiende como la longitud necesaria para que una raíz resista solicitudes de esfuerzos de tensión sin deslizarse o quebrarse.

Si los esfuerzos debidos a la elongación son mayores al esfuerzo de ruptura (σ_{rm}) la raíz se rompe y no contribuye en la disipación del esfuerzo cortante. La longitud mínima para desarrollar σ_{rm} se obtiene de la ecuación:

$$\sigma_{rm} = \frac{X_f B}{r}$$

Donde X_f = longitud mínima para desarrollar σ_{rm} (m)

Combinando el efecto del esfuerzo de tensión de la raíz, el esfuerzo de fricción en el contacto suelo-raíz sobre la zona de corte, el radio de raíz y la densidad de raíces encontramos una relación para el reforzamiento por raíces SR:

Para raíz elongándose:

$$S_r = \sum \frac{X_b * B}{r} * \left(\frac{na}{A} \right) * (\sin \beta \tan \phi + \cos \beta)$$

Para raíz deslizándose:

$$S_r = \sum \frac{X_b * na}{A_r} * (\sin \beta \tan \phi + \cos \beta)$$

Para raíz quebrada:

$$S_r = 0$$

Dónde:

n = número de raíces en diferente clase diamétrica.

A = área transversal de la zona de corte. (m²)

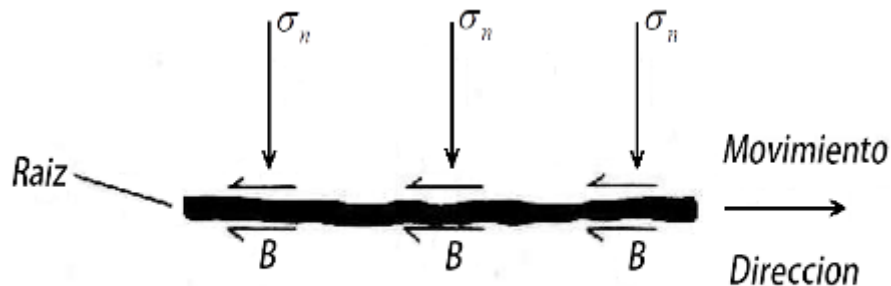
A_r = área transversal de raíces (m²)

a = sección transversal promedio de raíces por clase diamétrica (m²)

2.2.14. Limitantes de los esfuerzos de fricción B sobre el contacto suelo - raíz:

La tensión de la raíz es un parámetro básico para explicar los valores más altos de la resistencia al corte de un suelo con raíces penetradas en comparación con un suelo sin raíces. El alargamiento de la raíz causa el estrés de la raíz. Una raíz solo puede elongarse si está firmemente anclada en un suelo. Waldron y Dakessian (1981). En la figura 6, se observa un sistema suelo-raíz deslizando.

Figura 6. Interacción entre el suelo y la raíz en un deslizamiento directo.



Fuente: Mulder, H.F.H.M, Interacción entre el suelo y la raíz en un deslizamiento directo.

El contacto suelo - raíz obedece a la ley de Coulomb (Milligan y Palmeira, 1987).

McKyes propuso una variación de esta ley:

$$B_f = C_a + \sigma_N * \tan \delta = C_a + \sigma_N * R * \tan \varphi$$

B_f = esfuerzo de corte a lo largo del contacto suelo – raíz debido al deslizamiento directo (kPa)

C_a = esfuerzo de adhesión raíz – suelo, independiente del esfuerzo normal (kPa)

σ_N = esfuerzo normal sobre la zona de corte (kPa)

δ = ángulo de fricción en el contacto suelo – raíz (°)

φ = ángulo de fricción interna del suelo (°)

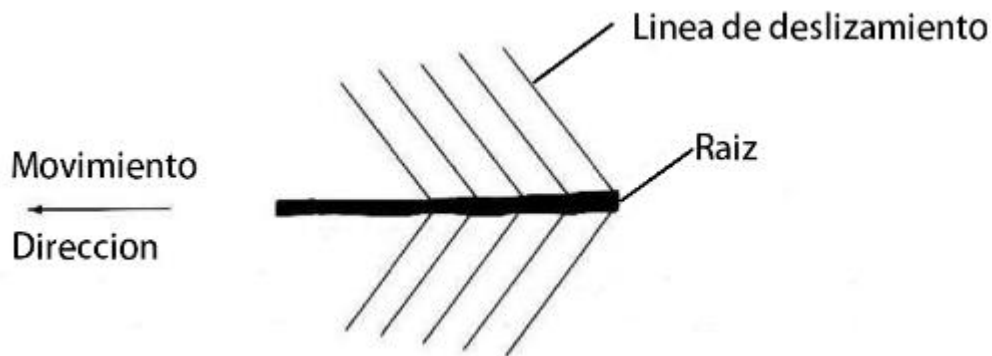
R = relación del ángulo de fricción de contacto raíz – suelo con el ángulo de fricción del suelo.

A continuación, se discuten mecanismos que pueden explicar los altos valores de los esfuerzos de fricción.

2.2.15. Esfuerzos ejercidos sobre el suelo por una raíz paralela a su superficie

Este mecanismo asume que un esfuerzo de fricción (B_p) se desarrolla a lo largo del contacto suelo - raíz, debido a una elongación en el eje más largo de la raíz. Si una raíz está ejerciendo esfuerzos sobre el suelo, el esfuerzo principal mayor σ_1 es paralelo a la superficie de la raíz, con igual magnitud al esfuerzo de fricción pero con signo contrario. (Mulder, H.F.H.M, 1991)

Figura 7. Líneas de deslizamiento debido a un movimiento a lo largo del eje principal de la raíz.



Fuente: Mulder, H.F.H.M, Líneas de deslizamiento debido a un movimiento a lo largo del eje principal de la raíz.

Si ocurre una falla su plano de falla hace un ángulo δ_f con la superficie de la raíz y puede ser calculado con:

$$\delta_f = 45^\circ + \frac{\phi}{2}$$

δ_f = Angulo entre el plano de falla y la superficie de la raíz ($^\circ$)

Si combinamos la ley de Coulomb, el círculo de esfuerzos de Mohr y la ecuación anterior, podemos establecer una relación entre σ_1 y σ_3 (esfuerzo principal menor)

$$\sigma_1 = \sigma_3 k_a^2 - 2ck_a$$

$$k_a = \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$$

C = Cohesión (kPa)

Ahora, si conocemos el ángulo ε entre σ_1 y σ_3 obtenemos una relación con el esfuerzo por sobrecarga σ_z :

$$\sigma_z = \sigma_1 \sin^2 \varepsilon + \sigma_3 \cos^2 \varepsilon$$

Al combinar las dos ecuaciones anteriores, obtenemos el esfuerzo de fricción B_p :

$$-B_p = \sigma_1 = \frac{\sigma_z + 2ck_a \cos^2 \varepsilon}{\sin^2 \varepsilon + k_a^2 \cos^2 \varepsilon}$$

Con el fin de dar a conocer el aporte de la raíz a la estabilización de suelos, se citan los siguientes autores, quienes hacen un análisis al aporte de la raíz y las condiciones generales de la misma.

López (2020), afirma que 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 tiende a unir el suelo en una masa única. (López, 2020).

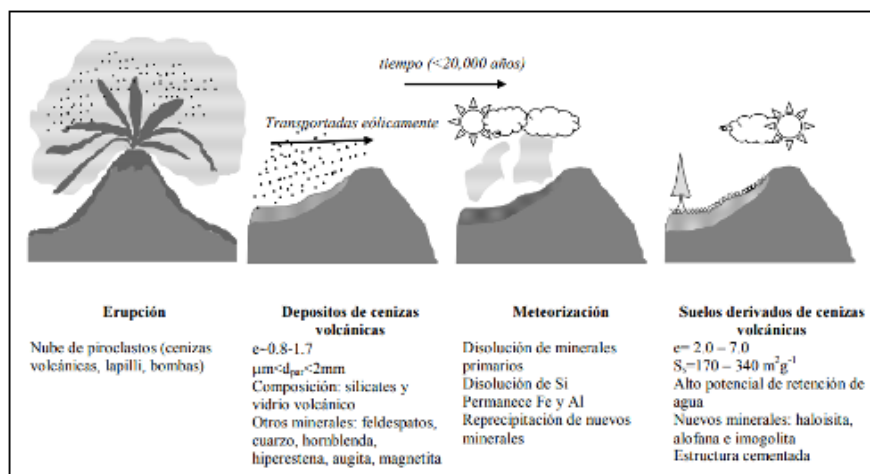
Señala Boris (2018), con relación a la resistencia que confieren las raíces al suelo, que el incremento en la resistencia al corte por la acción de ellas puede alcanzar el doble de su valor cuando éstas no están presentes. Sin embargo, el refuerzo debido a la vegetación puede ser limitado por la conformación y distribución de los sistemas radicales, ya que no es posible garantizar que en un movimiento en masa 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.

Igualmente, Campos y León (2017), 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 de suelo relativamente plástico; los esfuerzos se movilizan entre la matriz y el material fibroso (raíces). (Campos y León, 2017), a la hora de estudiar la estabilización de taludes no solo se debe tener en cuenta las propiedades mecánicas del suelo, sino que también juega un papel importante el componente hidrológico e hidráulico de la zona de estudio.

2.2.16. Suelos Derivados de la Ceniza Volcánica

Son suelos que se han generado mediante una serie de procesos, los cuales inician con la expulsión de material piroclásticos (espuma de vidrio muy fragmentada por explosividad asociada con expulsión violenta de gases) al exterior producto de erupciones volcánicas, terminando con el depósito del material particulado en la capa superficial del suelo y posteriormente la meteorización. Este material particulado que se genera presenta diferentes diámetros, los cuales son transportados del lugar donde se generaron hasta diferentes puntos dependiendo de factores como: fuerza de expulsión, altura de las partículas generadas, sentido y velocidad de los vientos, cabe decir que las partículas con diámetros inferiores recorren distancias mucho mayores que las de mayor diámetro.

Figura 8. Formación de los suelos derivados de cenizas volcánicas.



Fuente: Formación de los suelos derivados de ceniza volcánica (A, Lizcano, 2016)

Para Peñafiel, La definición de ceniza corresponde a partículas menores a 2 mm de diámetro, los cuales pueden estar compuestas por granos que van desde tamaño arena a tamaño coloidal. Existen depósitos de cenizas cementadas llamada ignimbritas y de cenizas no cementadas denominadas tetras. Las cenizas volcánicas están compuestas en su mayoría por vidrio volcánico, material altamente susceptible a la alteración, que al descomponerse genera partículas que preceden la formación de arcillas. Estas partículas que son denominadas alofanos e imogolitas (poseen una estructura parcialmente cristalizada, por lo no pueden ser consideradas en el grupo de materiales denominados amorfos), son responsables de las propiedades singulares de estos suelos. En geotecnia, es común referirse a estos materiales como suelos alofánicos, mientras que en agronomía se les conoce como Andosoles.

Las cenizas volcánicas están formadas por magma pulverizado, el cual está constituido principalmente por vidrio volcánico, cristales y líticos arrancados del conducto volcánico, en menor proporción.

Los vidrios pueden ser clasificados por medio del contenido de sílice (SiO_2) total, entregando características físicas especiales a cada uno de ellos, como por ejemplo la viscosidad. Los nombres para cada una de las composiciones son resumidas en la siguiente tabla.

Tabla 6. Identificación de los diferentes tipos de vidrios volcánicos.

| Tipo de roca | Nombre del depósito | Total SiO_2 (%) | Tipo de vidrio |
|--------------|---------------------|--------------------------|----------------|
| Ácida | Riolita | 100 - 70 | No-coloreados |
| Ácida | Dacita | 70 - 62 | No- coloreados |
| Intermedia | Andesita | 62 - 58 | No- coloreados |
| Básica | Basalto andesítica | 58 - 53.5 | Coloreados |
| Básica | Basáltica | 53.5 - 45 | Coloreados |

Fuente: Paredes, M (2005), Identificación de los diferentes tipos de vidrios volcánicos (cuadro).

Recuperado de Genesis y estructura de los suelos alofónicos en Chile

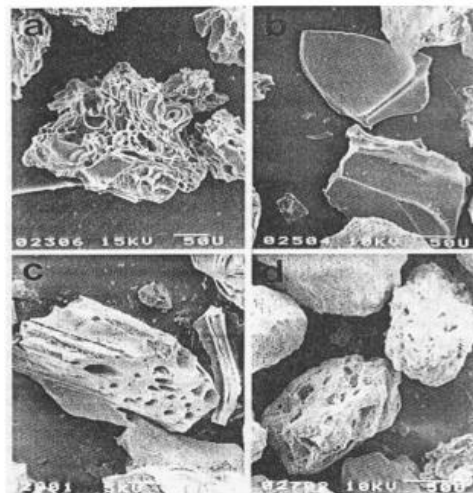
Un punto importante es la densidad de SiO_2 contenida en los vidrios. Tal densidad es uno de los factores que controla que las partículas de vidrio puedan ser más o menos alterables frente a los procesos físicos y químicos producidos por las condiciones ambientales y topográficas del lugar. Los vidrios coloreados poseen menores densidades de SiO_2 que los no coloreados, por lo

cual, los vidrios coloreados son mucho más alterables que los no coloreados (Shoji, 2018). Por lo anterior es importante clasificar los vidrios volcánicos en dos grandes grupos: los coloreados y los no coloreados, como se observa en la tabla anterior. Esta separación obedece a la composición química que presentan los vidrios volcánicos, pues vidrios volcánicos básicos entregan colores más oscuros, mientras que composiciones más ácidas entregan colores más claros. Esta identificación entre vidrios coloreados y no coloreados, es muy útil al momento de identificación mineralógica del producto final de alteración del vidrio volcánico en el suelo (Shoji, 1996), (Peñañiel, 2005).

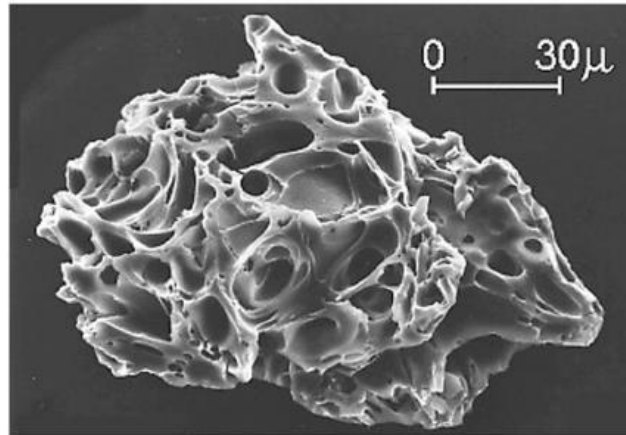
La alteración del vidrio volcánico también está relacionada con los distintos tipos de morfologías presentes en las partículas. Tales morfologías son producto de la composición del vidrio volcánico que determina características como viscosidad y contenido de gases. Como ejemplo de ello, composiciones más ácidas poseen viscosidades y contenido de gases mayores a los de composiciones básicas. Por lo tanto partículas de vidrio de composiciones más ácidas entregarán partículas de poros de gran tamaño, producto del escape de gases y de la gran viscosidad presente (Peñañiel, 2005).

Atendiendo a las diferentes morfologías encontradas en las partículas de vidrio volcánico, Yamada y Shoji (1983) clasificaron las partículas de vidrio volcánico en cuatro categorías, (figura 9): a) Tipo esponja (pómez), b) Tipo plato (sólidas), c) Fibras (fiamez) y d) Tipo de grano.

Figura 9. Morfología de los 4 tipos de vidrios volcánicos.



Fuente: Paredes, M, (2005), Morfología de los 4 tipos de vidrios volcánicos. Recuperado de Genesis y estructura de los suelos alofónicos en Chile.

Figura 10. Partícula de vidrio volcánico

Fuente: SEM image of volcanic ash from Mount St. Helen's eruption. Credit: United States Geological Survey and A.M. SarnaWojcicki.

2.2.17. Suelos Derivados De Cenizas Volcánicas En Colombia

En Colombia, las cenizas volcánicas que dieron origen a los suelos emanaron durante las erupciones del complejo de volcanes Ruiz-Tolima en el Holoceno y Pleistoceno (recientes 20.000 años) del período Cuaternario.

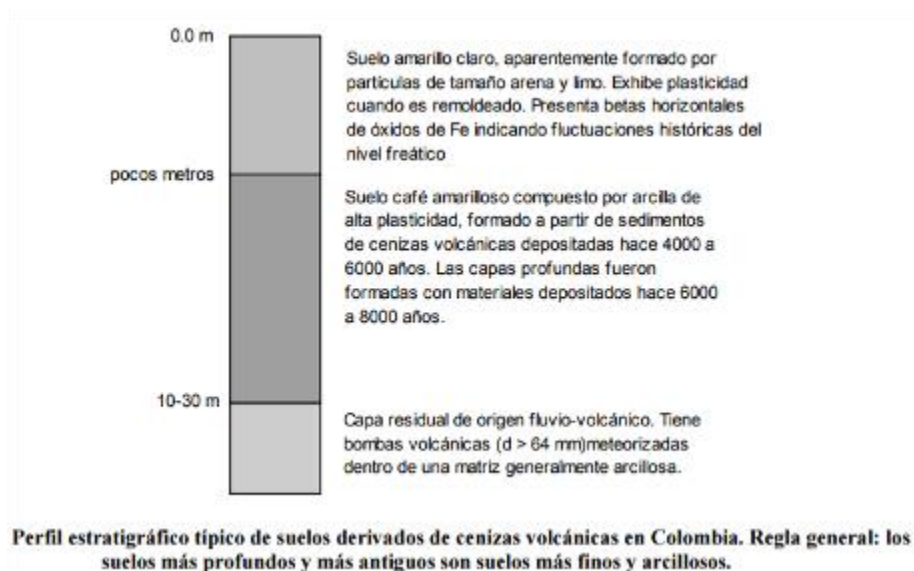
En Colombia, la influencia de la meteorización, especialmente procesos de descomposición que generan arcillas se incrementan con la componente ambiental de mayor humedad y mayor temperatura, en proximidades a focos de emisión de cenizas, los suelos son poco descompuestos, ya que están ubicados en zonas principalmente de páramos y nevados los que proveen conservación por sus bajas temperaturas, procesos similares a los que se utilizan para conservar alimentos en sistemas de refrigeración.

Adicionalmente, los depósitos más abundantes y de mayor espesor se presentan en regiones próximas a los focos de emisión por procesos volcánicos explosivos (notas clase de pregrado de geología) de clima frío y muy frío, mientras que espesores menores son formados en ambientes cálidos y húmedos en donde la meteorización es más intensa (Arango, 1993). Relieves ligeramente ondulados o planos contribuyen a la formación de depósitos de gran espesor,

mientras que zonas de alta pendiente, más erodables, llevan a bajos espesores. El perfil estratigráfico generalizado de estos suelos en Colombia consiste en una capa superficial formada a partir de la meteorización de las cenizas volcánicas, cuyo espesor puede alcanzar hasta 20 m. Subyaciendo esta capa se encuentra una capa de saprolito (espesor ~ 20 m) formada por la meteorización de materiales piroclásticos y flujos volcánicos. A mayor profundidad, se encuentra un depósito de 100 m de espesor, formado de los materiales emanados durante las erupciones volcánicas al final del terciario. Este depósito yace sobre roca intacta, anfibolita y esquisto del período Cretáceo (Forero et al., 1999). Un perfil estratigráfico típico en la región del Eje Cafetero se presenta a continuación. (Lizcano, 2016)

Seguidamente, en la ilustración 10 se observa el perfil estratigráfico típico de cenizas volcánicas en Colombia.

Figura 11. Perfil estratigráfico típico de cenizas volcánicas en Colombia



Fuente: Lizcano, (2016). Recuperado de suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia

Como caso particular se encuentran los depósitos de la ciudad de Manizales compuestos por una serie de características descritas por (Naranjo & Ríos, 1989), como: “fragmentos rotos de pómez y escoria de composición dacítica, así como de fragmentos de rocas (dacitas y andesitas porfíricas) de diferente tamaño que forman niveles de ceniza y lapilli”.

En estos depósitos presentes en la capital caldense se pueden distinguir dos estados del suelo: suelos con bajo grado de consolidación y consolidado; el primero está compuesto por paquetes de arena volcánica cuyo espesor puede alcanzar de 10 a 50 cm, sobre este depósito descansan paquetes de materiales como ceniza con lapilli, ceniza arenosa y lapilli; el espesor promedio de esta primera unidad en la ciudad varía entre 10 y 15 m, estas cenizas muestran tonalidades de gris, amarillo, café e incluso color rojizo donde se evidencian niveles de oxidación producto del nivel freático, adicionalmente la composición principal de estos estratos son los anfíboles, feldspatos, cuarzo, pómez y líticos; por su condición de suelos con bajo grado de consolidación son potencialmente inestables si se localizan sobre laderas de pendiente media o pronunciada y específicamente si no existe una cobertura vegetal adecuada. El segundo estado del suelo denominado toba se localiza subyaciendo el estado suelos con bajo grado de consolidación, sus espesores pueden alcanzar los 10 m y se profundizan hasta alcanzar el contacto con las unidades geológicas presentes en la ciudad como lo son las rocas de la formación Quebrada Grande, los flujos volcánicos Casabianca y Manizales o las unidades ígneas. La textura de esta unidad es limo arenoso y los colores varían entre café oscuro y claro, gris verdoso y oscuro, y amarillo grisáceo, además, dentro de estos depósitos piroclásticos se pueden detectar niveles de paleosuelos que insinúan la inactividad volcánica entre eventos y su espesor varía entre 1 y 2 m (Aguirre et al., 1992). (Aristizábal, 2017).

En conclusión, los suelos derivados de ceniza volcánica son caracterizadas por varias propiedades como se mencionó anteriormente, como resultados de la evolución y meteorización de los elementos que la componen. “La manera como las partículas interactúan y forman la estructura abierta que caracteriza estos suelos está influenciada por la mineralogía, la presencia de cementantes, la interacción con el agua y el aire, entre otros” (Ardila, 2016)

2.2.18. Ensayos en suelos

Desde los inicios del hombre en la tierra, los suelos han sido la base fundamental para llevar a cabo las obras de infraestructura, las cuales le han permitido encontrar las condiciones óptimas para el desarrollo del mundo. Así mismo vio la necesidad de tener un conocimiento más profundo y tratarlos desde un punto de vista más científico para obtener un aprovechamiento

técnico e íntegro del suelo, por tanto empezó por realizar estudios de manera sistemática y organizada (1913 Por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles 1) y años más tarde (1925-1929) gracias a los estudios realizados por el Ingeniero de República Checa Karl Von Terzaghi, se crea lo que hoy se conoce como la Mecánica de Suelos, la cual definió como una “aplicación de las leyes de la mecánica y la hidráulica a los problemas de ingeniería que tratan con sedimentos y otras acumulaciones no consolidadas de partículas sólidas, producidas por la desintegración mecánica y/o descomposición química de las rocas, independientemente de que tengan o no contenido de materia orgánica”.

La mecánica de suelos es una disciplina de la Ingeniería Civil que involucra el estudio del suelo, su comportamiento, su resistencia, su consistencia y la sustentabilidad para soportar estructuras y fundaciones pesadas, dando así datos y herramientas al Ingeniero Civil para conocer y predecir el comportamiento de dicha masa de suelo, como por ejemplo: capacidad portante de los suelos, permeabilidad, asentamientos, presión de poros, resistencia a la compresión, ángulo de fricción y cohesión, las cuales son determinadas gracias a los estudios en laboratorio e In-situ a muestras tomadas y cuyos valores se convierten en el insumo de diseños ingenieriles que garantizan seguridad, durabilidad y estabilidad. De igual manera la mecánica de suelos también estudia el flujo del agua interna y externa dentro de la masa de terreno, la cual presenta unas características diferentes a la de una masa de suelo en estado seco.

Los estudios realizados sobre los suelos permiten conocer que tan factible resulta hacer uso de ellos en las diferentes construcciones que a diario se realizan. El suelo se puede definir como aquel material terroso, el cual presenta una granulometría gruesa y fina dependiendo del tamaño de las partículas. Se consideran suelos gruesos cuando más del 50% de las partículas de la muestra en estudio, son de tamaño mayor a 0,075 mm. Por el contrario, se consideran suelos finos cuando más del 50% de las partículas de la muestra en estudio, son de tamaño menor a 0,075 mm. Los suelos gruesos pueden ser gravas o arenas y los suelos finos pueden ser limos, arcillas o suelos altamente orgánicos (turba).

Figura 12. Extracción de muestra en terreno



La caracterización y clasificación de los suelos se debe en gran parte a los buenos procedimientos efectuados en laboratorios con el fin de que tengan la menor variabilidad posible entre laboratorios, por tanto, desde el Instituto Nacional de Vías “INVIAS” se han constituido y propuesto normas para la realización de dichos ensayos.

Cabe agregar que la precisión en los resultados de los ensayos de laboratorio no solamente depende del seguimiento estricto de los pasos recomendados por las normas existentes, sino también de la calidad y buen estado de los equipos que se utilicen en el proceso, así como de la capacitación de los laboratoristas acerca del tema, de las condiciones de los lugares destinados a los laboratorios y de los procedimientos de extracción y manejo de muestras.

Figura 13. Ensayo de corte suelo – Raíz.**Figura 14. Ensayo de tensión en Raíz**

Este equipo hace parte del laboratorio de suelos de la Universidad Nacional, Sede Manizales y fue diseñada por el docente Carlos Enrique Escobar Potes

Por lo anterior se desarrollan herramientas con las cuales se tenga un acercamiento al comportamiento de los materiales con los cuales interactuamos en el campo de la ingeniería, en este momento nos interesan los ensayos realizados a los suelos y el aporte que le pueden sumar las raíces.

Entre la variedad de variables existentes para análisis de suelos y su interacción con otros elementos nos centraremos en las siguientes, los cuales se plantearon desde el inicio para el desarrollo de los estudios a realizar.

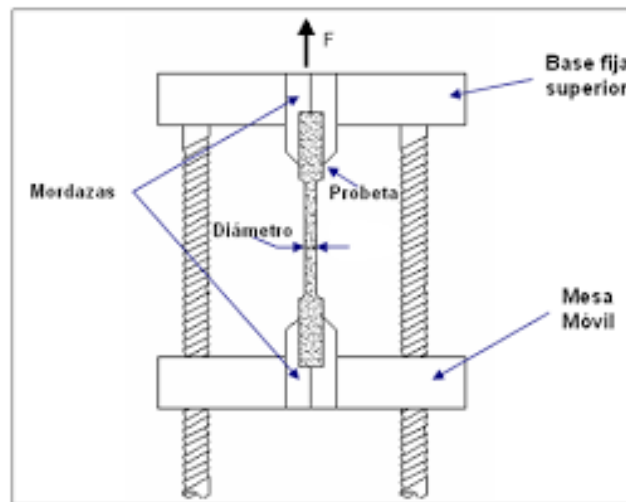
2.2.18.1 Tensión raíz

La tracción o tensión se define como el esfuerzo interno a que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto, y tienden a estirarlo. Lógicamente, se considera que las tensiones que tiene cualquier sección perpendicular a dichas fuerzas son

normales a esa sección, y poseen sentidos opuestos a las fuerzas que intentan alargar el cuerpo. (WordPress, 2019)

El ensayo tracción es utilizado para medir la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente. Esta prueba consiste en alargar una probeta de ensayo por fuerza de tensión, ejercida gradualmente, con el fin de conocer ciertas propiedades mecánicas de materiales en general: su resistencia, rigidez y ductilidad

Figura 15. Máquina de tensión



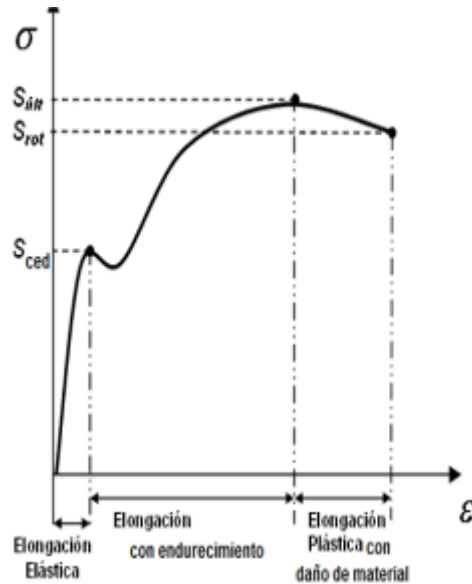
Fuente: (ECI, 2011)

La máquina utilizada en el laboratorio para la realización de esta práctica es una Prensa Hidráulica. Esta máquina se utiliza para dar forma, extruir, marcar metales y para evaluar la ductilidad de ciertos materiales metálicos sometidos a grandes presiones. (ECI, 2011).

Para hacer un análisis del comportamiento del material ante una carga, podemos hacer uso del Diagrama Esfuerzo – Deformación el cual representa mediante una curva la capacidad de un material de tolerar una carga específica. Los datos para generar esta curva van resultando de acuerdo como se vaya aumentando la carga. Cabe anotar que, dependiendo del tipo de material a

probar, se generan diferentes tipos de trazos ya que existen diversos materiales que cuentan con características propias (metal, vidrio, plástico, etc.).

Figura 16. Curva Esfuerzo – Deformación



Fuente: (ECI, 2011)

S_{ced} : Resistencia en el punto de cedencia

S_{rot} : Resistencia a la rotura

$S_{últ}$: Resistencia en el punto de esfuerzo último

Los valores ingenieriles del esfuerzo son determinados a partir de la carga medida (F) durante del ensayo y del área transversal inicial de la probeta (A_0) relacionadas mediante la ecuación (a), y los correspondientes a la deformación se determinan mediante la razón de cambio en el desplazamiento de las mordazas (ΔL) y la longitud inicial de la muestra, ecuación (b). (ECI, 2011)

$$\sigma_e = \frac{F}{A_0} \quad (\text{a}) \qquad \varepsilon_e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\text{b})$$

La resistencia a la tracción en suelos es un parámetro que por lo general es bajo con respecto a la resistencia a la compresión y además depende de la succión actuante, por tal razón se suele despreciar en muchos análisis geotécnicos convencionales, donde se adoptan las condiciones más desfavorables, como son considerar el suelo saturado y las succiones nulas, sin embargo, para el estudio de ciertos comportamientos específicos, como es el caso del agrietamiento de suelos por desecación, la mayoría de los modelos propuestos involucran la resistencia a la tracción como una de las variables que deben conocerse. (Álvarez, 2005)

Varios autores se han preocupado por el tema de la medición directa o indirecta de la resistencia a la tracción, sin embargo, en tales mediciones no se ha considerado la variación de la succión producida por las deformaciones que ocurren ante las cargas aplicadas y por lo tanto no es posible conocer el verdadero estado de tensiones del suelo en el momento de la rotura. En los ensayos reportados se considera que en el suelo actúa una succión media, que se determina al principio o al final del ensayo, la cual se puede medir directamente o se puede correlacionar con la humedad, mediante la curva de retención, sin embargo, es probable que este valor de succión difiera de la succión que se presenta en la zona de mayor tracción o que varíe de manera importante con las deformaciones inducidas. (Álvarez, 2005).

Actualmente existe interés por estudiar las propiedades mecánicas de los materiales biológicos, puesto que estos estudios serían de gran ayuda en la predicción de su capacidad para soportar esfuerzos continuos o intermitentes ocasionados por la acción del suelo, de la atmósfera, o bien, por intervenciones antropocéntricas. Un ejemplo de ello ocurre en situaciones donde existen pendientes o laderas con una cubierta vegetal que ayuda a mantener la estabilidad superficial del sitio debido, principalmente, a la acción conjunta entre el suelo o sustrato y las raíces de los vegetales. Esto se da porque durante el crecimiento de la planta, la raíz tiende a formar una malla compleja que está íntimamente embebida en el sustrato; por lo que la interfaz suelo-raíz puede considerarse desde el punto de vista estructural como un material compuesto. Bajo condiciones naturales, este material está sujeto a condiciones mecánicas debido a la acción

de fenómenos atmosféricos o telúricos, que, en conjunto con la gravedad, generan un aumento de la acción mecánica sobre el sistema, contribuyendo al deterioro de este. Para determinar y predecir la evolución del deterioro de la cubierta vegetal debido al efecto de la acción de estas condiciones es necesario medir y estimar las propiedades mecánicas de diversos sistemas raíz-sustrato.

A pesar de que las raíces son un material biológico, con una estructura compleja, estas se sujetan a los mismos principios físicos que los demás elementos, por tanto, para evaluar su resistencia y su función como elemento aportante a la estabilidad, se deben someter a las pruebas que se realizan a los suelos como son: resistencia al cortante, esfuerzo de deformación y ensayos de tensión. Estos ensayos se realizan independientes unos de otros (suelos, raíces) y en conjunto, con el fin de tener un patrón de referencia para comparar el aporte de las raíces al suelo.

Dada su complejidad el estudio implica abordar de manera multidisciplinaria el problema, estudiándolos tanto experimentalmente, en el laboratorio y en el campo, así como con la realización de pruebas mecánicas.

2.2.18.2 Corte Raíz:

De acuerdo con Herrera Passos, Amórtegui Gil, Las laderas están expuestas a procesos de erosión y de meteorización que imponen una pérdida de resistencia de los materiales térreos. El vetiver tiene la capacidad de retener las partículas de suelo con sus macollas y de reforzar el terreno con las raíces, induciendo resistencia a la tracción, que se manifiesta como un incremento en los valores de los parámetros de resistencia al corte del terreno.

Para este caso, el estudio se centra en la influencia de las raíces en la resistencia al corte del suelo, siguiendo el criterio de falla de Mohr-Coulomb, el cual expresa que la resistencia de un suelo se define en función de los esfuerzos desarrollados en el máximo de la curva esfuerzo-deformación. La resistencia al corte está relacionada con diferentes variables las cuales son: la cohesión, la resistencia a la fricción, el contenido de humedad, incluyendo la presión que se genere por el agua en los espacios pequeños en la masa del suelo. (Das, 2010)

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \phi$$

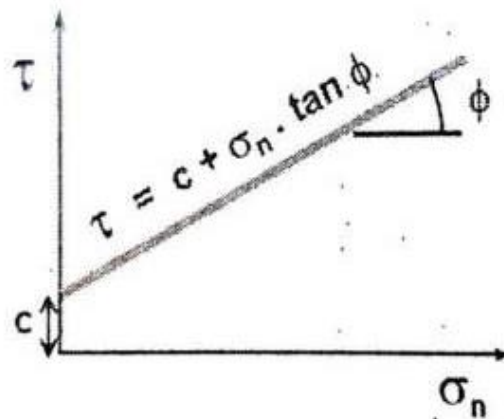
τ = Resistencia al corte, en kg/cm^2

ϕ = Ángulo de rozamiento interno, constante

c = Cohesión, en kg/cm^2

La ecuación propuesta anteriormente, en el espacio, describe una recta, representado en el eje de las ordenadas τ y de las abscisas σ_n , está gráfica resultante es conocida como: línea de resistencia intrínseca o envolvente de rotura del suelo. (Guerra, 2018)

Figura 17. Criterio de rotura de Mohr-Coulomb para suelos puramente cohesivos y semi – cohesivos



Fuente: Alarcón P, 2019

Cohesión: La cohesión se define como la adherencia producto de las fuerzas moleculares (fuerzas internas), que causan una atracción entre las partículas del suelo. (Crespo, 2004)

En mecánica de suelos, se emplea para representar en un suelo, la resistencia al cortante, el cual es producto de la adherencia entre las partículas. (Suarez, 2004)

Ángulo de fricción: Se define como la representación matemática del coeficiente de rozamiento, que este viene a ser cuando dos cuerpos que están en contacto experimentan una oposición al deslizamiento, gracias a la intensidad de apoyo de estos. Muchos factores son los que intervienen como: tamaño de los granos, forma, distribución de los tamaños de grano y densidad. (Suarez, 2004)

En el ensayo de corte directo, se coloca una muestra dentro de una caja de forma rectangular, cuadrada o circular, partida por la mitad. Para realizar el ensayo, una de las dos mitades se mueve con respecto a la otra mitad y el suelo se rompe a lo largo del plano entre los dos elementos de la caja. Es el ensayo más común para obtener la resistencia de los suelos en los estudios de deslizamientos. Este ensayo es simple y económico de realizar, pero presenta los inconvenientes del poco control que se tiene sobre las condiciones de drenaje, la dificultad para medir presiones de poros y algunos problemas inherentes a los mecanismos de las máquinas que realizan los ensayos. (Suarez, 2013)

El procedimiento más utilizado para la obtención de los parámetros de resistencia al corte, de acuerdo con el criterio de falla de Mohr-Coulomb, es el siguiente: tras hacer, al menos, tres veces el ensayo de corte directo con diferentes niveles de esfuerzo normal, se construyen las curvas de esfuerzo normal contra esfuerzo cortante y se traza una línea recta que genere el mejor promedio entre los valores de picos de esfuerzo cortante obtenidos. Esta recta corresponde a la envolvente de falla, cuya inclinación es equivalente al ángulo de fricción y el intercepto con el eje de las ordenadas a la cohesión del material. (Jessika Magreth herrera Passos, 2017)

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 de la fuerza cortante, y a su vez la variación del esfuerzo cortante llega a una tasa fija, 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. (Jessika Magreth herrera Passos, 2017)

CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo de estudio

Este estudio se desarrolló bajo una secuencia metodológica cuyas etapas se describen a continuación:

De acuerdo con Bungue (2020), el tipo de investigación es la aplicada la cual será adoptada para el desarrollo de este trabajo de grado, se caracteriza en buscar la aplicación o utilización de los conocimientos adquiridos, a la vez que se adquieren otros, después de implementar y sistematizar la práctica basada en investigación. El uso del conocimiento y los resultados de investigación que da como resultado una forma rigurosa, organizada y sistemática de conocer la realidad, tal como lo refiere Bungue (2020).

Figura 18. Descripción de la planta



Por otra parte, esta metodología del trabajo desarrollado se divide en 3 fases principales, la primera enfocada a la recolección de información acerca de la descripción de la planta, sus características climatológicas y estudios relacionados de la gramínea con los suelos derivados de ceniza volcánica y de los proyectos en los que se ha implementado, paralelamente se adelanta la gestión de materiales e insumos para la siembra de especies a estudiar, la cual dura aproximadamente 10 meses, de acuerdo con la figura 19 y 20.

Figura 19. Descripción de la planta



Así mismo, en la segunda fase, se desarrollaron estudios de laboratorio para evaluar la Interacción de la raíz con el suelo, los cuales comprendieron una serie de ensayos de la raíz en suelos derivados de ceniza volcánica, Corte directo suelo – raíz, corte directo suelo, Tensión raíz ϕ , resistencia al corte de raíz, figura 20. Los resultados de estas fases generaron unos parámetros los cuales dan paso al desarrollo de la tercera fase o final, donde se procesó la información recolectada dando así paso a las conclusiones del proyecto.

Figura 20. Serie de ensayos de la raíz en estudio en suelos derivados de ceniza volcánica



Figura 21. Serie de ensayos de la raíz en estudio en suelos derivados de ceniza volcánica



En este mismo orden de ideas, con respecto al tercer objetivo del estudio, adelantar ensayos de tensión y corte de raíces de vetiver en suelos derivados de ceniza volcánica, se tuvo que seleccionar y sembrar una cantidad de esquejes de la planta en una serie de recipientes de madera -elaborados para la actividad- ver figura 22, con un área cuadrada de 400 cm² y de altura de 20 cm -volumen del cajón de corte-, todo esto con el fin de evitar perturbaciones geométricas del sistema radicular cuando se realizó la siembra e inició su desarrollo.

Figura 22. Plantación de Vetiver en cajones



Durante el período de crecimiento las plantas fueron monitoreadas constantemente y sometidas a las mismas condiciones de luz, humedad y temperatura, para disminuir las variables que pudieran afectar el crecimiento y madurez, adicionalmente se sembraron paralelamente en terreno abierto una serie de plantas con el fin de evidenciar el desarrollo de la raíz y la adhesión al suelo en los diferentes medios.

Figura 23. Plantación de Vetiver en campo abierto



Figura 24. Crecimiento las plantas



A pesar de que las raíces son un material biológico, con una estructura compleja, estas se sujetan a los mismos principios físicos que los demás elementos, por tanto, para evaluar su resistencia y su función como elemento aportante a la estabilidad, se deben someter a las pruebas que se realizan a los suelos como son: resistencia al cortante, esfuerzo - deformación y ensayos de tensión. Estos ensayos se realizan independientes unos de otros (suelos, raíces) y en conjunto, con el fin de tener un patrón de referencia para comparar el aporte de las raíces al suelo.

Después de un tiempo del desarrollo de las plantas en los diferentes medios, se procedió a realizar los ensayos de corte directo (esfuerzos verticales correspondientes a 0.125 Ton/m², 0.25 Ton/m² y 0.50 Ton/m²) y tensión, arrojando la información necesaria para procesar y generar unas conclusiones al comparar los datos obtenidos entre sí. Cabe destacar que para desarrollar este proceso se contó con una plantilla en Excel en la cual se consolidó toda la información arrojada y procesada para cada ensayo con el fin de obtener el dato requerido, en este caso: carga máxima y cortante máximo τ .

Tabla 7. Carga máxima y cortante máximo de los ensayos realizados.

Para este caso se tomó como ejemplo el ensayo 21, en el cual, se presenta, el proceso y datos arrojados para el ensayo de corte.

| | | | | | |
|-----------|-------|-----------------|------------|------|--------------------|
| Ensayo N° | 21 | | σ_v | 0.50 | Kg/cm ² |
| P | 200.0 | Kg | σ_v | 5.00 | Ton/m ² |
| A | 400.0 | cm ² | γ_s | 1.58 | Ton/m ³ |
| L | 20 | cm | Z | 3.16 | m |

| | | | | | | | |
|-------------------|------------------|-----|-----|----------|-----------------|----|--------------------|
| Anillo Fact-KN | Lectura del dial | | | | | | |
| | Carga | Def | Def | Def Unit | A _c | T | τ |
| | Un | Un | cm | % | cm ² | Kg | Kg/cm ² |

| | | | | | |
|-----------|-------|-----------------|------------|------|--------------------|
| Ensayo N° | 21 | | σ_v | 0.50 | Kg/cm ² |
| P | 200.0 | Kg | σ_v | 5.00 | Ton/m ² |
| A | 400.0 | cm ² | γ_s | 1.58 | Ton/m ³ |
| L | 20 | cm | Z | 3.16 | m |

| Anillo Fact-KN | Lectura del dial | | | | | | |
|-------------------|------------------|-----|------|----------|-----------------|--------|--------------------|
| | Carga | Def | Def | Def Unit | A _c | T | τ |
| | Un | Un | cm | % | cm ² | Kg | Kg/cm ² |
| 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 | 400.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.098 | 50 | 265 | 0.67 | 3.37 | 386.54 | 9.99 | 0.03 |
| 0.196 | 100 | 397 | 1.01 | 5.05 | 379.81 | 19.99 | 0.05 |
| 0.294 | 150 | 477 | 1.21 | 6.06 | 375.77 | 29.98 | 0.08 |
| 0.392 | 200 | 543 | 1.38 | 6.90 | 372.41 | 39.97 | 0.11 |
| 0.49 | 250 | 596 | 1.51 | 7.57 | 369.71 | 49.97 | 0.14 |
| 0.588 | 300 | 609 | 1.55 | 7.74 | 369.04 | 59.96 | 0.16 |
| 0.686 | 350 | 623 | 1.58 | 7.91 | 368.37 | 69.95 | 0.19 |
| 0.784 | 400 | 676 | 1.72 | 8.58 | 365.68 | 79.94 | 0.22 |
| 0.882 | 450 | 676 | 1.72 | 8.58 | 365.68 | 89.94 | 0.25 |
| 0.98 | 500 | 689 | 1.75 | 8.75 | 365.00 | 99.93 | 0.27 |
| 1.078 | 550 | 729 | 1.85 | 9.25 | 362.98 | 109.92 | 0.30 |
| 1.176 | 600 | 742 | 1.88 | 9.42 | 362.31 | 119.92 | 0.33 |
| 1.274 | 650 | 768 | 1.95 | 9.76 | 360.97 | 129.91 | 0.36 |
| 1.372 | 700 | 795 | 2.02 | 10.10 | 359.62 | 139.90 | 0.39 |
| 1.47 | 750 | 808 | 2.05 | 10.26 | 358.95 | 149.90 | 0.42 |
| 1.568 | 800 | 815 | 2.07 | 10.35 | 358.61 | 159.89 | 0.45 |
| 1.666 | 850 | 821 | 2.09 | 10.43 | 358.27 | 169.88 | 0.47 |
| 1.764 | 900 | 835 | 2.12 | 10.60 | 357.60 | 179.88 | 0.50 |
| 1.862 | 950 | 861 | 2.19 | 10.94 | 356.25 | 189.87 | 0.53 |
| 1.96 | 1000 | 890 | 2.26 | 11.30 | 354.79 | 199.86 | 0.56 |
| 2.058 | 1050 | 900 | 2.29 | 11.43 | 354.28 | 209.85 | 0.59 |

Los datos referentes a σ_v son resultados de γ_s y la profundidad Z analizada,

σ_v = Esfuerzo vertical γ_s =peso del suelo Z =profundidad

$$\sigma_v = \gamma_s * Z \gamma_s = 1,58 \text{ Ton/m}^2$$

$$\sigma_v = 1,58 \text{ Ton /m}^3 * 0,79\text{m} = 0,125 \text{ Ton/m}^2$$

$$\sigma_v = 1,58 \text{ Ton /m}^3 * 1,58\text{m} = 0,25 \text{ Ton/m}^2$$

$$\sigma_v = 1,58 \text{ Ton /m}^3 * 3,16\text{m} = 0,50 \text{ Ton/m}^2$$

También se graficó los esfuerzos verticales (0.125 Ton/m² ,0.25 Ton/m² 0.50 Ton/m²) Vs corte máximo de cada una de las muestras, con el fin de evidenciar la línea de tendencia generada con su respectiva ecuación y obtener así los datos correspondientes a la cohesión C y ángulo de fricción ϕ .

A continuación se citan datos requeridos para graficas envolvente de falla, estos se presentan a manera de ejemplo.

Tabla 8. Datos requeridos para graficar Envolvente de falla.

| Esf. Vert | τ |
|--------------------------|--------------------------|
| Kg/cm² | Kg/cm² |
| 0,125 | 0,13 |
| 0,25 | 0,15 |
| 0,50 | 0,24 |
| Ecuación | |
| 0 | 0,084 |
| 1 | 0,3919 |

Figura 25. Envolverte de esfuerzo

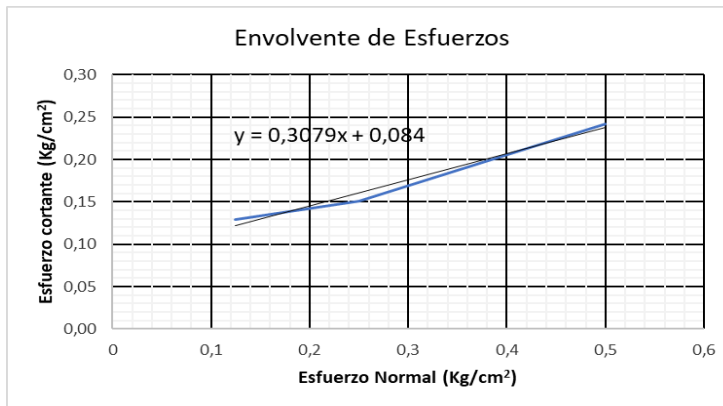


Tabla 9. Cohesión Vs Angulo de fricción

| | | |
|----------|--------------|---------------|
| C | 0,08 | Kg/cm2 |
| ϕ | 21,40 | ° |

Debido a que era necesario establecer una relación directa entre las raíces de vetiver y el suelo volcánico, después de hacer cada ensayo de corte directo en las muestras seleccionadas, se precedió a:

1. Lavado de raíces.
2. Corte individual de las raíces de la planta principal, fibra por fibra.
3. Se midieron cada una de las fibras con calibrador y se determinó el área de ocupación por cm² en la muestra ensayada.

Los resultados obtenidos permitieron concluir el área general de ocupación de las raíces en cada una de las muestras de suelo.

Figura 26. Clasificación de cantidad de raíces por área



De acuerdo con el último objetivo, se realizaron los análisis de los resultados obtenidos en los ensayos generando gráficas, para identificar el aporte de la raíz de vetiver a la resistencia del suelo.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS**4.1. Análisis de los resultados obtenidos en los ensayos**

En este apartado, se procedió a analizar los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados y las gráficas obtenidas, las cuales permitieron conocer el aporte de la raíz del vetiver a la resistencia del suelo de ceniza volcánica. Estos resultados son de valioso aporte, ya que abren la posibilidad de implementar esta técnica en el Departamento de Caldas con mayor confiabilidad, contribuyendo al control de la erosión y el incremento de la resistencia a la inestabilidad y teniendo en cuenta que los depósitos de suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia son representativos, por su abundancia en especial áreas de departamentos como Nariño, Cauca, Huila, Tolima, Caldas, Quindío y Risaralda entre otros.

En la tabla N. 10, se relacionan los resultados generales obtenidos en los ensayos de corte directo de cada una de las muestras y la información requerida para obtener las gráficas que indiquen el incremento en la resistencia y su comportamiento en los suelos, al pasar de suelos sin raíces y a los suelos con raíces.

Tabla 10. Relación de resultados

| P Kg | Número de plantas | Número de ensayo | Carga Max / Deformación | Carga | Area Corte Ac | Ocupacion / Area | Peso suelo |
|------|-------------------|------------------|-------------------------|-------|---------------|------------------|------------|
| 50 | sin plantas | Ensayo No.1 | Carga Max | 250 | 386.18 | - | - |
| | | | Deformación | 272 | | | |
| 100 | sin plantas | Ensayo No.1 | Carga Max | 280 | 371.65 | - | - |
| | | | Deformación | 558 | | | |
| 200 | sin plantas | Ensayo No.1 | Carga Max | 450 | 372.57 | - | - |
| | | | Deformación | 540 | | | |
| 50 | sin plantas | Ensayo No.2 | Carga Max | 110 | 388.06 | - | - |
| | | | Deformación | 235 | | | |
| 100 | sin plantas | Ensayo No.2 | Carga Max | 320 | 392.13 | - | - |
| | | | Deformación | 155 | | | |
| 200 | sin plantas | Ensayo No.2 | Carga Max | 830 | 374.6 | - | - |
| | | | Deformación | 500 | | | |
| 50 | 2 plantas | Ensayo No.3 | Carga Max | 235 | 370.49 | 0.47 | 8.832 |
| | | | Deformación | 593 | | | |
| 100 | 2 plantas | Ensayo No.3 | Carga Max | 327 | 382.68 | 0.30 | 7.909 |
| | | | Deformación | 341 | | | |
| 200 | 2 plantas | Ensayo No.3 | Carga Max | 534 | 374.09 | 0.36 | 8.057 |
| | | | Deformación | 510 | | | |
| 50 | 2 plantas | Ensayo No.4 | Carga Max | 650 | 392.13 | 1.12 | 9.185 |
| | | | Deformación | 155 | | | |
| 100 | 2 plantas | Ensayo No.4 | Carga Max | 850 | 381.2 | 1.30 | 8.421 |
| | | | Deformación | 370 | | | |
| 200 | 3 plantas | Ensayo No.4 | Carga Max | 900 | 366.47 | 0.72 | 7.99 |
| | | | Deformación | 660 | | | |
| 50 | 2 plantas | Ensayo No.5 | Carga Max | 650 | 389.84 | 0.86 | 8.035 |
| | | | Deformación | 200 | | | |
| 100 | 2 plantas | Ensayo No.5 | Carga Max | 650 | 377.65 | 0.82 | 8.200 |
| | | | Deformación | 440 | | | |
| 200 | 2 plantas | Ensayo No.5 | Carga Max | 750 | 368.5 | 0.60 | 9.626 |
| | | | Deformación | 620 | | | |
| 50 | 2 plantas | Ensayo No.6 | Carga Max | 230 | 370.49 | 0.80 | 8.675 |
| | | | Deformación | 581 | | | |
| 100 | 3 plantas | Ensayo No.6 | Carga Max | 850 | 381.71 | 0.69 | 8.546 |
| | | | Deformación | 360 | | | |
| 200 | 4 plantas | Ensayo No.6 | Carga Max | 800 | 370.03 | 0.97 | 8.454 |
| | | | Deformación | 590 | | | |
| 50 | 2 plantas | Ensayo No.7 | Carga Max | 230 | 370.49 | 0.80 | - |
| | | | Deformación | 581 | | | |
| 100 | 2 plantas | Ensayo No.7 | Carga Max | 327 | 382.68 | 0.46 | 8.991 |
| | | | Deformación | 341 | | | |
| 200 | 2 plantas | Ensayo No.7 | Carga Max | 534 | 374.09 | 0.30 | 8.227 |
| | | | Deformación | 510 | | | |
| 100 | 2 plantas | Ensayo No.8 | Carga Max | 1100 | 377.9 | 0.74 | 8.636 |
| | | | Deformación | 435 | | | |
| 100 | 4 plantas | Ensayo No.9 | Carga Max | 1100 | 363.93 | 0.92 | 8.862 |
| | | | Deformación | 710 | | | |
| 50 | 1 planta | Ensayo No.10 | Carga Max | 640 | 363.16 | 4.16 | - |
| | | | Deformación | 725 | | | |
| 100 | 1 planta | Ensayo No.10 | Carga Max | 530 | 350.22 | 3.11 | - |
| | | | Deformación | 980 | | | |
| 200 | 1 planta | Ensayo No.10 | Carga Max | 1150 | 365.91 | 3.74 | - |
| | | | Deformación | 671 | | | |
| 50 | 1 planta | Ensayo No.11 | Carga Max | 620 | 359.39 | 3.36 | - |
| | | | Deformación | 780 | | | |

| P Kg | Número de plantas | Número de ensayo | Carga Max / Deformación | Carga | Area Corte Ac | Ocupacion / Area | Peso suelo |
|------|-------------------|------------------|-------------------------|-------|---------------|------------------|------------|
| 100 | 1 planta | Ensayo No.11 | Carga Max | 660 | 361.9 | 4.56 | - |
| | | | Deformación | 750 | | | |
| 200 | 1 planta | Ensayo No.11 | Carga Max | 1350 | 361.38 | 4.10 | - |
| | | | Deformación | 760 | | | |
| 50 | 1 planta | Ensayo No.12 | Carga Max | 680 | 348.59 | 2.46 | - |
| | | | Deformación | 1012 | | | |
| 100 | 1 planta | Ensayo No.12 | Carga Max | 820 | 359.87 | 2.23 | - |
| | | | Deformación | 790 | | | |
| 200 | 1 planta | Ensayo No.12 | Carga Max | 1150 | 355.55 | 4.26 | - |
| | | | Deformación | 880 | | | |
| 50 | 1 planta | Ensayo No.13 | Carga Max | 620 | 355.3 | 2.59 | - |
| | | | Deformación | 880 | | | |
| 100 | 1 planta | Ensayo No.13 | Carga Max | 520 | 368.5 | 3.17 | - |
| | | | Deformación | 620 | | | |
| 200 | 1 planta | Ensayo No.13 | Carga Max | 1000 | 373.12 | 4.84 | - |
| | | | Deformación | 530 | | | |
| 50 | 1 planta | Ensayo No.14 | Carga Max | 640 | 354.89 | 3.30 | - |
| | | | Deformación | 890 | | | |
| 100 | 1 planta | Ensayo No.14 | Carga Max | 900 | 366.47 | 2.18 | - |
| | | | Deformación | 660 | | | |
| 200 | 1 planta | Ensayo No.14 | Carga Max | 1250 | 353.52 | 4.25 | - |
| | | | Deformación | 915 | | | |
| 50 | 1 planta | Ensayo No.15 | Carga Max | 640 | 371.81 | 3.17 | - |
| | | | Deformación | 560 | | | |
| 100 | 1 planta | Ensayo No.15 | Carga Max | 470 | 361.47 | 2.61 | - |
| | | | Deformación | 760 | | | |
| 200 | 1 planta | Ensayo No.15 | Carga Max | 1250 | 360.18 | 3.33 | - |
| | | | Deformación | 785 | | | |
| 50 | 1 planta | Ensayo No.16 | Carga Max | 580 | 350.92 | 3.07 | - |
| | | | Deformación | 970 | | | |
| 100 | 1 planta | Ensayo No.16 | Carga Max | 580 | 360.46 | 3.32 | - |
| | | | Deformación | 780 | | | |
| 200 | 1 planta | Ensayo No.16 | Carga Max | 1400 | 368.03 | 3.44 | - |
| | | | Deformación | 630 | | | |
| 50 | 1 planta | Ensayo No.17 | Carga Max | 760 | 351.63 | 3.61 | - |
| | | | Deformación | 950 | | | |
| 100 | 1 planta | Ensayo No.17 | Carga Max | 740 | 354.09 | 2.49 | - |
| | | | Deformación | 900 | | | |
| 200 | 1 planta | Ensayo No.17 | Carga Max | 1150 | 360.38 | 3.79 | - |
| | | | Deformación | 790 | | | |
| 50 | 1 planta | Ensayo No.18 | Carga Max | 700 | 350.35 | 3.31 | - |
| | | | Deformación | 980 | | | |
| 100 | 1 planta | Ensayo No.18 | Carga Max | 480 | 351.36 | 4.17 | - |
| | | | Deformación | 960 | | | |
| 200 | 1 planta | Ensayo No.18 | Carga Max | 1050 | 354.28 | 2.56 | - |
| | | | Deformación | 900 | | | |
| 50 | 1 planta | Ensayo No.19 | Carga Max | 600 | 365.47 | 3.30 | - |
| | | | Deformación | 680 | | | |
| 100 | 1 planta | Ensayo No.19 | Carga Max | 640 | 349.77 | 3.97 | - |
| | | | Deformación | 990 | | | |
| 200 | 1 planta | Ensayo No.19 | Carga Max | 950 | 360.08 | 2.84 | - |
| | | | Deformación | 790 | | | |

Se clasifican los resultados teniendo en cuenta el esfuerzo vertical aplicado, el porcentaje de raíces existente en cada muestra y el esfuerzo cortante requerido para llegar a la falla (*tabla 11.A, tabla 11.B, tabla 11.C*).

Tabla 11. Relación Área raíz (Ar) / Área suelo (As), Esfuerzo cortante, tablas A, B, C

Tabla 11.A

| No. | σ_v | Raíces | τ |
|-----|--------------------|--------|--------------------|
| | Kg/cm ² | % | Kg/cm ² |
| 1 | 0.125 | - | 0.65 |
| 2 | | - | 0.28 |
| 3 | | 0.47 | 0.63 |
| 4 | | 1.12 | 1.66 |
| 5 | | 0.86 | 1.67 |
| 6 | | 0.80 | 0.62 |
| 7 | | 0.80 | 0.62 |
| 10 | | 4.16 | 1.76 |
| 11 | | 3.36 | 1.73 |
| 12 | | 2.46 | 1.95 |
| 13 | | 2.59 | 1.75 |
| 14 | | 3.30 | 1.80 |
| 15 | | 3.17 | 1.72 |
| 16 | | 3.07 | 1.65 |
| 17 | | 3.61 | 2.16 |
| 18 | | 3.31 | 2.00 |
| 19 | | 3.30 | 1.64 |

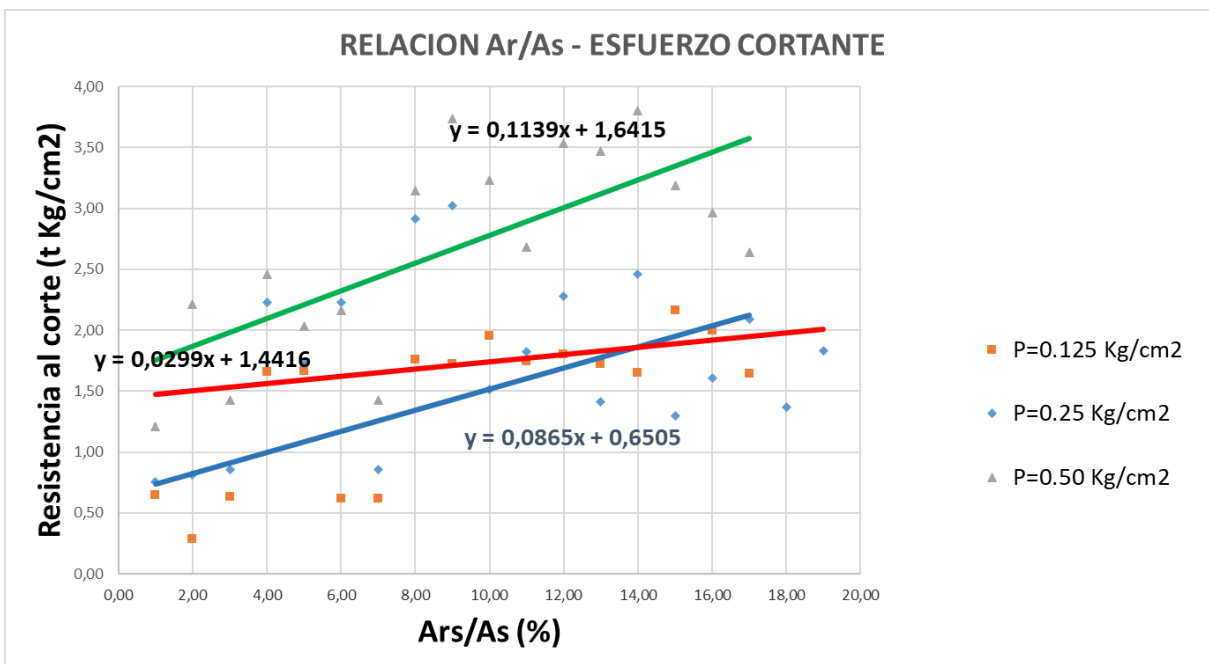
Tabla 11.B

| No. | σ_v | Raíces | τ |
|-----|--------------------|--------|--------------------|
| | Kg/cm ² | % | Kg/cm ² |
| 1 | 0.25 | - | 0.75 |
| 2 | | - | 0.82 |
| 3 | | 0.30 | 0.85 |
| 4 | | 1.30 | 2.23 |
| 5 | | 0.82 | 1.72 |
| 6 | | 0.69 | 2.23 |
| 7 | | 0.46 | 0.85 |
| 8 | | 0.74 | 2.91 |
| 9 | | 0.92 | 3.02 |
| 10 | | 3.11 | 1.51 |
| 11 | | 4.56 | 1.82 |
| 12 | | 2.23 | 2.28 |
| 13 | | 3.17 | 1.41 |
| 14 | | 2.18 | 2.46 |
| 15 | | 2.61 | 1.30 |
| 16 | | 3.32 | 1.61 |
| 17 | | 2.49 | 2.09 |
| 18 | | 4.17 | 1.37 |
| 19 | | 3.97 | 1.83 |

Tabla 11.C

| No. | σ_v | Raíces | τ |
|-----|--------------------|--------|--------------------|
| | Kg/cm ² | % | Kg/cm ² |
| 1 | 0.50 | - | 1.21 |
| 2 | | - | 2.22 |
| 3 | | 0.36 | 1.43 |
| 4 | | 0.72 | 2.46 |
| 5 | | 0.60 | 2.04 |
| 6 | | 0.97 | 2.16 |
| 7 | | 0.30 | 1.43 |
| 10 | | 3.74 | 3.14 |
| 11 | | 4.10 | 3.74 |
| 12 | | 4.26 | 3.23 |
| 13 | | 4.84 | 2.68 |
| 14 | | 4.25 | 3.54 |
| 15 | | 3.33 | 3.47 |
| 16 | | 3.44 | 3.80 |
| 17 | | 3.79 | 3.19 |
| 18 | | 2.56 | 2.96 |
| 19 | | 2.84 | 2.64 |

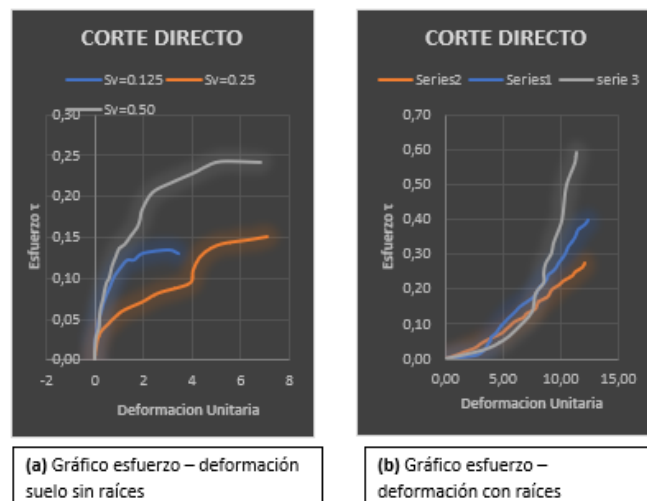
Figura 27. Relación AR/A Esfuerzo cortante



Los esfuerzos de corte se incrementan en relación directa con el aumento de AR/AS. En la (tabla 11.C) de esfuerzo vertical $\sigma_v = 0.50 \text{ kg/cm}^2$, se observa que el área de ocupación de raíces es mayor que las demás (tabla (11.A), tabla (11.B)), lo cual muestra en la figura 27 (Relación AR/AS - esfuerzo cortante), un incremento en la resistencia al corte. (ver línea verde).

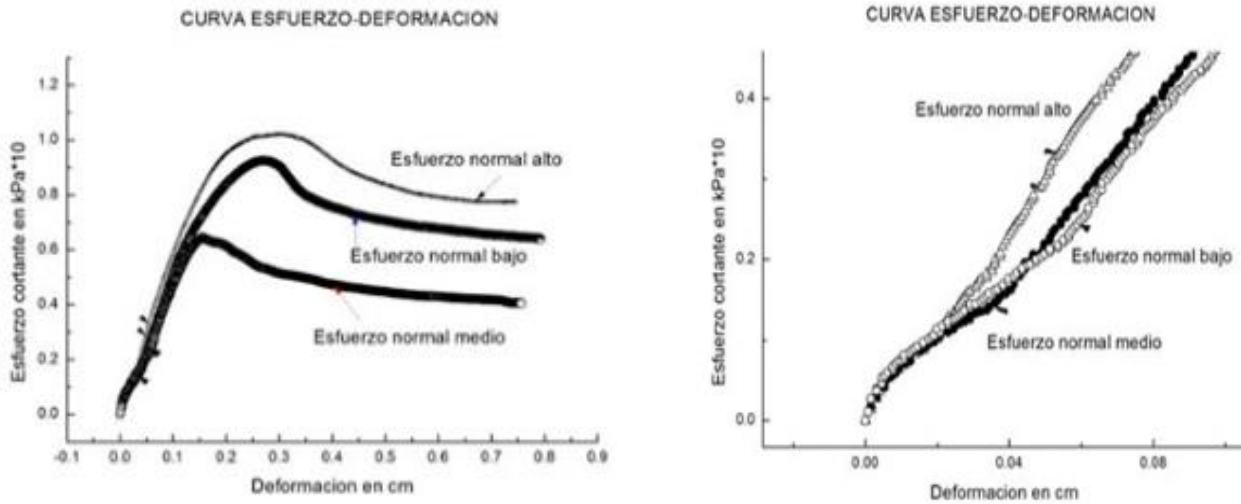
Es importante tener en cuenta, el comportamiento de las gráficas esfuerzo – deformación unitaria (figura 28), debido a que estas pueden dar indicios sobre un aporte de las raíces al suelo.

Figura 28. Corte directo



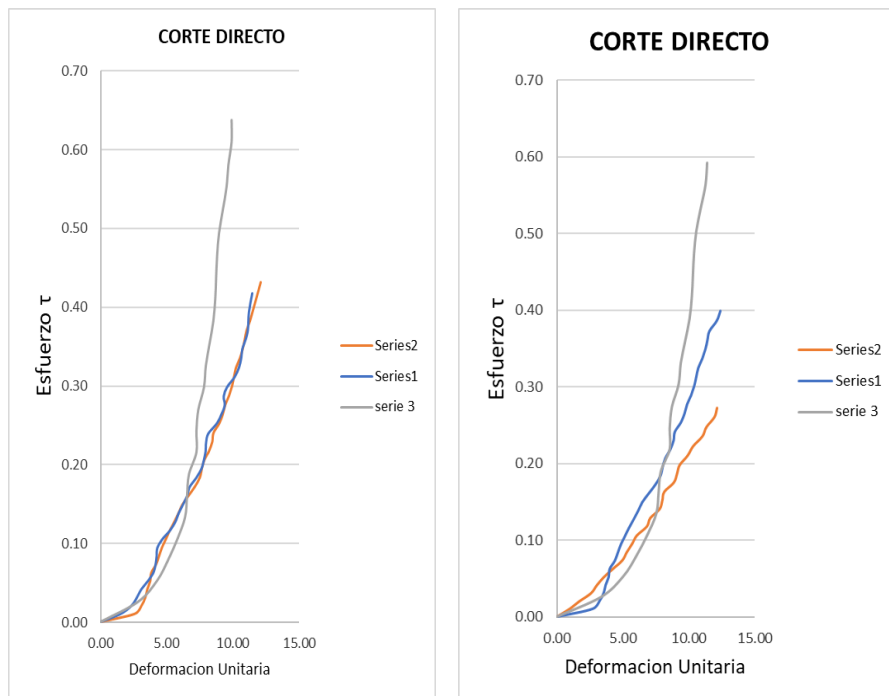
En la figura 28, en los gráficos (a. Gráfico esfuerzo – deformación suelo sin raíces) y (b. gráfico esfuerzo – deformación con raíces), se observa que en (a) las curvas que se generaron siguen el comportamiento típico de una curva esfuerzo deformación, donde la deformación aumenta de manera proporcional con relación a la carga, se presenta una alta linealidad a muy bajas deformaciones independiente del nivel de esfuerzo normal aplicado (Véase figura 29. Curva típica de esfuerzo – deformación para la arcilla alófana). En (b) se observa un comportamiento diferente, ya que, a bajas deformaciones, el suelo muestra una alta linealidad independiente del nivel de esfuerzos normales aplicados (Véase Figura 29. Comportamiento lineal a bajas deformaciones).

Figura 29. Curva esfuerzo de formación



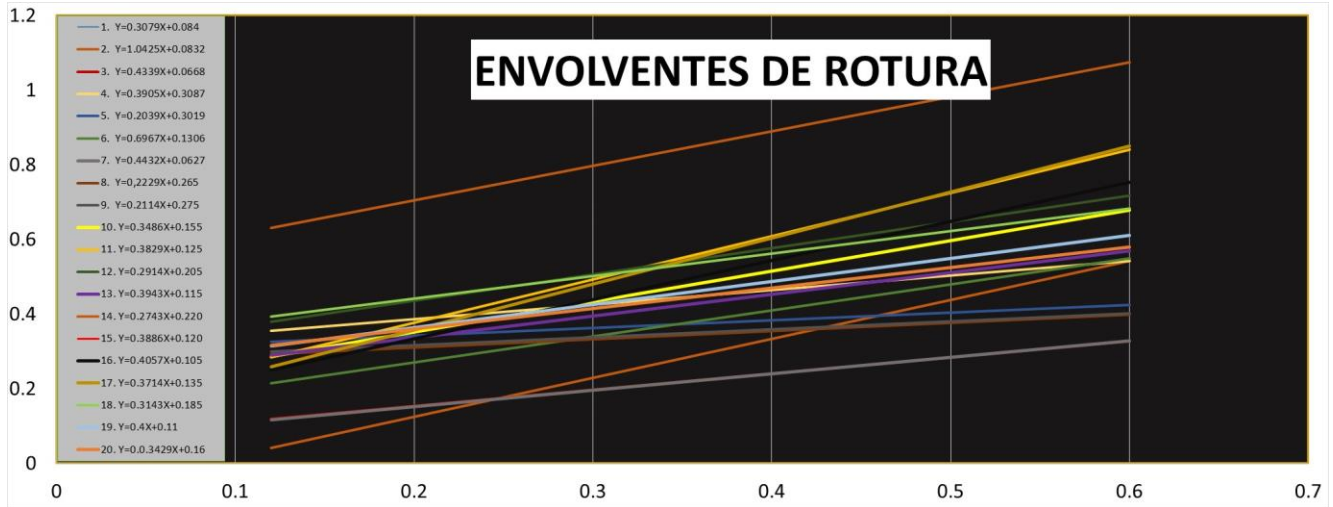
Fuente: Gómez (2011) Resistencia al corte de cenizas de origen volcánico considerando su anisotropía inherente

Figura 30. Corte directo



Como ejemplo se observa en la figura 30 el comportamiento de las gráficas, esfuerzo – deformación de los ensayos 18 y 19 realizados para el estudio, importante mencionar que se citan estos, pero en su totalidad se realizaron 20 ensayos, donde se observa un comportamiento lineal a bajas deformaciones.

Figura 31. Envoltentes de rotura



Esta gráfica, es resultado de los ensayos realizados, donde se graficó cada una de las ecuaciones derivadas de las líneas de tendencia -envolvente de rotura- con el fin de determinar cuál es el comportamiento generado por cada una de estas y concluir que este aumento es consecuencia del incremento del área de ocupación de raíces de las muestras ensayadas.

Tabla 12. Tendencia - envolvente de rotura

| No . Ensayo | C | ϕ | % Raices | | |
|----------------|--------|-------|----------|------|------|
| | Kg/cm2 | | | | |
| 1 | 0.08 | 21,4° | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0.08 | 48,4° | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0.07 | 26,6° | 0.47 | 0.3 | 0.36 |
| 4 | 0.31 | 35° | 1.12 | 1.3 | 0.72 |
| 5 | 0.3 | 26,8° | 0.86 | 0.82 | 0.6 |
| 6 | 0.13 | 37,3° | 0.8 | 0.69 | 0.97 |
| 7 | 0.06 | 26,8° | 0.8 | 0.46 | 0.3 |
| 8 | 0.27 | 26° | 0.8 | 0.75 | 0.3 |
| 9 | 0.28 | 25,9° | 0.8 | 0.92 | 0.3 |
| 10 | 0.19 | 45,2° | 3.11 | 4.16 | 3.74 |
| 11 | 0.15 | 52,5° | 3.36 | 4.56 | 4.1 |
| 12 | 0.3 | 44,9° | 2.23 | 2.26 | 4.26 |
| 13 | 0.22 | 38,8° | 2.59 | 3.17 | 4.84 |
| 14 | 0.25 | 49,6° | 2.18 | 3.3 | 4.25 |
| 16 | 0.13 | 49,5° | 2.61 | 3.17 | 3.33 |
| 17 | 0.11 | 53,4° | 3.07 | 3.32 | 3.44 |
| 18 | 0.32 | 42,8° | 2.49 | 3.61 | 3.79 |
| 19 | 0.24 | 40,6° | 3.31 | 4.17 | 2.56 |
| 20 | 0.25 | 38,6° | 3.97 | 3.3 | 2.84 |

La tabla 12 se evidencia que las muestras estudiadas con mayor área de ocupación de raíces, presentan los mayores valores de ángulos de fricción.

Después de realizar los ensayos de tensión a una cantidad representativa de fibras obtenidas de la raíz del vetiver, se pudo observar un muy buen desempeño de estas, mostrando mejores resultados en las fibras de menor diámetro (Tabla 14. Resistencia a la tensión).

Tabla 13. 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. | Alamos | 5-38* |
| Alnus sp. | Alisos | 4-74* |
| Pseudotsuga sp. | Abeto de Douglas | 19-61* |
| Acer sacharinum | Arce plateado | 15-30* |
| Tsuga heterophylla | Cicuta del oeste | 27* |
| Vaccinum sp. | Gaylussacia | 16* |
| Hordeum vulgare | Cebada | 15-31* |
| ---- | Zacate, hierbas | 2-20* |
| ---- | Musgo | 0.002-0.007* |
| Vetiveria zizanioides | Pasto vetiver | 40-120** |

Fuente: Wu (1995)

De igual forma estos datos obtenidos fueron comparados con resultados presentados sobre la resistencia a la tensión de otras plantas incluido el mismo vetiver, mostrando una diferencia significativa de los ensayos realizados con respecto a estos.

Tabla 14. Resistencia a la tensión.

| No. | d1 mm | d2 mm | d3 mm | dpro mm | dprom cm | T (Lb) | T (kg) | AREA cm2 | σ Esfuerzo de tensión Kg/cm2 | σ Esfuerzo de tensión MPa | σ Esfuerzo de tensión MPa grupo 1 d(0,00-0,05 cm) | σ Esfuerzo de tensión MPa grupo 2 d(0,05-0,1) | σ Esfuerzo de tensión MPa grupo 3 d(0,1-0,15) |
|-----|-------|-------|-------|---------|----------|---------|--------|-------------|------------------------------|---------------------------|---|---|---|
| 1 | 1,25 | 1,28 | 1,21 | 1,25 | 0,125 | 14,0 | 7,00 | 0,012271875 | 570,4099822 | 57,04 | | | 57,04 |
| 2 | 1,15 | 1,19 | 1,07 | 1,14 | 0,114 | 10,0 | 5,00 | 0,010207058 | 489,8570973 | 48,99 | | | 48,99 |
| 3 | 0,87 | 0,78 | 0,99 | 0,88 | 0,088 | 6,0 | 3,00 | 0,006082138 | 493,2476371 | 49,32 | | 49,32 | |
| 4 | 0,97 | 1,01 | 1,07 | 1,02 | 0,102 | 14,0 | 7,00 | 0,008171302 | 856,6566678 | 85,67 | | | 85,67 |
| 5 | 0,88 | 0,85 | 0,97 | 0,9 | 0,09 | 10,0 | 5,00 | 0,006361740 | 785,9484984 | 78,59 | | 78,59 | |
| 6 | 1,27 | 1,32 | 1,21 | 1,27 | 0,127 | 14,0 | 7,00 | 0,012667717 | 552,5857754 | 55,26 | | | 55,26 |
| 7 | 0,77 | 0,95 | 0,67 | 0,8 | 0,08 | 8,0 | 4,00 | 0,005026560 | 795,7728546 | 79,58 | | 79,58 | |
| 8 | 0,97 | 0,82 | 0,91 | 0,9 | 0,09 | 10,0 | 5,00 | 0,006361740 | 785,9484984 | 78,59 | | 78,59 | |
| 9 | 1,4 | 1,25 | 1,21 | 1,29 | 0,129 | 10,0 | 5,00 | 0,013069841 | 382,5601128 | 38,26 | | | 38,26 |
| 10 | 1,18 | 1,23 | 1,16 | 1,19 | 0,119 | 6,0 | 3,00 | 0,011122049 | 269,734461 | 26,97 | | | 26,97 |
| 11 | 1,15 | 1,26 | 1,01 | 1,14 | 0,114 | 7,0 | 3,50 | 0,010207058 | 342,8999681 | 34,29 | | | 34,29 |
| 12 | 1,29 | 1,25 | 1,31 | 1,28 | 0,128 | 8,0 | 4,00 | 0,012867994 | 310,8487713 | 31,08 | | | 31,08 |
| 13 | 1,05 | 1,01 | 0,9 | 0,99 | 0,099 | 8,0 | 4,00 | 0,007697705 | 519,6353708 | 51,96 | | 51,96 | |
| 14 | 1,29 | 1,27 | 1,39 | 1,32 | 0,132 | 10,0 | 5,00 | 0,013684810 | 365,3686201 | 36,54 | | | 36,54 |
| 15 | 1,21 | 1,25 | 1,21 | 1,22 | 0,122 | 10,0 | 5,00 | 0,011689894 | 427,7198896 | 42,77 | | | 42,77 |
| 16 | 0,64 | 0,57 | 1,73 | 0,98 | 0,098 | 8,0 | 4,00 | 0,007542982 | 530,2942804 | 53,03 | | 53,03 | |
| 17 | 0,86 | 0,87 | 0,95 | 0,89 | 0,089 | 14,0 | 7,00 | 0,006221153 | 1125,19328 | 112,52 | | 112,52 | |
| 18 | 1,52 | 1,03 | 1,16 | 1,24 | 0,124 | 10,0 | 5,00 | 0,012076310 | 414,0337433 | 41,40 | | | 41,40 |
| 19 | 0,8 | 1,04 | 0,97 | 0,94 | 0,094 | 8,0 | 4,00 | 0,006939794 | 576,3859517 | 57,64 | | 57,64 | |
| 20 | 0,76 | 0,86 | 1,03 | 0,88 | 0,088 | 9,0 | 4,50 | 0,006082138 | 739,8714557 | 73,99 | | 73,99 | |
| 21 | 0,4 | 0,51 | 0,59 | 0,5 | 0,05 | 9,0 | 4,50 | 0,001963500 | 2291,825821 | 229,18 | | 229,18 | |
| 22 | 1,05 | 1,04 | 1,16 | 1,08 | 0,108 | 8,0 | 4,00 | 0,009160906 | 436,6380546 | 43,66 | | | 43,66 |
| 23 | 0,92 | 0,91 | 1,09 | 0,97 | 0,097 | 9,0 | 4,50 | 0,007389829 | 608,9451114 | 60,89 | | 60,89 | |
| 24 | 0,48 | 0,65 | 0,73 | 0,62 | 0,062 | 8,0 | 4,00 | 0,003019078 | 1324,907979 | 132,49 | | 132,49 | |
| 25 | 0,64 | 0,62 | 0,8 | 0,69 | 0,069 | 9,0 | 4,50 | 0,003739289 | 1203,437209 | 120,34 | | 120,34 | |
| 26 | 0,35 | 0,32 | 1,00 | 0,56 | 0,056 | 9,00 | 4,50 | 0,002463014 | 1827,029513 | 182,70 | | 182,70 | |
| 27 | 0,74 | 0,61 | 0,62 | 0,66 | 0,066 | 8,00 | 4,00 | 0,003421202 | 1169,179584 | 116,92 | | 116,92 | |
| 28 | 0,37 | 0,33 | 0,57 | 0,42 | 0,042 | 6,00 | 3,00 | 0,001385446 | 2165,368312 | 216,54 | 216,54 | | |
| 29 | 0,53 | 0,40 | 0,32 | 0,42 | 0,042 | 10,00 | 5,00 | 0,001385446 | 3608,947186 | 360,89 | 360,89 | | |
| 30 | 0,56 | 0,47 | 0,20 | 0,41 | 0,041 | 8,00 | 4,00 | 0,001320257 | 3029,712236 | 302,97 | 302,97 | | |
| 31 | 0,80 | 1,04 | 0,97 | 0,94 | 0,094 | 8,00 | 4,00 | 0,006939794 | 576,3859517 | 57,64 | | 57,64 | |
| 32 | 0,90 | 0,91 | 1,09 | 0,97 | 0,097 | 8,00 | 4,00 | 0,007389829 | 541,2845435 | 54,13 | | 54,13 | |
| 33 | 1,00 | 1,04 | 1,16 | 1,07 | 0,107 | 8,00 | 4,00 | 0,008992045 | 444,8376513 | 44,48 | | | 44,48 |
| 34 | 1,10 | 1,26 | 1,01 | 1,12 | 0,112 | 8,00 | 4,00 | 0,009852058 | 406,0065585 | 40,60 | | | 40,60 |
| 35 | 1,20 | 1,25 | 1,21 | 1,22 | 0,122 | 14,00 | 7,00 | 0,011689894 | 598,8078454 | 59,88 | | | 59,88 |
| 36 | 1,30 | 1,32 | 1,21 | 1,28 | 0,128 | 14,00 | 7,00 | 0,012867994 | 543,9853498 | 54,40 | | | 54,40 |
| 37 | 1,40 | 1,25 | 1,21 | 1,29 | 0,129 | 14,00 | 7,00 | 0,013069841 | 535,5841579 | 53,56 | | | 53,56 |
| 38 | 1,50 | 1,03 | 1,16 | 1,23 | 0,123 | 10,00 | 5,00 | 0,011882317 | 420,7933662 | 42,08 | | | 42,08 |
| 39 | 1,60 | 1,12 | 1,59 | 1,44 | 0,144 | 13,00 | 6,50 | 0,016286054 | 399,1144718 | 39,91 | | | 39,91 |
| 40 | 1,70 | 1,22 | 1,14 | 1,35 | 0,135 | 12,00 | 6,00 | 0,014313915 | 419,1725325 | 41,92 | | | 41,92 |
| 41 | 1,80 | 1,23 | 1,03 | 1,35 | 0,135 | 12,00 | 6,00 | 0,014313915 | 419,1725325 | 41,92 | | | 41,92 |
| 42 | 1,90 | 1,32 | 1,33 | 1,52 | 0,152 | 14,00 | 7,00 | 0,018145882 | 385,7624641 | 38,58 | | | 38,58 |
| 43 | 2,00 | 1,15 | 1,09 | 1,41 | 0,141 | 14,00 | 7,00 | 0,015614537 | 448,3001847 | 44,83 | | | 44,83 |
| 44 | 2,10 | 1,37 | 1,39 | 1,62 | 0,162 | 14,00 | 7,00 | 0,020612038 | 339,6073758 | 33,96 | | | 33,96 |
| 45 | 2,20 | 1,27 | 1,22 | 1,56 | 0,156 | 14,00 | 7,00 | 0,019113494 | 366,2333979 | 36,62 | | | 36,62 |
| 46 | 1,19 | 0,69 | 1,65 | 1,18 | 0,118 | 6,00 | 3,00 | 0,010935910 | 274,3256034 | 27,43 | | | 27,43 |
| 47 | 1,14 | 0,87 | 0,95 | 0,99 | 0,099 | 8,00 | 4,00 | 0,007697705 | 519,6353708 | 51,96 | | 51,96 | |
| 48 | 1,31 | 1,09 | 1,17 | 1,19 | 0,119 | 6,00 | 3,00 | 0,011122049 | 269,734461 | 26,97 | | | 26,97 |
| 49 | 1,07 | 1,05 | 0,99 | 1,04 | 0,104 | 7,00 | 3,50 | 0,008494886 | 412,0125726 | 41,20 | | | 41,20 |
| 50 | 1,26 | 0,87 | 1,05 | 1,06 | 0,106 | 7,00 | 3,50 | 0,008824754 | 396,6116043 | 39,66 | | | 39,66 |
| 51 | 1,19 | 0,72 | 0,59 | 0,83 | 0,083 | 8,00 | 4,00 | 0,005410621 | 739,286728 | 73,93 | | 73,93 | |
| 52 | 0,68 | 1,11 | 1,19 | 0,99 | 0,099 | 8,00 | 4,00 | 0,007697705 | 519,6353708 | 51,96 | | 51,96 | |
| 53 | 0,87 | 0,98 | 1,09 | 0,98 | 0,098 | 8,00 | 4,00 | 0,007542982 | 530,2942804 | 53,03 | | 53,03 | |
| 54 | 1,52 | 0,73 | 0,98 | 1,08 | 0,108 | 7,00 | 3,50 | 0,009160906 | 382,0582978 | 38,21 | | | 38,21 |
| 55 | 0,83 | 0,75 | 0,84 | 0,81 | 0,081 | 8,00 | 4,00 | 0,005153009 | 776,2454305 | 77,62 | | 77,62 | |
| 56 | 0,7 | 0,59 | 0,99 | 0,76 | 0,076 | 7,00 | 3,50 | 0,004536470 | 771,5249283 | 77,15 | | 77,15 | |
| 57 | 0,39 | 0,59 | 0,62 | 0,53 | 0,053 | 9,00 | 4,50 | 0,002206189 | 2039,716822 | 203,97 | | 203,97 | |
| 58 | 1,09 | 0,84 | 0,68 | 0,87 | 0,087 | 13,00 | 6,50 | 0,005944693 | 1093,412299 | 109,34 | | 109,34 | |
| 59 | 0,98 | 0,85 | 0,69 | 0,84 | 0,084 | 9,00 | 4,50 | 0,005541782 | 812,0131169 | 81,20 | | 81,20 | |
| 60 | 0,73 | 0,72 | 0,74 | 0,73 | 0,073 | 6,00 | 3,00 | 0,004185397 | 716,7779512 | 71,68 | | 71,68 | |

CONCLUSIONES

En este estudio sobre resistencia mecánica de la raíz del vetiver y su interacción con suelos de ceniza volcánica para estabilización de suelos, se puede concluir que:

La raíz del vetiver es una alternativa para la estabilización de los suelos derivados de cenizas volcánicas, ya que en los análisis realizados tanto en corte de suelo – raíz y tensión de raíz, mostraron un gran desempeño en su resistencia, mostrando diferencias significativas entre las muestras ensayadas con y sin fibras de raíces.

Las especies sembradas en el terreno, permitieron demostrar que la planta tiene una adherencia al suelo mayor que las sembradas en los cajones de muestra, esto debido a las características de la raíz, las cuales presentaron mayor desarrollo en profundidad y expansión, por ende mayor ocupación de área de raíz en zona de corte.

Cuando se representa la variación de la cohesión y del ángulo de fricción interna, en función del RAR (Tabla 15), se observa que estos parámetros se incrementan de forma lineal conforme aumenta la densidad de raíces.

Los resultados de estos ensayos muestran que el suelo sin raíces presenta parámetros de cohesión y ángulo de fricción más bajos que los obtenidos con el suelo reforzado con raíces. El sistema suelo-vetiver, exhibe un incremento significativo en sus propiedades, aumentando C y ϕ significativamente.

Los resultados muestran que el desarrollo del sistema radicular del pasto vetiver aumenta considerablemente la resistencia al corte, este incremento se ve reflejado tanto en la cohesión como en el ángulo de fricción interna.

La variación de cohesión se encuentra entre 0,08 kg/cm² y 0,32 kg/cm², por su parte para el ángulo de fricción interna los incrementos oscilan entre 21,4° y 53,4°. Resulta evidente

que un suelo con presencia de raíces de vetiver aumenta sus parámetros mecánicos de cohesión y ángulo de fricción

Tabla 16. Tendencia - envolvente de rotura Vs. % Raíces

| No . Ensayo | C | ϕ | % Raíces | | |
|----------------|----------|--------|----------|------|------|
| | Kg/cm2 | | | | |
| 1 | 0.08 | 21,4° | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0.08 | 48,4° | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0.07 | 26,6° | 0.47 | 0.3 | 0.36 |
| 4 | 0.31 | 35° | 1.12 | 1.3 | 0.72 |
| 5 | 0.3 | 26,8° | 0.86 | 0.82 | 0.6 |
| 6 | 0.13 | 37,3° | 0.8 | 0.69 | 0.97 |
| 7 | 0.06 | 26,8° | 0.8 | 0.46 | 0.3 |
| 8 | 0.27 | 26° | 0.8 | 0.75 | 0.3 |
| 9 | 0.28 | 25,9° | 0.8 | 0.92 | 0.3 |
| 10 | 0.19 | 45,2° | 3.11 | 4.16 | 3.74 |
| 11 | 0.15 | 52,5° | 3.36 | 4.56 | 4.1 |
| 12 | 0.3 | 44,9° | 2.23 | 2.26 | 4.26 |
| 13 | 0.22 | 38,8° | 2.59 | 3.17 | 4.84 |
| 14 | 0.25 | 49,6° | 2.18 | 3.3 | 4.25 |
| 16 | 0.13 | 49,5° | 2.61 | 3.17 | 3.33 |
| 17 | 0.11 | 53,4° | 3.07 | 3.32 | 3.44 |
| 18 | 0.32 | 42,8° | 2.49 | 3.61 | 3.79 |
| 19 | 0.24 | 40,6° | 3.31 | 4.17 | 2.56 |
| 20 | 0.25 | 38,6° | 3.97 | 3.3 | 2.84 |

Los incrementos en las propiedades resistentes de un suelo, guardan una estrecha relación con la cantidad de raíces presentes en el plano de falla. Es difícil asegurar que la resistencia medida corresponde a la resistencia máxima ya que sólo se apreciaron desgarros y deslizamientos en las raíces.

En cuanto a los ensayos realizados referentes a tensión de raíz se pudo observar después de 60 ensayos realizados en diferentes diámetros de raíces que las de menor diámetro muestran una resistencia superior con respecto a las de mayor diámetro.

Referencias Bibliográficas

- Aysalla J. (2017). Estudio de la capacidad de la especie Vetiver (*Vetiveria zizanioides*) en la acumulación de metales pesados en la siembra hidropónica con agua del canal de riego Latacunga – Salcedo – Ambato. Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero en Medio Ambiente. Universidad Técnica de Cotopaxi. Latacunga – Ecuador.
- Boris E. (2018). Evaluación Del Rendimiento Y Calidad Del Aceite Esencial De Las Raíces De Vetiver (*Vetiveria zizanioides* Stapf), Cultivado En Guatemala, A Escala Laboratorio. Trabajo de graduación para optar al título de Ingeniería Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Disponible en: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/11609/1/Boris%20Rafael%20El%20C3%ADAs%20Lucas.pdf>
- Brochero M., y León C. (2020). Modelación física de las raíces en centrifuga Geotécnica: Resistencia mecánica y leyes de escala. Trabajo de investigación para optar al énfasis en Geotecnia. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá – Colombia.
- Campos P., y León M. (2017). Evaluación Del Pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) Para La Estabilización De Un Suelo Erosionado En La Finca El Limonar, Vereda Alto De La Palma, Melgar (Tolima). Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Ambiental. Universidad de Cundinamarca.
- Cuji J. (2017). Evaluación del Vetiver (*Vetiveria zizanioides*) para la Disminución de Metales Pesados (Cd, Pb) en el Canal de Riego Latacunga – Salcedo – Ambato en el Sector Samanga. Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero en Medio Ambiente. Universidad Técnica de Cotopaxi. Latacunga – Ecuador.
- Domínguez R., León M., Samaniego J., y Sunkel O. (2019). Recursos naturales, medio ambiente y sostenibilidad. 70 años de pensamiento de la CEPAL. Libros CEPAL. Naciones Unidas.
- Jiménez E., y Vargas S., (2015). Evaluación De La Eficiencia Del Pasto Vetiver Para La Fitorremediación De Las Aguas Superficiales Del Caño Cola De Pato Ubicado En El Sector Rural Del Municipio De Acacias Departamento Del Meta. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Ambiental. Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD. Meta – Colombia.
- Lindinez T., y Cubides E. (2018). Eficiencia del pasto vetiver (*chrysopogon zizanioides*) en la remoción de metales pesados de los lixiviados del relleno sanitario La Guaratara del municipio de Granada – Meta. Trabajo de grado para optar por el título de Tecnólogo en Saneamiento Ambiental. Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD. Meta – Colombia.

- López A. (2020). Estado Del Conocimiento Sobre El Uso De La Bioingeniería En Procesos Erosivos En Colombia. Trabajo De Grado Presentado Como Requisito Para Obtener El Título De Ingeniero Civil. Universidad Militar Nueva Granada.
- Matías S. (2017). Evaluación de estabilidad y permeabilidad de talud con sistema Vetiver mediante diferentes ensayos de laboratorio y campo. Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería civil. Universidad del Valle de Guatemala.
- Mejía P., Macías M., Velázquez S., y Alvarado M. (2019). Bioacumulación de Pb, Hg y As in vitro en pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*). Revista de Biotecnología y Sustentabilidad Vol. 4. Num. 1. Disponible en: <https://revistas.uaz.edu.mx/index.php/biotecnologiaysust/article/download/703/662/>
- Méndez L., Rojas W., Torres J., Torres R., Rada M., y Calderas R. (2015). Resistencia a la tracción del sistema radicular del vetiver (*vetiveria zizanioides*) plantado en un suelo granular. Geominas, Vol. 42, N° 64.
- Miranda R. (2016). Revisión Panorámica del uso del Pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en Restauración de Taludes como Técnica de Bioingeniería del Suelo. Trabajo presentado como requisito para optar al título de Magister en Ciencias Ambientales. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá – Colombia.
- Orihuela J. (2017). Manual Sobre El Uso Y Manejo Del Pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*). Organización Panamericana de la Salud.
- Ponce R. (2020). Evaluación Del Potencial De Vetiver *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash. Para Establecerse En Suelos De Zonas Mineras En Madre De Dios. Tesis para optar al título de profesional Ingeniería Forestal y Medio Ambiente. Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.
- Ramírez F. (2019). Uso De Bioingeniería En Suelos Que Han Sido Afectados Por Procesos Erosivos En Canteras En Los Cerros Orientales De La Ciudad De Bogotá En El Sector De Usaquén. Trabajo de grado para optar al título de Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Universidad de Manizales. Manizales – Colombia.
- Rodríguez C. (2019). Estudio Comparativo De Las Metodologías Constructivas Empleadas En La Cimentación De Edificaciones En Altura: The Bahia Grand Panama (Panamá) Y La Torre Bd Bacatá (Colombia). Trabajo de grado Monografía. Universidad Católica De Colombia.
- Sánchez J. (2019). Estabilización de taludes mediante la técnica de bioingeniería con cultivo de pastos vetiver en zonas tropicales, año 2019. Trabajo para optar el título de profesional de Ingeniería Civil. Universidad Continental.

- Sánchez S. y Oviedo S. (2019). Control de la Erosión de Taludes Mediante el uso de Vetiver y Micorrizas Arbusculares, Zona de Soceagro en el Municipio de Villavicencio – Meta. Universidad Santo Tomas.
- Sangalli P., y Valenzuela M. (2016). Bioingeniería o Ingeniería Biológica. Introducción a la Bioingeniería o Ingeniería Biológica. AEIP Asociación Española de Ingeniería del Paisaje, Montesol Donostia/San Sebastián (España). Disponible en: <https://docplayer.es/storage/80/81504232/81504232.pdf>.
- Torres J., Torres R., Belandria N., Barreto W., Picón R., Peña M, Guarache J., y Méndez L. (2019). Estudio de la variación en la resistencia al esfuerzo cortante en arenas mal gradadas producto de la plantación de vetiver. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia. Volumen Especial, No. 1. Maracaibo – Venezuela.
- Torres J., Torres R., Peña J., Picón R., Méndez L., Calderas R. (2020). Estudio experimental del sistema radicular del pasto vetiver sometido a esfuerzos de tracción. Informes de la Construcción, 72(560): e365. <https://doi.org/10.3989/ic.70923>.
- Truong P. y Truong N. (2016). Computer Model For Treatment Of Small Volume Wastewater. TVNI Director for Asia and Oceanía.
- Valdés O., Jiménez Á., Servín A., y Andrade J. (2020). Ensayos de tensión y flexión en raíces de dos especies tropicales. Artículo Científico.
- Wellmann H. (2017). Análisis Para La Reducción De Riesgos Utilizando El Pasto Vetiver En El Talud Ubicado En El Parque Ecológico Las Ardillas. Trabajo de graduación para optar al título de Ingeniería Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Zeledón B. (2018). Susceptibilidad A La Licuefacción En El Delta Del Río Villalobos, Municipio De Villa Canales, Departamento De Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. Trabajo de graduación para optar al título de Magister en Ciencias en Ingeniería Geotécnica. Universidad de San Carlos de Guatemala.