

REVISIÓN PANORÁMICA DEL USO DEL PASTO VETIVER (*Chrysopogon zizanioides*) EN RESTAURACIÓN DE TALUDES COMO TÉCNICA DE BIOINGENIERÍA DEL SUELO

RICARDO MIRANDA MUÑOZ

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES
BOGOTÁ D.C.
2016

REVISIÓN PANORÁMICA DEL USO DEL PASTO VETIVER (*Chrysopogon zizanioides*) EN RESTAURACIÓN DE TALUDES COMO TECNICA DE BIOINGENIERIA DEL SUELO

Ricardo Miranda Muñoz
Biólogo Marino

Trabajo presentado como requisito para optar al título de
Magister en Ciencias Ambientales

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Directora: Dra. Grace Andrea Montoya Rojas
Agrólogo, Sp, MSc, Ph.D

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES
BOGOTÁ D.C.
2016

Agradecimientos

A mis padres Vicente Miranda y Esperanza por su apoyo incondicional, a mi mamá Marina quien desde el cielo me ha sabido guiar, a mis hermanos por creer en mis proyectos, mis tías que siempre están dando un consejo importante y mis compañeros de estudio, con quienes siempre se está aprendiendo algo nuevo.

Un especial agradecimiento a la doctora Grace Andrea Montoya Rojas quien con su profesionalismo y conocimiento por los suelos y el ambiente generó en mi mayor conocimiento por conocer de la temática en cuestión y supo servirme de tutora y apoyo incondicional para sacar adelante este documento.

Un especial agradecimiento a la empresa INGEOS SAS quien facilito el contrato para poder hacer la propuesta de restauración de taludes y a GreenTerra SAS, la compañía que tiene el proyecto de manejo de taludes erosionados y la cuál fue definitiva para poder hacer las dos visitas de campo y el levantamiento de información de dichas propuestas de restauración de taludes.

El Doctor Edilberto León Director de la Maestría en Ciencias Ambientales por haberme invitado a formar parte de dicho programa, por ser un notable maestro y referente de profesional y dedicación al estudio y la investigación y haber tenido la paciencia para permitirme desarrollar el escrito a finalidad.

A la Universidad Jorge Tadeo Lozano por ser el establecimiento que ha formado mi proyecto educativo durante toda la vida y ser el recinto académico que ha brindado de manera generosa la posibilidad de que estudiar allí este interesante programa de maestría.

Glosario

Bioingeniería: es una rama de la ingeniería que utiliza material vegetal vivo como un elemento de construcción, solo o combinado con materiales inertes como árboles, piedras, concreto, mallas, geo textil y otros, para hacer una restauración ambiental a largo plazo en el tiempo (Adaptado de Sangalli, P. s.f).

Biomortero: “es una técnica que consiste en aplicar una pasta con fibras naturales, polímeros, enmiendas orgánico-minerales, semillas, aglutinantes y cementante para proteger al terreno de la erosión laminar por efecto de la gota de lluvia y propiciar el desarrollo de vegetación rastrea entre líneas de vetiver luego ella se biodegrada incorporándose al suelo” (Vetivernet, 2016).

Cobertura vegetal: capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre, comprendiendo una amplia gama de biomásas con diferentes características fisionómicas y ambientales que van desde pastizales hasta las áreas cubiertas por bosques naturales. (Rincón Romero et al (2012), p. 2., en Nieto, O., L. Jiménez y Nieto, M. (2014))¹.

Degradación de suelos: proceso degenerativo que reduce la capacidad de desempeñar sus funciones: dar hábitat, aportar en ciclos de carbono, nitrógeno, azufre y fósforo, alimento, fuente de materias primas renovables y otros.

Deslizamiento: movimiento de una masa de roca, detritos o tierra pendiente abajo bajo la acción de la gravedad, cuando el esfuerzo de corte excede el esfuerzo de resistencia del material (Van Westen, C. (s.f.). Introducción a los deslizamientos. Tipos y causas)².

Erodabilidad del suelo: es la susceptibilidad que tiene un suelo a erosionarse, y dependiendo de su clasificación serán más propensos o menos a generar la erosión.

Erosión: desprendimiento, transporte y posterior depósito de materiales de suelo o roca por acción de la fuerza de un fluido en movimiento. La erosión puede ser generada tanto por el agua como por el viento.

Esqueje: fragmento de una planta parental, a partir de la cual se obtiene un nuevo ejemplar genéticamente idéntico a la parental.

¹ Rincón Romero et al., 2012, p. 2., en Nieto, O., L. Jiménez y Nieto, M. 2014. Variación de coberturas forestales y ocupación del territorio en el municipio de Armenia 1939-1999. Este escrito describe una variación en la cobertura vegetal de los suelos en Armenia entre los años citados mostrando los cambios y aumentos de la misma, dando un mejor manejo a los suelos.

² Van Westen, C. (s.f.). Introducción a los deslizamientos. Tipos y causas. Presentación gráfica, didáctica de los diversos tipos de movimientos de suelo.

Estabilización de taludes: acciones sobre un talud o ladera de montaña dirigidas a controlar movimientos en masa, deslizamientos y proveer sostén del terreno.

Estolón: rama rastrera que nace de la base del tallo de algunas plantas, con raíces que producen a su vez nuevas plántulas.

Escorrentía: proporción de agua que fluye o se desplaza libremente sobre la capa superficial del terreno. Es una de las responsables principales de la erosión de suelos.

Infiltración: introducción o penetración paulatina de un líquido entre los poros de un sólido. Proceso de paso del agua por las partículas de suelo y subsuelo.

Reptación: movimiento lento de los materiales móviles del suelo, cuya velocidad máxima no excede varios centímetros por día y se realiza en dirección de su pendiente.

Revegetalización: Restablecimiento de la cobertura vegetal en la que se emplean diversos biotipos, desde herbáceos y arbustivos hasta trepadoras y árboles. (Artículo 2 del Decreto Distrital 472 de 2003).

Rizoma: tallo subterráneo con varias yemas que crece de forma horizontal emitiendo raíces y brotes herbáceos desde sus nudos.

Silvo Pastoreo: El silvopastoreo es el resultado de la introducción o mejoramiento deliberado de forraje en un sistema de producción de maderas o productos forestales, o de otro modo, la introducción deliberada o mejoramiento de árboles en un sistema de producción de forrajes. Silvopastoreo como tal, es el manejo de árboles, ganado y pastos en un sistema integrado. (Sociedad Rural Salteña, 2016)

Suelo: es la parte más superficial de la corteza terrestre, biológicamente activa, conformada por minerales y partículas orgánicas producidas por la acción combinada del viento el agua y procesos de desintegración orgánica.

Talud: proviene del vocablo francés talus y llegó al castellano como talud. Se refiere a la pendiente que registra el paramento de una pared o de una superficie. Es cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal que adoptan las masas de tierra. Puede ser de origen natural o creado por el hombre.

Zona intertropical: área geográfica comprendida entre los trópicos de Cáncer y de Capricornio, dividida por el Ecuador en dos partes iguales. Se caracteriza por escasas variaciones de temperaturas a lo largo del año y es la zona más rica en recursos renovables y de mayor biodiversidad de especies vegetales a nivel mundial³.

³ Diccionario Enciclopédica Dominicano de Medio Ambiente. Término: Zona intertropical. Tomado de: <http://www.diccionariomedioambiente.org/diccionariomedioambiente/es/definicionVer.asp?id=780>

Resumen

Este documento busca determinar si una propuesta de montaje de pasto vetiver *Chrysopogon zizanioides* para control de taludes resulta ser la adecuada al hacer una revisión de casos prácticos en el mundo y en Colombia donde se comparan técnicas de ingeniería convencional y bioingeniería del suelo para restauración de taludes erosionados.

La idea principal del documento es la de establecer comparativamente las ventajas y desventajas del uso de este pasto como técnica de bioingeniería del suelo para control de taludes con relación a las técnicas de ingeniería civil tradicionales aplicadas para los mismo fines. Documentos estudiados demuestran esas diferencias, y también algunas características importantes como la fortaleza, la longitud y la unión en manjo de la raíz, resisten la presión de las partículas del suelo aumentando su cohesión y estabilizando los taludes además de comportarse de manera similar y en algunos casos mejor que estructuras de concreto y de hierro como son las puntillas de tierra (soil nails), ya que las raíces no se corroen y en cambio sí se fortalecen con el pasar de los años.

Se realizó una revisión bibliográfica del uso de la especie, las aplicaciones en técnicas de bioingeniería del suelo internacionalmente y el estado actual de su uso en Colombia haciendo una breve discusión crítica con recomendaciones acerca de que podría hacerse adicional a los documentos e investigaciones consultadas para darle la importancia y apoyo al uso de la especie de este pasto en la restauración de taludes en los diversos pisos térmicos de nuestra geografía.

Palabras clave: edafología, manejo de suelos, erosión, movimientos de masa, pasto vetiver, bioingeniería del suelo, paisaje.

Abstract

This document pretends to determine if a proposal for the implementation of the vetiver grass *Chrysopogon zizanioides* as a technique for slope control is adequate after reviewing a number of publications of practical cases around the world and in Colombia that compare civil engineering and bioengineering techniques in the stabilization of eroded slopes.

The main idea of this document is to establish a comparison of the advantages and disadvantages in the use of this grass as a bioengineering technique in slope control, comparing it to the civil engineering techniques applied for the same purposes. Several reviewed documents, demonstrate these differences as well as important characteristics such as root strength, root length and root bundle and how they resist the pressure of the soil particles, increasing their cohesion and stabilizing the slopes. Also they behave in a similar and in some cases in a much better way than concrete, and iron structures such as soil nails as the roots do not rust and get stronger with the passing of the years.

A bibliographical revision was made, related to the use of this type of grass, its applications in bioengineering techniques and the actual use given in Colombia. A critical discussion of the results found in the documents and recommendations with regards to the type of research and scientific papers that could be made and written in the country as to enhance the use and importance of the vetiver grass in the restoration of slopes in the different geographical places of our country.

Key words: edaphology, soil management, erosion, mass movements, vetiver.

Tabla de Contenidos

Glosario	4
Resumen	6
Abstract	7
Introducción	13
Capítulo 1. Planteamiento del problema	16
1.1 Objetivos	20
1.2 Justificación	20
1.3 Impacto	22
Capítulo 2. Fundamentación teórica	23
2.1 Antecedentes	23
2.1.1. ¿Cómo nace la bioingeniería de suelos?.....	26
2.1.2. ¿Cómo surge el nombre de la bioingeniería?.....	27
2.1.3. Historia de la bioingeniería en Europa y Estados Unidos.....	28
2.1.4. ¿Cómo llega la bioingeniería a Colombia?.....	29
2.1.5. ¿Cómo se ha utilizado el Pasto Vetiver en la historia?.....	32
2.1.6. Utilidad del pasto Vetiver en la Bioingeniería del Suelo.....	35
2.2 Marco conceptual	36
2.2.1 Tipos de suelos de las zonas tropicales y subtropicales.....	37
2.2.2 Tipos de suelos en Colombia.....	38
2.2.3 Fenómenos de degradación de suelos y erosión.....	39
2.2.4 Movimientos de suelos.....	41
2.2.5 Técnicas convencionales de procesos de erosión y control de taludes.....	45
2.2.6 Técnicas de bioingeniería para control de taludes y erosión de suelos.....	47
2.3 Marco legal - Normograma	53
Capítulo 3. Metodología	66
Fase 1. Recopilación y selección de información bibliografica.....	66
Fase 2. Jerarquización de los principales documentos bibliográficos y normograma.....	67
Fase 3. Visitas a campo.....	68
Fase 4. Planteamiento de propuesta revegetalización de taludes.....	70
Capítulo 4. Resultados	71
4.1 Selección de documentos	71
4.2 Jerarquización de documentos	79
Capítulo 4. Propuesta de revegetalización con pasto vetiver como técnica de bioingeniería del suelo	83
4.1 Datos generales de importancia en florencia, caquetá	83
4.2 Tramos de revegetalización para control de erosión de taludes	85
a. <i>Biomortero y Pasto Técnica combinada</i>	87
b. <i>Revegetalización lateral con fajinas</i>	91

<i>a. Siembra de hileras de vegetación</i>	96
<i>b. Neo celdas</i>	98
Banco Fotográfico de la Salida a Campo	101
Capítulo 5. Discusión de resultados	108
Capítulo 6. Conclusiones	110
Capítulo 7. Recomendaciones	111
7.1 Futuras líneas de investigación	111
Bibliografía	112

Lista de tablas

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los diversos tipos de planta (Gray y Sotir, 1996).....	48
Tabla 2. Normograma aplicable a la investigación.....	54
Tabla 3. Metodología de selección de documentos por temática y procedencia.	66
Tabla 4. Autores que compartieron sus artículos para este documento.	67
Tabla 5. Metodo de jerarquización de documentos bibliográficos.	68
Tabla 6. Selección de documentos bibliográficos más representativos	71
Tabla 7. Documentos más aplicables al territorio colombiano específicamente Florencia, Caquetá	80
Tabla 8. Matriz de análisis DOFA de los componentes ambientales Km73.....	86
Tabla 9. Matriz de análisis DOFA de los componentes ambientales. Km80.....	93
Tabla 10. Prueba de Fortaleza directa sobre suelo para determinar la cohesión de las raíces (C_R) y de la cohesión suelo (C_s) en periodos de 2, 3, 4, 5, y 6 meses.....	109

Lista de Figuras

Figura 1. Despredimientos.....	42
Figura 2. Volcamiento de roca.....	43
Figura 3. Reptación.....	43
Figura 4. Deslizamiento rotacional.....	44
Figura 5. Deslizamiento traslacional.	44

Lista de Imágenes

Imagen 1. China año 28 B.C. Pintura que denota trabajadores haciendo la instalación de sistemas vivos de sauce para reparación de diques y bancadas de ríos.	26
Imagen 2. Estacas vivas con ramas para retener taludes inicial.....	27
Imagen 3. Talud con plantas crecidas y establecidas, 110 días después de sembradas. ...	27
Imagen 4. Programa colombo – alemán de reforestación forestal en ladera de ronda del río Magdalena	30
Imagen 5. Desprendimientos en bloque y de partículas.....	42
Imagen 6. Volcamiento de roca	43
Imagen 7. Reptación de suelos en bosque.....	43
Imagen 8. Deslizamiento rotacional.....	44
Imagen 9. Deslizamiento traslacional.	44
Imagen 10. Muro de Contención.....	46
Imagen 11. Muro de tierra reforzada.	46
Imagen 12. Mapa de ubicación del departamento del Caquetá.....	69
Imagen 13. Talud del Km 73 en la vía Florencia – Huila Vista desde el rio Hacha.....	85
Imagen 14. Talud erosionado del km73. Súper posición de arreglo de plántulas de vetiver con biomortero y malla.	88

Imagen 15. Vista del talud km 73 con súper posición de arreglo con fajinas, mata ratón y pasto vetiver.....	91
Imagen 16. Talud del km 80, con las terrazas alisadas y una sobre posición de Imagenes de vetiver y frutales.....	96
Imagen 17. Talud con terrazas con sobre posición de plántulas de vetiver, arbustos frutales y neo celdas.....	98
Imagen 18. Talud vegetado.....	101
Imagen 19. Lotes con pasturas.....	101
Imagen 20. Detalle de pasturas de ganado en talud inclinado.....	101
Imagen 21. Vegetación de ribera río Hacha.....	101
Imagen 22. Río Hacha.....	101
Imagen 23. Talud con inclinacion superior a 60°.....	101
Imagen 24. Talud en borde de la vía con estructura de contención.....	102
Imagen 25. Coluvio cerca del pie del talud con remanentes de vegetación.....	102
Imagen 26. Coluvios inestables en la parte baja del talud.....	102
Imagen 27. Corona del talud con presencia notoria de coluvios inestables.....	102
Imagen 28. Detalle de canaleta de recolección de agua y disipadora de fuerzas erosivas rodeando la corona y lados del talud.....	102
Imagen 29. Carcavamiento cerca de la estructura de recolección de agua.....	102
Imagen 30. Terraza reconfomada.....	103
Imagen 31. Afloramiento rocoso.....	103
Imagen 32. Detalle de rocas.....	103
Imagen 33. Frente del afloramiento rocoso.....	103
Imagen 34. Despeje y terraceo.....	103
Imagen 35. Pasturas y corte de suelo.....	103
Imagen 36. Rastros del pisadas de ganado denominado efecto pata de vaca en el talud.....	103
Imagen 37. Corte de talud.....	103
Imagen 38. Escasos arboles en la corona del talud.....	104
Imagen 39. Bolsas de concreto formando canal de escorrentia.....	104
Imagen 40. cobertura minima en la parte superior.....	104
Imagen 41. Detalle de tarreco.....	104
Imagen 42. Movimiento del bulldocer.....	104
Imagen 43. Suavizado del terraplen.....	104
Imagen 44. Pedregosidad.....	104
Imagen 45. Rocas que no se puede sacar y sistemas de desagüe.....	104
Imagen 46. Alizado de la pendiente.....	104
Imagen 47. Trinchera, tela asfaltica impemeable y gravilla.....	105
Imagen 48. Bolsas de concreto.....	105
Imagen 49. Receptor de agua canalizada.....	105
Imagen 50. Detalle de la canaleta de desagüe.....	105
Imagen 51. Interrupcion de la canaleta en concreto que termina en una quebrada.....	105
Imagen 52. Vegetación del lote aldaño.....	105
Imagen 53. Detalle de pruebas de siembra.....	105

Imagen 54. Plantulas de <i>Brachiaria decumbens</i>	105
Imagen 55. Ensayos de cobertura con pasto <i>Brachiaria decumbens</i>	105
Imagen 56. Pruebas de cobertura	106
Imagen 57. Poca viabilidad de la cobertura	106
Imagen 58. Vegetación nativa mezclada con pasturas	106
Imagen 59. Arbustos y árboles.....	106
Imagen 60. Detalle de suelo y plántulas de pobre cobertura	106
Imagen 61. Talud revegetalizado con pastura de manera poco adecuada.	107
Imagen 62. Crecimiento poco regular de las pasturas.	107
Imagen 63. Suelos anegados.	107
Imagen 64. Canal de desagüe y detalle	107
Imagen 65. Detalle de laTela asfáltica	107

Introducción

La directa relación de los seres humanos con los suelos, es resultado de la necesidad de sacarle provecho a estos en actividades propias de su supervivencia como son el cultivo, el pastoreo, la ganadería, la infraestructura, las vías de comunicación y el desarrollo mismo de sus comunidades. Estas y otras actividades ejercen presión y un manejo inadecuado que a su vez ha ido generando desgaste, erosión, desertificación de millones de hectáreas a nivel mundial (“12 millones de hectáreas se pierden anualmente como resultado de la sequía y la desertificación”. UNCCD (2015)⁴), los movimientos de masas de tierra, así como la contaminación de cuerpos de agua, inundaciones y otras situaciones que terminan afectando al hombre mismo con hambrunas, sequías, deslizamientos y otro tipo de catástrofes. Esta situación ha producido preocupación en la raza humana desde épocas antiguas, generando la necesidad de desarrollar maneras de prevenir, mitigar y corregir estos daños para darle una mayor vida útil a los suelos trabajados y resguardo de situaciones peligrosas a sus comunidades.

Igualmente se ha visto que, con el crecimiento de las zonas de cosecha, el aumento del comercio y la migración de las poblaciones a zonas urbanas donde están altamente concentradas, se ha forzado la necesidad de hacer grandes obras de infraestructura vial. Las obras de ingeniería civil para desarrollar las carreteras son indispensables si se desea sacar los productos de las cosechas a las zonas de mercado. En Colombia el desarrollo de la infraestructura vial presenta un gran atraso en comparación a países de la región. Acevedo (2013) afirma: “La mayor caída dentro del ranking se evidenció en la calidad de las carreteras, en donde las vías pasaron de ocupar el puesto 91 en 2006 al puesto 126 en el año 2012” (p. 12) .

De acuerdo con esto habrá una alta posibilidad de intervención en suelo y la estabilización de taludes generalmente se hace con las técnicas convencionales de ingeniería como son el uso de concreto, hierro, piedra y otros materiales inertes como parte estructuras de contención, disipadores de energía, sistemas para control de escorrentía entre otros que se desarrollan a altos costos.

⁴ Información consultada en el documento: desertification land degradation & drought (dldd)- some global facts & figures recuperado de:

<http://www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibrary/WDCD/DLDD%20Facts.pdf>

La revisión bibliográfica de documentos colombianos demuestran pérdida de suelo fértil como consecuencia de un inadecuado manejo del mismo por parte de la ganadería, la agricultura y la minería entre otras causas comunes.

Si se emplean técnicas de control de erosión en taludes que han sido comprobadas más eficientes, como son las de la Bioingeniería que hace énfasis en utilizar material vegetal vivo y específicamente la utilización del pasto Vetiver, permitirán minimizar costos, retener los suelos y fortalecerlos en el tiempo, mejorando las condiciones de los mismos en los cuales podrán sembrarse otras especies de plantas productivas, mejorando las condiciones generales del terreno. Estas técnicas pueden usarse individualmente como complemento a las de la ingeniería convencional. “Las técnicas de bioingeniería de suelos utilizadas en combinación con las de la Ingeniería convencional pueden reducir los costos totales de la mitigación de un derrumbe de manera considerable” (Singh, 2010, p.384).

El control de taludes y la protección de los suelos debe hacerse con técnicas y metodologías amigables con el medio ambiente y la naturaleza, que perduren y se fortalezcan en el tiempo y no hacerse por solventar un problema corto plazo y a costos elevados.

El resultado final de la erosión es un suelo que se pierde, la tierra queda estéril o muy pobre en principio no es recuperable y de hacerse los costos y el tiempo que se requieren pueden ser minimizados si se aplican técnicas de Bioingeniería del Suelo y las especies de plantas adecuadas para tal propósito.

El momento en el que se encuentra Colombia no puede ser el mejor ya que en las discusiones en las cuales están las entidades gubernamentales para poder crear y reportar indicadores de economía verde tanto para la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos – OCDE, como para los Objetivos de Desarrollo Sostenible – ODS, se está proponiendo por un hacer mejor manejo y aprovechamiento de los suelos con cambios de técnicas agrícolas tradicionales por aquellas que afectan en menor medida los suelos como puede ser el silvopastoreo y la silvicultura, los cuales van de la mano con el documento titulado Plan Nacional de Restauración ecológica, restauración y recuperación de áreas disturbadas que presentó el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible en el año 2015, donde entre otros temas se hacen propuestas de manejo y recuperación de suelos afectados y erosionados valiéndose de técnicas de Bioingeniería del suelo y esto le aplica también como su nombre lo indica a la ingeniería. Son esfuerzos y propuestas interesantes las que plantea ese documento pero se queda corto en cuanto al alcance de estas técnicas ya que no se menciona en todo el documento el uso del pasto Vetiver como uno de los controladores principales de la erosión de los suelos, pero si establece una propuesta para introducir el pasto vetiver con base en los estudios de caso consultados y el estudio de caso propuesto para el tramo de una carretera específica en Colombia.

Esta recopilación bibliográfica pretende establecer las bondades del pasto Vetiver como la técnica de Bioingeniería más recomendada para el control de erosión de suelos y restauración de los mismos luego de revisar los resultados presentados en trabajos desarrollados en diversas partes del mundo y en Colombia con niveles altos de satisfacción presentados en ellos, comentando algunos beneficios ambientales, sociales y económicos logrados en dichos sitios, y se ofrecerá una posición personal recomendando su uso en las labores de recuperación de suelos.

El presente documento presentará las características de la especie de pasto vetiver, porque se recomendó como estrategia de control de talud y revegetalización propuesto en un terreno en la vía Florencia – Huila en el departamento de Caquetá. Caracterización y análisis que se realizó de manera integral a todos los componentes ambientales del área de influencia.

Capítulo 1. Planteamiento del problema

La erosión de los suelos es una problemática mundial y creciente como resultados de malos procesos de manejo que se ha dado a los mismos desde épocas antiguas. El descapote de los suelos, por pérdida de cobertura vegetal para desarrollar diversas actividades productivas asociadas a los seres humanos y sus civilizaciones son una de las principales causas de la erosión.

En las zonas de ladera en países tropicales como Colombia los problemas de erosión más frecuentes son el producto de una suma de factores como son: conformación de potreros en la zona de laderas con presencia de ganado vacuno generando deformación e inestabilidad por fractura de los suelos (efecto pata de vaca), sumado a deforestación casi completa de los terrenos, un inadecuado manejo de las aguas superficiales y subterráneas y el uso de obras de ingeniería e infraestructura inadecuadas que colapsan con la fuerza de los deslaves, movimientos en masa y deslizamientos al dar ese manejo inadecuado del suelo sin el apoyo de técnicas de bioingeniería apropiadas.

El hecho de construir vías para que por ellas se puedan mover los productos de estas poblaciones para realizar el intercambio comercial, y la comunicación de las diversas poblaciones, si no se hace con las técnicas adecuadas de protección de la capa vegetal, puede causar daños que van de ligeros a severos, difíciles de reparar a costos muy altos tanto estructurales como sociales, ya que pueden afectar pobladores de zonas aledañas. Son varios los autores que comentan la necesidad de proteger los suelos y mantener la cobertura vegetal. En su libro “Control de erosión en zonas tropicales, Suarez recomienda hacer protección de la superficie del terreno intervenido con la vegetación como obra principal de estabilización y para ello, ser especialmente cuidadoso al escoger las especies a utilizar para hacer el establecimiento. De acuerdo con lo escrito por Malagón, (1998), él cree que cuando se construyen vías de comunicación con desconocimiento de los impactos ambientales que estas pueden ocasionar sobre los suelos como deslizamientos, movimientos en masa y la final degradación de las tierras, igualmente indica que al construir las vías en zonas de protección y resguardo ambiental se facilita la colonización conllevando a estos territorios más efectos negativos que positivos.

Uno de los problemas que afectan a los suelos es la erosión hídrica que es básicamente el desgaste de las capas del suelo y la roca por el movimiento del agua superficial y subterránea, al irle sustrayendo masa. El proceso de desgaste se da como resultado de imprimirle energía cinética a las partículas del suelo por el golpe de la gota de agua en terrenos descapotados o desprotegidos de cobertura vegetal. Estas partículas de suelo disgregado alteran la textura, capacidad de infiltración y quedan susceptibles a ser

erosionables por fenómenos de arrastre. Es claro entonces que la erosión hídrica está influenciada por la época climática o de lluvias, la cobertura que presenta el terreno, la velocidad de escurrimiento e infiltración y la topografía que presenta el terreno, y la pendiente que tenga dicho suelo.

Suarez, (1998)⁵ por su parte piensa que es el agua lluvia la principal responsable generando deterioro en taludes, y a esta le pueden suceder las aguas de escorrentía y subterráneas. El control de estas aguas es una de las principales tareas de una obra de ingeniería al hacer una vía.

En países desarrollados, los planes viales exigen unas normas muy estrictas para hacer el control de la erosión que deben ser realizadas por los constructores buscando proteger el medio ambiente, un ejemplo de esto es el manual de técnicas prácticas de protección y restauración de suelos durante y después de construir una obra de infraestructura vial, generado por McDonald et al. (2011). En países como Colombia esto apenas se está solicitando y según se puede apreciar en los taludes de las principales carreteras del país su cumplimiento no se lleva a cabo completamente, los taludes continúan descubiertos y desprotegidos resultando en infinidad de ocasiones en derrumbes y caídas.

En Colombia las vías se desarrollaron históricamente a partir de retomar los caminos hechos por los indígenas precolombinos, para transformarlos en caminos reales, luego ampliarlos y suavizarlos para hacer caminos para carros de bueyes y finalmente automóviles, buses y camiones. (Osorio, 2014, p.184); pero la especificación de su construcción en un principio no tenía en cuenta el manejo ambiental de los suelos y los taludes. En las actuales contrataciones ahora si se cuenta con un exigente proceso de protección ambiental para proteger los suelos y evitar la erosión, tal como se lee en la guía ambiental de proyectos de infraestructura del INVIAS de 2011: “La política del INVIAS se orienta hacia la protección y conservación de la biodiversidad por las implicaciones sobre la viabilidad de la vida, el funcionamiento de los ecosistemas y la provisión de servicios a la humanidad”, con el cual se busca la construcción de la vía de comunicación pero con el objetivo de mantener y evitar la pérdida de la biodiversidad.

Al desarrollar las carreteras se producen afectaciones según Rivera, J. (2007) “sobre suelos de ladera, donde se han producido cortes para la apertura de carreteras, debiendo implementarse medidas temporales que incrementan los costos de mantenimiento de las mismas”.

⁵Suárez, J. 1998. Deslizamiento y estabilidad de Taludes en zonas tropicales

La manera de hacer control a los problemas erosivos se hace generalmente con técnicas tradicionales de ingeniería, buscando controlar el problema en el menor tiempo posible con mecanismos intrusivos y poco amigables con el entorno.

De acuerdo con Rivera, Sinisterra y Calle. (2007)⁶ afirma: “La erosión y los deslizamientos avanzan cada año, debido a que han sido afrontados tradicionalmente en forma mono disciplinaria y no integral, mediante obras mecánicas de concreto propias de la ingeniería civil” (p.2), basados en ensayo y error, que solo actúan sobre los efectos de los problemas, más no sobre sus causas lo cual viene siendo la norma en la contención de taludes degradados por erosión. El autor explica que las decisiones precipitadas de utilizar este tipo de inadecuados controles se dan más respondiendo a “intereses económicos de contratación más no a dar solución verdadera y definitiva a la problemática de degradación ambiental”.

En la visita de campo realizada en la vía Florencia – Huila se evidenció que por un manejo inadecuado del suelo, remoción de material vegetal, taludes inclinados, suelos poco estables y presencia de ganado con la llegada de un invierno fuerte y las lluvias que en esta zona del país son frecuentes generaron un movimiento de masa y un deslizamiento de tierra de tipo translacional.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente y viendo la importancia que se le está dando en Colombia al desarrollo de la infraestructura vial, y la apuesta a las concesiones, es importante hacerse las siguientes preguntas que buscan resolver la problemática de erosión de taludes y su potencial control.

- ¿Por qué se hace uso de técnicas que no controlan de manera efectiva la erosión?
- Comparativamente ¿Cuáles resultados se han tenido entre obras de ingeniería convencional y de bioingeniería, para hacer control de procesos erosivos en taludes?

Adicionalmente es relevante tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Entender la erosión como resultado de diferentes tipos de procesos y fenómenos.
- Establecer cómo se desarrolla la erosión hídrica y sus consecuencias.

Por otra parte, dentro de las varias técnicas que existen de la bioingeniería del suelo surgen las siguientes inquietudes:

⁶Rivera, J. et al. 2007. Restauración Ecológica de suelos degradados por Erosión en Cárcavas en el enclave xerófitico de Dagua, Valle del Cauca, Colombia Recuperador de: <http://www.cipav.org.co/noticias/noticias-n01.html> Noviembre 10 de 2015. Documento que brinda respuestas a como la fuerza de la naturaleza destruye soluciones de corto plazo de control de erosión con ingeniería básica y como haciendo control con sistemas de bio ingeniera los resultados resultan más efectivos y duraderos en el tiempo.

- ¿Qué tanto se conoce y se aplica en Colombia el uso del pasto vetiver en control de erosión de taludes?
- ¿Cuál es la recomendación y apoyo que desde el gobierno se da a esta técnica en comparación con los resultados de estudios de casos exitosos, desarrollados en diversas partes del mundo?

Ahora bien, la erosión como se mencionó anteriormente genera una infinidad de problemas como son: interrupción en vías de comunicación, aumento en costos de mantenimiento de vías y terrenos, pérdida de productividad en campos y taludes de ladera, imposibilidad de transportar con facilidad productos agrícolas, pérdida de cosechas, incremento de costos en fletes y peajes en las vías en concesión, entre otros.

- ¿Cuáles son los costos asociados a la erosión de suelos y taludes, como resultado de no tener una visión amplia de las implicaciones cartográficas, climáticas y de entorno al preferirse hacer un control de tipo inmediateista y de corto plazo con técnicas de ingeniería tradicional?

Finalmente queda un último interrogante y es:

- ¿Con este documento podrá lograrse una mayor sensibilización en el conocimiento de la técnica de bioingeniería utilizando pasto vetiver en el control de taludes para manejar efectivamente la erosión a menores costos y de manera generalizada en el territorio colombiano?

1.1 Objetivos

Objetivo General

Analizar la factibilidad de uso del pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en restauración de taludes en el territorio colombiano, específicamente en un tramo de la vía Florencia – Huila en el departamento de Caquetá.

Objetivos Específicos

- Revisar la bibliografía en el contexto internacional y nacional, sobre la restauración ecológica con el sistema del pasto vetiver, con énfasis en el control de la erosión del suelo en taludes.
- Desarrollar una descripción y una jerarquización de la información recopilada para determinar cuáles documentos son aplicables al territorio colombiano.
- Elaborar una propuesta de revegetalización de taludes en los km 73 y 80 de la vía Florencia – Huila, mediante técnicas de bioingeniería del suelo usando pasto vetiver.

1.2 Justificación

El inadecuado manejo que se ha dado a los suelos en Colombia sumado a procesos naturales y las difíciles condiciones topográficas ha acelerado la degradación y erosión de los mismos. Dentro de estas actividades una que genera impactos severos es la de la construcción de infraestructura vial.

El desarrollo de carreteras en Colombia, ha surgido como una necesidad de comunicación entre las poblaciones y comercio, pero de una manera poco organizada y con un manejo inadecuado de suelos. La respuesta que se ha dado a problemas generados por la erosión y al tema de control de taludes, cuando se hace algo, generalmente es por medio de obras de ingeniería civil de alto costo, respuesta inmediata y poco tiempo de duración. Cuando se viaja por carretera dentro de Colombia, es evidente el descuido y la falta de trabajo realizado en torno a la protección de la capa vegetal y los taludes de carretera.

La bibliografía consultada sugiere que la ingeniería convencional como estrategia mono específica no es la solución más adecuada, pero si en algunos casos se complementara con técnicas de bioingeniería, podrían ser más efectivos los resultados a corto, mediano y largo plazo.

Las estructuras rígidas no naturales en materiales como, piedra, concreto y hierro que provee la ingeniería convencional, además de tener un alto costo, generalmente son desplazadas por los movimientos de masas de tierra, con una relativa facilidad, por lo que el tiempo de duración de estas obras tiende a ser corto. Trabajos comparativos muestran con suficiente prueba fotográfica y de análisis como ese tipo de soluciones son inadecuadas y demuestran también como efectivamente la cobertura de plantas con raíces fuertes genera una solución real y en el tiempo efectiva a una fracción de los costos.

Si se desea tener manejo de suelos, taludes y realmente hacer control de erosión, las técnicas de bioingeniería que en palabras de Rivera (2013) afirma que: “en esencia se basan en estudios científicos de los procesos físicos, químicos y biológicos de los fenómenos degradativos” (p.1) y dentro de estas específicamente el uso del pasto vetiver, son las más indicadas y debería comenzar a tomarse en cuenta con seriedad en Colombia. La razón de que sea una de las mejores técnicas de bioingeniería radica en:

- Ser de bajo costo de implementación (generalmente el 20% al 70% del costo de una obra de ingeniería convencional)
- Se fortalece con el tiempo reteniendo los suelos de manera real y dando sustento a los taludes.
- Es natural y paisajísticamente más agradable a la vista.
- Controla efectivamente la erosión, dando la posibilidad de mejorar las condiciones del suelo.

Al comparar las diversas técnicas de bioingeniería con la utilización del pasto vetiver se ha encontrado en los diferentes documentos consultados que las propiedades de fortaleza de tensión de las raíces del pasto vetiver con relación a la estabilización de taludes es notoria. Ya que su uso ha sido amplio en casi todo el mundo durante un largo periodo, se conoce que las propiedades de las raíces de este pasto ayudan efectivamente a controlar la erosión, y fortalecer la estabilidad de la pendiente y los taludes cuando ha sido sembrado adecuadamente, ya que retienen sedimentos que son arrastrados por el agua, desarrollan sistemas de terrazas naturales (evitando la construcción de terraplenes artificiales).

A nivel mundial el uso del pasto vetiver es una técnica bio ingenieril altamente aceptada, pero no lo suficientemente valorada; además, está recomendada por el Banco Mundial en su manual: “Pasto vetiver: el seto contra la erosión” Greenfield. (1990), escrito específicamente para agricultores pequeños que habitan en los trópicos y sub trópicos para hacer procesos de manejo de suelos eficientes y control de erosión.

Colombia es un país tropical con suelos inestables, una topografía altamente quebrada y con inclinación de taludes algunas veces superiores a los 60° en los cuales por fenómenos naturales, inadecuado manejo de suelos por procesos agropecuarios, viales y de ingeniería, se generan procesos erosivos y potenciales de derrumbe y deslave. La aplicación del pasto vetiver para el manejo de estos suelos de talud, ayudaría a controlar los procesos comentados y potenciales emergencias y desastres. De manera más sencilla, poco costosa y realmente efectiva.

1.3 Impacto

Teniendo en cuenta que debido al cambio climático, la intensidad de las lluvias, el fenómeno del niño y de la niña, el despliegue de desarrollo de infraestructura vial y las actuales proyecciones de las carreteras de cuarta generación (vías 4G), el inadecuado uso de suelos, la deforestación y las malas prácticas agrícolas son una realidad que se presenta en Colombia generando como resultado derrumbes, deslaves y deslizamientos de masas de tierra produciendo impactos económicos, ambientales y sociales, este documento puede resultar una herramienta de utilidad ya que analiza diferentes estrategias existentes para mitigar, controlar y revertir procesos erosivos y de ellas hace especial énfasis en la utilización de técnicas de bioingeniería de suelos en especial instalando pasto vetiver en las zonas de ladera y pendientes de difícil manejo a una fracción del costo de otras metodologías.⁷

Los tomadores de decisión pueden tomar en cuenta, algunos de los documentos y experiencias analizadas en este documento donde se relatan casos exitosos de recuperación de suelos erosionados, para darle mayor importancia a la selección de las técnicas de bioingeniería con el uso del pasto vetiver en el momento de generar los procesos licitatorios en la construcción de vías y en los momentos de hacer control de emergencia en restauración de taludes erosionados.

La consulta de la información consultada, organizada, analizada y la propuesta en un tramo de las carreteras de Colombia, como es el caso de Florencia, constituye un compendio valioso para que este trabajo de grado permita el desarrollo de futuras líneas de investigación aplicada.

⁷ “Aunque la propuesta del Vetiver muestra bondades que se expresan en el documento del trabajo de grado de la maestría de Ciencias Ambientales como en otras investigaciones en el mundo, es conveniente aclarar, que desde el análisis integral de un punto determinado en obras ingenieriles, esta propuesta es una opción que vale la pena contemplar en la disciplina geotécnica y que se requieren pruebas previas antes de implementar su uso definitivo, con el fin de verificar su eficiencia y eficacia en la restauración de un talud, la edafodiversidad y demás factores formadores del suelo y pueden o no aceptar naturalmente este ente biológico, el pasto Vetiver”. Grace Andrea Montoya, Junio 2016.

Capítulo 2. Fundamentación teórica

2.1 Antecedentes

El uso del suelo sumado a fenómenos naturales genera degradación y erosión siendo motivo de preocupación de la raza humana desde épocas antiguas. Dentro de estos procesos erosivos y como uno de resaltar resultado de un efecto antrópico está la afectación de los suelos para hacer caminos, carretables y vías de comunicación.

La historia de la apertura de vías en nuestro país data de la época precolombina, según “Grandes tramos de las carreteras actuales de Colombia se trazaron siguiendo los caminos reales coloniales, de igual manera que estos mejoraron las condiciones de trochas y caminos indígenas”. (Osorio, 2014, p.184). Parte de la razón de haber utilizado este tipo de vías respondió a la difícil geografía, con presencia de ríos, valles y cordilleras que se presentaban como obstáculos para hacer vías, y ser salvados con ayuda de puentes en los puntos más accesibles. Los caminos de herradura presentan sus diferencias entre los de los indígenas y los españoles, los primeros solo eran transitados por humanos, los caminos reales eran transitados en compañía de animales e indios cargueros. (Osorio, 2014, p. 185). Los caminos reales eran los más transitados utilizados para unir las provincias y fueron diseñados como caminos de herradura, pero en los cuales no era posible pasar animales de carga o de silla, por ser mal construidos, labor que desempeñaban los indígenas.

Osorio (2014)⁸, afirma que: “en 1846 comienza en Bogotá el transporte urbano de mercancías, muebles, y otros en carros tirados por bueyes y caballos. En el siglo XIX circularon entre Bogotá y Facatativá 32.000 carros de estos. Entre 1864 y 1872 elaboran normas y leyes para el primer plan vial del país Ya para el año de 1873 se da el comienzo de la construcción de carretables en el país. Se definió carretable a una vía afirmada menor a 4.6 m de bancada y carretera las que excedían esa medida” (p. 185).

La construcción de carreteras se apoya con la renovación de acceso a la deuda luego de finalizada la guerra de los mil días, pero luego de la pérdida de Panamá en el gobierno de Rafael Reyes se propone la construcción de carreteras para sacar al país de los problemas económicos dejados por la guerra por lo que en 1905 se crea el Ministerio de Obras Públicas, solo a partir de 1910 se inició un programa organizado de construcción de

⁸Osorio. 2014. Reseña histórica de las vías en Colombia. Este documento ha permitido entender en parte porque ha sido tan compleja la construcción de la red vial en Colombia, no solo por su geografía sino por haber sido desarrollada en trazados que eran para vías indígenas de a pie.

carreteras, pero éste se vio afectado ante la falta de voluntad de establecer prioridades por parte del gobierno y las entidades encargadas de la época.

La financiación de obras viales recibe un importante impulso solo hasta el año de 1997, ya que antes de esta fecha eran hechas y mantenidas por el gobierno nacional a través del Ministerio de Obras Públicas. Como se aprecia, desde el inicio la creación de infraestructura ha sido una tarea compleja en Colombia en gran parte por lo quebrado de su geografía, pero muy especialmente por no tener recursos económicos suficientes y no saber darles una prioridad a los mismos.

Muñoz (2002)⁹, refiere: “El desarrollo de las concesiones viales en Colombia tienen un periodo de vida relativamente corto; ellas se originan a principios de 1997, como respuesta a la carencia de recursos estatales para la inversión en la Red Vial Nacional” (p.1). Es importante resaltar que se vio la necesidad de regular el tema del impacto ambiental por obras de infra estructura vial y para ello desarrollan el estatuto general de contratación cual tiene por objeto disponer las reglas y principios que rigen los contratos de las entidades estatales, se dictan disposiciones básicas sobre el transporte, se redistribuyen competencias y recursos entre la Nación y las Entidades Territoriales, se reglamenta la planeación en el sector transporte y se dictan otras disposiciones, todo esto con el apoyo del Ministerio del Medio Ambiente recientemente creado, se establecieron políticas de protección ambiental, se creó la reglamentación que rige a las concesiones viales en el país.

Con la construcción de carreteras se vio la necesidad de reparar los impactos causados por la intervención en suelos y montañas, para ello se trabajó generalmente con tecnologías propias de la ingeniería civil. Pero también surgieron como metodologías alternas y complementarias al control de la erosión y sostén de taludes las de la Bioingeniería entre otras. En esta investigación determinar cómo se puede hacer una intervención más efectiva minimizando costos, pero siendo parte del proceso de desarrollo del país, permitirá darles una duración y continuidad a las obras de infraestructura en el tiempo y no estar reconstruyendo tramos que no lograron retener los taludes con los años.

⁹ Muñoz. 2002. Concesiones viales en Colombia, historia y desarrollo. Es muy reciente el esquema de construcción de red vial mediante concesión y la experiencia no ha sido la mejor para el país, por calidad, sobre costos y problemas en la contratación para hacer de este un proceso menos traumático, y lo que también se observa en la ausencia de aplicación de técnicas de control de erosión y protección de taludes más amigables con el ambiente.

En vista de que la degradación y afectación no solo del suelo sino de los ecosistemas y los recursos naturales el tema de la restauración ecológica comienza a ser trabajado por diferentes organizaciones no gubernamentales y la academia, en el año de 2006 se crea la Escuela de Restauración Ecológica - ERE de la Pontificia Universidad Javeriana y a la cual se han ido vinculando la Secretaria Distrital de Ambiente, el Jardín Botánico de Bogotá, el Instituto Alexander Von Humboldt, el Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria – CIPAV-, el Sistema Nacional de Parques Nacionales Naturales entre otros.

Trabajos orientados a hacer una restauración ecológica en Colombia se resaltan entre otros el de Cano, & Zamudio. (2006), Recuperar lo nuestro. Una experiencia de restauración ecológica con participación comunitaria en predios del embalse de Chisacá.

En el año 2015 se publica el Plan Nacional de Restauración: restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de áreas disturbadas, con el apoyo del Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS y la Presidencia de la República en el cual se desarrolla las temática de la pérdida y transformación eco sistémica, las invasiones biológicas, la sobre explotación de recursos, contaminación y afecciones por cambio climático y finalmente degradación de suelos y cuáles pueden ser las estrategias para abordar la problemática como herramienta de acción que puede ser de utilidad a los diversos actores que intervendrán en su recuperación. Este documento nace de la necesidad de atender problemas acumulados históricamente en el país en el que se ha generado la degradación y mal uso del suelo y los recursos, “La ocupación del territorio en Colombia ha obedecido a factores y dinámicas (económicas, sociales, políticas y aún religiosas) que, en muchos casos, ha llevado a generar procesos productivos poco sostenibles, a la degradación, fraccionamiento y pérdida de los ecosistemas naturales” (Ospina. et al. (2015). El plan busca atender la restauración ecológica, la rehabilitación y la recuperación en tres periodos de tiempo, corto a tres (3) años, mediano a ocho (8) y largo a 20 años, donde busca la articulación con el Sistema Nacional Ambiental, autoridades ambientales, entidades territoriales, academia, sector civil y privado entre otros actores y usuarios de los recursos naturales.

En este documento no se menciona el uso de la técnica del sistema Vetiver que si ha sido recomendada mundialmente por el Banco Mundial para hacer procesos de control de erosión de suelos y restauración ecológica de ecosistemas.

2.1.1. ¿Cómo nace la bioingeniería de suelos?

El origen real de la Bioingeniería del suelo o Ingeniería Biológica del suelo se remonta a la primera centuria Antes de Cristo en el siglo 28 AC, historiadores chinos reportaron técnicas como uso de estacas vivas para sostener taludes de riberas, se dice que algunos de los primeros visitantes a China comentaron haber visto taludes de riberas estabilizadas con grandes canastas cosidas y conformadas por sauce, cáñamo y bambú, rellenas de roca (**Imagen 1**).



Fuente: Finney, K. (1993)

Imagen 1. China año 28 B.C. Pintura que denota trabajadores haciendo la instalación de sistemas vivos de sauce para reparación de diques y bancadas de ríos.

Por su parte en Europa los Celtas desarrollaron técnicas de cosido de ramas de sauce para hacer muros y paredes de contención, en tanto que los romanos utilizaron fajos y paquete de ramas de sauce en construcciones hídricas (Lewis, L. 2000).

Según Evette, Labonne, Rey, Liebault, Jancke y Girel. (2009)¹⁰, evidencia real de estos sistemas se encontró de la edad media (cerca del año 1600), Leonardo Da Vinci recomendó sembrar sauces en las bancas de los ríos para evitar la erosión. Uno de los primeros escritos, es la publicación de 1791 por Reinhard Woltmann llamada “Beiträge zur Hydraulischen Architectur” o “contribuciones a la ingeniería hidráulica” explicando el uso de técnicas de bioingeniería de suelos con el uso ilustrado de las estacas vivas para revegetalizar y estabilizar los taludes ribereños, (Stiles, (1991), en Lewis, L. 2000).

¹⁰ Evette, S., Labonne, F., Rey, F., Liebault, O., Jancke & J. Girel. 2009. History of Bioengineering Techniques for Erosion Control in Rivers in Western Europe. Estos ejemplos que brinda Evette en su documento son perfectamente replicables en nuestro país donde las épocas de lluvias generan estragos por inundaciones y ruptura de diques que si estuviesen apropiadamente cubiertos de vegetación y trabajados con técnicas de bioingeniería no sufrirían ese tipo de daños, y que hace parte de lo que se busca controlar en el Plan Nacional de Restauración Ecológica.

2.1.2. ¿Cómo surge el nombre de la bioingeniería?

El nombre de la bioingeniería proviene del término alemán ‘Ingenieurbiologie’ y en español se traduce como Ingeniería Biológica, Bioingeniería o Ingeniería del Paisaje, en otros países más común como Bioingeniería del Suelo, que es el nombre que Colombia ha adoptado.

Es una rama de la ingeniería que utiliza una serie de técnicas en donde el material vegetal vivo es un elemento de construcción, solo o combinado con materiales inertes como árboles, piedras, concreto, mallas, geo textil y otros, para hacer una restauración ambiental a largo plazo en el tiempo. Según Sangalli, (2008)¹¹ “la definición dada por el Profesor Hugo Schiechtl, considerado el padre de esta rama, es la siguiente: “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”.

En palabras de la guía práctica de uso de bioingeniería en recuperación de bancadas de quebradas, la bioingeniería se define simplemente como incrementar la fortaleza y estructura de los suelos con una combinación de elementos biológicos y mecánicos **(Imagen 2 e Imagen 3)**



Fuente: Li, X., Zhang, L and Zhang, Z. (2006).
Imagen 2. Estacas vivas con ramas para retener taludes inicial.



Fuente: Li, X., Zhang, L and Zhang, Z. (2006).
Imagen 3. Talud con plantas crecidas y establecidas, 110 días después de sembradas.

Estas técnicas de bioingeniería son un claro ejemplo de como la combinación entre la ingeniería clásica y la naturaleza permiten retener los suelos, reducir los efectos erosivos

¹¹ Sangalli. 2008. Bioingeniería o Ingeniería Biológica – Introducción a la Bioingeniería Biológica o Ingeniería Biológica. Permite con su documento dar a conocer mejor las diferentes técnicas y su apropiada utilización lo cual se compara con otras técnicas en este documento.

y darles sustento y fortaleza en el tiempo lo cual es algo que se desea reforzar como idea principal en este documento. Además de cumplir con la tarea de evitar deslizamientos, da un aspecto más agradable al entorno embelleciéndolo y en algunos casos volviendo productiva una zona que no se tenía aprovechada.

La bioingeniería tiene como función principal, el control de erosión de suelos y su desarrollo como técnica se utiliza para:

- Restauración de infraestructuras lineales: autopistas, ferrocarriles.
- Estabilización de laderas y control de la erosión.
- Regeneración de cursos de agua, marismas y espacios litorales.
- Recuperación de terrenos afectados por actividades extractivas: graveras, canteras, minas entre otros:
- Restauración de espacios degradados: vertederos, escombreras.
- Entornos afectados por el fuego.

La bioingeniería cumple 5 fines puntuales:

- Finalidad Técnica: Principalmente protección frente a la erosión, la estabilización de laderas o la estabilización de márgenes.
- Finalidad ecológica: Rehabilitación de los ecosistemas.
- Finalidad estética: Integración de obras y construcciones en el paisaje.
- Finalidad económica: Mejoras en el tiempo de ejecución de las obras y ahorro de costos y energía en su ejecución.
- Fuente de creación de empleo (Martínez, E. [et ál], 2013).

2.1.3. Historia de la bioingeniería en Europa y Estados Unidos.

De acuerdo con Franti (1997), la bioingeniería ha sido practicada de manera amplia y exitosa en Europa, durante más de 150 años, en especial en Alemania.

Con los proyectos económicos en creación de infraestructura vial en Norte América y Europa, renace la bioingeniería. Durante los años 20 y 30 se desarrollaron trabajos en bioingeniería en USA por Charles Kraebel y otros aprovechando la gran depresión económica y buscando generar trabajo e ingresos mientras que en el año de 1936, en Alemania durante el régimen del Nacional Socialismo, Hitler funda el Centro Oficial para Investigación en Ingeniería Biológica con el fin de generar empleos y desarrollar su red de autopistas (autobahn) y manejo de suelos alemanes, dejando a Arthur von Kruedener como director del mismo centro y quien en 1951 publica el documento “Ingeniurbilogie” o biología ingenieril. Para el año de 1950 se creó el Comité Alemania-Austria-Suiza con el fin de desarrollar el Sistema Nacional de Especificaciones para

construcción de carreteras. Por su parte durante los años de 1970 a 1980 florecen los proyectos de bioingeniería de suelos en Estados Unidos: con documentos como: “Ensayos en cuenca del río Tahoe” y “Revegetalización de parque Redwood” entre otros.

En Alemania en el año de 1980 Hugo Schiechtel publica su obra más importante “La Bioingeniería para la reclamación del suelo”, luego en 1992 el mismo Schiechtel publica “Die Weiden in der Praxis” o Los pastos en la práctica, que ha sido una importante obra descriptiva de las técnicas de la bioingeniería.

En este documento se ha evidenciado como es necesario trabajar en el desarrollo de la infraestructura vial, pero si tomamos los ejemplos de desarrollo de esta en Estados Unidos y Europa, estos deben ir siempre de la mano con la Bioingeniería y la ingeniería tradicional para reducir y manejar los impactos generados sobre los suelos y no esperar años a que estos se degraden al estar sin protección o cobertura natural generando interrupciones en las vías, pérdidas de vidas humanas y sobrecostos en mantenimiento de dicha infraestructura.

2.1.4. ¿Cómo llega la bioingeniería a Colombia?

En Colombia, el tema de la bioingeniería se remonta al año de 1975, cuando la Federación Nacional de Cafeteros publica el Manual de conservación de suelos de ladera, esto con el fin de que los campesinos cafeteros le den un adecuado manejo a los cultivos los cuales en gran parte ocupan suelos de ladera que son fácilmente erosionables.

Para 1986 Rivera escribe el plan de uso, manejo y conservación de los suelos Cotové Medellín, donde comenta el uso y practicidad de la técnica de la bioingeniería, este es un documento realmente importante porque explica de manera práctica por qué algunos usos dados a los suelos, no son los adecuados, y como el dueño de cada terreno tiene la posibilidad de hacer cambios y mejoras que pueden resultar en beneficio económico, y ambiental y que perduran en el tiempo.

Solo hasta el año de 1985 la Corporación Autónoma Regional (CAR) Cundinamarca en convenio con el Banco Alemán KFW y con la entidad Técnica de Cooperación Alemana GTZ decide apoyar a Colombia con la creación del Proyecto Checua para el control de la erosión en terrenos de Cundinamarca, específicamente en la región de Ubaté, en la que su tradición de agricultura y ganadería habían desgastado los suelos a tal punto que el 50% de 17 mil kilómetros presentaban altos niveles de erosión como resultados de mal manejo, quemas, entre otros malos usos. El proyecto fue dividido en dos fases: la primera desarrollada entre 1988 y 1994 en 17 mil hectáreas, en la cuenca del río Checua y sobre

las zonas rurales de Nemocón, Suesca, Cucunubá y Tausa. Luego se amplió a las cuencas de los ríos Ubaté y Suta, en 43 mil hectáreas más. La segunda fase se realizó entre 1995 y 2003, abarcó 65 mil hectáreas en doce municipios de la región ubicados en los alrededores de la Laguna de Fúquene, conformada por las cuencas de los ríos Suta, Ubaté, Lenguazaque, Quebrada Honda, Fúquene y la laguna de Cucunubá. Se controló la erosión con obras bio mecánicas, generando pocetas, banquetas, diques y muros de contención con material vegetal vivo y se le explicó a los campesinos la necesidad de hacer siembra directa y labranza mínima, es decir sembrando las semillas directamente en suelos con cobertura permanente de residuos vegetales dejando de usar tractores y arados convencionales con resultados positivos (Zamudio, C. [et ál], 2008).

En 1993 se da comienzo al programa Forestal Río Magdalena entre la Federación Nacional de Cafeteros y el Gobierno Alemán, con el fin de establecer 50 mil hectáreas de plantaciones forestales y agroforestales y 18 mil de conservación de bosques naturales (**Imagen 4**). Después de 20 años de ejecución los resultados han sido positivos y buscan ser replicados.



Fuente:

http://www.federaciondecafeteros.org/particulares/es/sala_de_prensa/detalle/la_federacion_de_cafeteros_y_los_gobiernos_de_colombia_y_alemania_celebran/

Imagen 4. Programa colombo – alemán de reforestación forestal en ladera de ronda del río Magdalena

Para el año 2000 se da inicio al proyecto MDL como un plan piloto de reforestación del bajo Cauca Antioqueño. Mientras tanto, como medidas para ayudar a controlar la erosión en suelos colombianos en el años 2005, se crea el Proyecto Forestal de Maderas del Darién con el fin de detener el crecimiento de la frontera agrícola en esa importante y delicada zona ambiental del país, dar una manejo adecuado a los bosques, hacer extracción legal de madera y de paso evitar la erosión de los suelos.

Algunos trabajos realizados de manera práctica utilizando técnicas de bioingeniería en Colombia y que son de interés para este documento son resultado de aplicaciones

prácticas e investigaciones realizadas desde los años 80 por personas conocedoras en la materia como José H. Rivera. Entre sus documentos se pueden citar algunos como: plan de uso, manejo y conservación de suelos del Centro Experimental Cotové (Rivera, J. 1988.).

Rivera, empoderó a la comunidad de Villa Rosa en el municipio de Argelia, en el departamento de Caldas, donde después del terremoto de enero 25 de 1999 en el eje cafetero los suelos quedaron afectados por movimientos de masas de tierra y erosión, para que se hicieran procesos regenerativos que mitigaran daños ocasionados en los suelos. Para ello con la financiación de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC, el Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria – CIPAV - se enseñaron técnicas de bioingeniería a las comunidades del municipio como la Corporación Ecoambientes y la Cooperativa de Parceleros de Villarosa, quienes ejecutaron las técnicas para la prevención y control de la erosión, la protección y estabilización de taludes con lo cual en poco tiempo se logró recuperar los suelos afectados. Se evidenció que el costo de esta intervención fue hasta de un 98% más económico que si se hubiese intervenido con obras de ingeniería convencional (Fuentes, M. 2009.)

El documento de Mendoza, C. 2011, llamado alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización, es una importante revisión bibliográfica sobre las diferentes propuestas de Bioingeniería que se están utilizando actualmente para el control de la erosión de suelos a nivel mundial y en Colombia donde concluye que los procesos que se vienen dando son menos agresivos contra el ambiente, más naturales, que se fortalecen en el tiempo y se integran a los procesos de revegetalización y fertilización de los suelos.

El documento de Rivera, J. 2013, llamado experiencias de casos exitosos, con el uso de la bioingeniería en el control de problemas de erosión y movimientos masales, hace una comparación de la eficiencia, eficacia, economía y el impacto ambiental entre la Bioingeniería y la ingeniería convencional al hacer el tratamiento a dos cárcavas, la una en El Tablazo en Caldas y la otra en Tejares, Valle. La primera se intervino con técnicas de ingeniería tradicional y la segunda con técnicas de Bioingeniería, teniendo en cuenta que las dos presentaban similitudes en material parental, suelos, clima, pendientes y tamaño de área según Rivera, J. 2013. Los resultados obtenidos por el autor indicaron la necesidad de conocer y entender la causa y efecto del proceso degradativo teniendo en cuenta la relación de varios factores como Roca, suelo, características del terreno, clima, vegetación, animales y el hombre entre otros. Mantener y fortalecer la vegetación existente en el sitio.

La tesis de grado de Flórez, G. 2014, titulada Efectividad de la Bioingeniería para el tratamiento de la erosión y los movimientos en masa en laderas, es un documento que de manera práctica establece como obras de bioingeniería realizadas en tres localidades del departamento de Caldas demostraron ser eficaces, eficientes, efectivas y económicas. Se demostró en el documento que problemas críticos de suelo se pudieron solucionar con la aplicación de dichas técnicas, siendo ambientalmente amigables, estéticos, de muy bajo costo y durables en el tiempo (Flórez, G. 2014). También y más importante quedó la recomendación de que los organismos del estado se capaciten, implementen y patrocinen este tipo de técnicas para hacer prevención y control de fenómenos de erosión de suelos y de restauración ecológica.

Junto a estos documentos se tienen algunos que desarrollan uso del pasto vetiver como una de las más importantes técnicas de Bioingeniería que existen actualmente.

2.1.5. ¿Cómo se ha utilizado el Pasto Vetiver en la historia?

El uso del Pasto Vetiver como técnica de bioingeniería para control de taludes y erosión se ha realizado en la India, por muchos siglos. Este pasto fue introducido a Fiji desde la India a finales de 1800 específicamente como material utilizado para los tejados de las casas, y todavía se utiliza en techos y paredes. Para el año de 1930 la tecnología vetiver se utilizó en el sur de India para control de erosión en bancas de ríos, terrazas de cosecha y demarcación de fronteras agrícolas, en este mismo sentido se usó en Nigeria; solo hasta el año 1950 se comienza a utilizar como mecanismo de control de erosión de los suelos en India (Truong, P. et al, 2000)¹². Entre 1930 a 1950 se introduce a los países caribeños para hacer control de erosión en las zonas de cultivos.

Por otro lado en 1950 se aplica en control de erosión como ayuda para granjeros pobres, que poseían terrenos con pendientes inclinadas sembrados de caña de azúcar que se vendía a la *Fiji Sugar Corporation*, mientras tanto para el año de 1986, el señor John *Greenfield*¹³ introduce la técnica vetiver a proyectos de distribución y manejo de aguas patrocinados por el Banco Mundial, y en 1987, el mismo Greenfield y otros autores

¹² Truong, P. 2000. Vetiver Grass System: Potential Applications for Soil and Water Conservation in Northern California. Documento guía para conocer procesos de siembra del Sistema vetiver para evitar la erosión y proteger cuerpos de agua que ha servido y ha sido referenciado en varios de los trabajos consultados en esta tesis, para conocer más sobre usos anteriores del pasto.

¹³ Greenfield, J. 1990. Vetiver grass: the hedge against erosion. Importante escrito que documenta procesos exitosos de uso de la planta en los procesos de control de la erosión.

publican el manual, “Pasto Vetiver – el seto contra la erosión” difundiendo aún más su conocimiento y recomendando su uso.

Por su parte entre 1986 y 1993, las universidades de Agricultura India, llevan a cabo la investigación de 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. En 1988, Grimshaw introdujo la técnica vetiver al proyecto chino de suelos rojos, pero solo hasta el año de 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. Así mismo el señor Jim Smyle desarrolla unos talleres de trabajo en Etiopía.

Para los años 1991 a 1993 el Dr. Yoon, hace investigaciones con el sistema Vetiver en Malasia y genera el reporte “Mire, observe el pasto Vetiver en Malasia” mientras que en el año de 1992 se realiza el primer taller internacional de vetiver, patrocinado por el Instituto de Investigaciones del caucho en Malasia, en tanto que en 1993, Paul Truong y las universidades Australianas 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 (Grimshaw, R. 2013). Ya en 1995, se establece la Red Vetiver Internacional como una entidad sin ánimo de lucro en Virginia USA y para 1996, la red gana \$100 mil dólares por el premio John Franz para la sostenibilidad y una beca por 300 mil dólares por el real gobierno Danés, en ese mismo año se da la primera conferencia internacional del Vetiver denominada el pasto milagroso, en Chiang Mai, Tailandia. En 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 65 Mpa (mili pascal) o 9400 psi (libras de presión por pulgada cuadrada).

En el año de 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 pilotos 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 red¹⁴ y solo en 1999, la red se establece en el Oriente Medio y en Europa.

En Colombia más específicamente el sistema Vetiver se comienza a utilizar hace poco tiempo, trabajos como el de Jaimes, N. [et ál], 2005, denominado “control biomecánico de laderas en zonas mineras abandonadas utilizando pasto vetiver, el énfasis que dan los autores al uso de la especie en ese tipo de terrenos áridos, sin mayores nutrientes se debe a la capacidad de resiliencia de la especie, la fortaleza de penetración de las raíces en el suelo que se aferran a este con vigor, retienen sedimentos en los tallos y van mejorando la calidad del suelo retrasando los fenómenos de escorrentía todo lo cual refuerza la idea de apoyar el uso de la especie como control biomecánico, una apropiada técnica de bioingeniería en restauración de suelos erosionados y para detener procesos degradativos de este.

En el año 2013, se realiza la segunda conferencia regional latino americana en la ciudad de Medellín, Colombia. Como se puede apreciar es poco lo que se conoce de la metodología en el país y son compañías comerciales y privadas quienes principalmente hacen la aplicación del sistema vetiver, generalmente por contratos de concesión y llamados de urgencia para restaurar un talud erosionado que al desplomarse, generó algún tipo de alteración de tráfico en vías del país.

El trabajo desarrollado por Herrera, J. 2015, llamado Evaluación de parámetros de resistencia al corte en suelos de ladera cubiertos con pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en la vía Neiva-Vegalarga departamento del Huila, resalta la importancia de utilizar el sistema vetiver para aumentar la cobertura vegetal de superficie del suelo, controlar procesos erosivos, mejorar las condiciones de estabilidad de las partículas al interior de los suelos sirviendo de sistema de refuerzo a lo que se conocía como una ladera desnuda previamente. Basándose en estudiar la resistencia de las raíces en la resistencia al corte del suelo pudo demostrar un afianzamiento de las partículas del suelo sujetado por raíces profundas. Demostró una tendencia ascendente en términos de cohesión en función de deformación horizontal esto es que las raíces sujetan el suelo fuertemente y no lo dejan arrastrarse fácilmente y soportan altos niveles de tracción. Comenta la autora que la planta permite mayores deformaciones de una falla, pero sin permitir el colapso del talud. Todo lo anterior es una muestra más de lo recomendable que es la planta para hacer recuperación y control de taludes y suelos erosionados.

¹⁴ <http://www.vetiver.org/>. Es la página web creada para hacer publicos los diferentes casos de intervencion anivel mundial utilizando el sistema vetiver, y la cual nació en el año de 1997.

El documento escrito por Escobar, D. [et al] llamado Viabilidad de la implementación del pasto vetiver para la estabilización de taludes en Colombia período I, año 2014, presenta los beneficios ambientales y económicos que se pueden tener al utilizar el pasto vetiver para estabilizar los taludes, para lo cual presentó la aplicación y resultados de la técnica en otros países y la manera como podría utilizarse en territorio colombiano según el clima y geografía que se tiene. Dentro de los resultados expuestos, se comenta que el sistema radicular profundo permite retener y absorber el agua que se infiltra dando sustento a los suelos reduciendo el riesgo de colapso del talud.

Escoger la especie de pasto vetiver como una técnica de Bioingeniería para control de procesos erosivos en taludes basado en los que se ha escrito al respecto de los positivos resultados encontrados puede resultar eficiente, efectivo y económico siempre y cuando se estudien los orígenes y causas de la erosión de los suelos pudiendo ser aplicado de manera directa o acompañado por técnicas de ingeniería convencional.

En el caso específico donde se presentan taludes erosionados, desprovistos de capa vegetal y propensos a seguirse degradando se pudo observar que presentaban algunas similitudes por el mal uso del suelo que se había dado, estar situados en zonas a lado de carreteras y con regímenes climáticos fuertes. Para ambos casos las propuestas de restauración ecológica, control de erosión y manejo paisajístico incluían el uso de técnicas de Bioingeniería como apoyo a las de ingeniería convencional ya utilizadas en los sitios. En los dos casos debido a la inclinación de los taludes y para afianzar el crecimiento adecuado de las plántulas de vetiver se recomendó utilizar geo mallas en forma de panel de abejas que permiten hacer una retención mayor de suelo, dar fortaleza a la planta y fomentar el crecimiento radicular en el suelo. Esto permitiría aprovechar el moldeado que se dio a los taludes en terrazas para que una vez que las líneas de plántulas de vetiver estuviesen sembradas fomentarían la retención de suelos en las épocas de lluvia, demorando la escorrentía y mejorando las características del suelo, para después poder hacer siembras de especies nativas entre las filas del pasto vetiver.

2.1.6. Utilidad del pasto Vetiver en la Bioingeniería del Suelo

Utilizar estas técnicas de Bioingeniería aprovechando las cualidades del pasto vetiver, van de la mano con lo recomendado tanto por Banco Mundial como por muchas entidades internacionales que vienen aplicando con éxito esta especie en el control de suelos erosionados por ello es que este tipo de recuentos bibliográficos lo que hacen es demostrar la necesidad de ponernos a tono con las tendencias internacionales en beneficio del ambiente natural.

El uso y conocimiento del pasto Vetiver hasta antes de los años 80 era escaso hasta que Grimshaw lo comenzó a recomendar a través del Banco Mundial aunque el uso de este pasto en técnicas de bioingeniería para estabilización de taludes de carretera se ha hecho por más de medio siglo en sitios como las islas Mauricio, el Caribe, Fiji entre otros según (NRC, 1993).

Debido a que la ingeniería tradicional requería de pruebas tangibles de la resistencia del pasto vetiver en control de taludes erosionados autores como Hengchaovanich, 1999, en su documento de 15 años de la bioingeniería en los trópicos húmedos relata cómo se hicieron experimentos y pruebas para demostrar la fuerza de tensión de la raíces de esta planta comparada a otras plantas y en retener los suelos sin romperse con niveles de resistencia entre 40 y 120 mili pascales (MPa), haciendo comparable esta fuerza a instalar una red de hierro de similares características. El autor al igual que Mickovsky S.B., y L. H. van Beek, 2009¹⁵; Likitlersuang, S., B. Lohwongwatana, S. Vanno & S. Boonyananta. s.f¹⁶; y Teerawattanasuk, C., J. Maneecharoen , D. T. Bergado, P. Voottipruex & L. Gia Lam, 2014., entre otros hacen los respectivos análisis de la fortaleza de la raíz del vetiver concluyendo que lo abundante del manojito, la capilaridad que desarrolla y el entrelazado de estas raíces les permite generar alto grado de cohesión entre las partículas del suelo en mayor áreas siendo más efectivos en la retención y estabilidad de los taludes generando un control de los suelos. Comparativamente con sistemas artificiales como las puntillas de tierra (soil nails) no sufrirán procesos de corrosión como sí les pasa a estas y se fortalecerán con el pasar del tiempo.

2.2 Marco conceptual

En este ítem se hace una descripción detallada de los suelos en zonas tropicales y subtropicales, características de formación y estado, los tipos de suelos que tiene Colombia, los procesos que producen la erosión y desgaste de los mismos, los diferentes tipos de movimientos de suelo, las técnicas convencionales de manejo y control, de

¹⁵ Mickovsky S.B., y L. H. van Beek, 2009. Root morphology and effects on soil reinforcement and slope stability of young vetiver (*Vetiveria zizanioides*) plants grown in semi-arid climate. En el documento los autores hacen modelos que indicaron que las raíces del vetiver tienen un efecto positivo en la estabilidad de las terrazas aunque recomienda más investigación al respecto

¹⁶ Likitlersuang, S., B. Lohwongwatana, S. Vanno & S. Boonyananta. s.f. En este documento Los autores demuestran luego de pruebas como el rápido crecimiento y la profundidad de las raíces del vetiver logran aumentar la fortaleza al corte reteniendo notablemente las partículas del suelo. Mediante microscopía electrónica demostraron que el abundante manojito de raíces y sus capilaridades son importantes la lograr mayor cohesión con las partículas del suelo en áreas amplias mejorando así la estabilidad de los taludes.

taludes, una detallada descripción de las técnicas de bioingeniería para detener los procesos erosivos y dentro de ellas que es y cómo se maneja el pasto vetiver.

2.2.1 Tipos de suelos de las zonas tropicales y subtropicales

En la zonas tropicales y subtropicales las características de los suelos las originan las zonas geográficas a las que pertenecen, es así como las zonas tropicales que se ubican entre el trópico de cáncer y el trópico de capricornio (23°27' norte y sur), cubren cerca de 2 millones de hectáreas lo que equivale a un 38% de la superficie terrestre mundial (de acuerdo con Verheye, W. 2015).

La formación de suelos y sus propiedades dependen de los patrones de lluvias, siendo los de los trópicos: húmedos, profundos, y muy expuestos a las condiciones del clima: algunos de estos suelos se han desarrollado bajo agresivas condiciones de clima cálido (22°C promedio) con altos niveles de humedad, ya que permanecen húmedos durante todo el año; pero también hay otros suelos que siguen en proceso de formación. La humedad y temperatura generan degradación climática de tipo ferralítica y alítica.

Aquellos suelos cubiertos por el Bosque Lluvioso Tropical o por la sabana hecha por el hombre (luego de talas para siembra de pasturas y otros) se clasifican como Af (A- para Tropical y f- para Bosque Lluvioso) según Köppen.

Por otro lado los suelos de las zonas sub tropicales o sub húmedas poseen una estación seca de máximo 3 meses. Se clasifican según Köppen en climas tipo As, Am (A- para Tropical y m – para monsoon) o Aw (A- para Tropical y w – para sabana) y no están cubiertos por bosque o sabanas. Durante el periodo seco, el proceso de degradación climática se reduce y se caracteriza por ser ferralítico o fersialítico. Los suelos de esta zona son desarrollados bajo pedo climas secos.

En grandes extensiones del Asur de Asia, África, América Central y Sur América, se encuentran los suelos tropicales y sub tropicales. Debido a que el clima y los procesos físicos, químicos y biológicos son más agresivos durante todo el año, la formación de suelos en estas zonas es más intensa. Los niveles de lluvia en las zonas mencionadas alcanzan niveles de 1800 a 2000 mm anuales o más, y entre un 60 a 80% de esta agua penetran participando así en la formación del suelo. Entre tanto para el caso de las zonas subtropicales hay épocas secas definidas en las cuales no hay disponibilidad hídrica para los suelos.

En las zonas tropicales la temperatura del aire está entre 22 y 28°C, combinando esta temperatura con la humedad relativa del aire, se producen dos factores decisivos que afectan los procesos químicos y físicos en la formación del suelo (Verheye, W. 2015).

La sumatoria de todos los procesos anteriores genera diferencias importantes en los suelos de zonas tropicales y subtropicales:

- Los suelos de las zonas tropicales son bien desarrollados, con altos contenidos de arcillas.
- Los suelos de las zonas subtropicales están en proceso de formación con menor contenido de minerales formadores de arcillas como la caolinita.

2.2.2 Tipos de suelos en Colombia

Debido a que Colombia está localizada entre las zonas intertropical y ecuatorial se le considera un país húmedo y cálido en el 80% del territorio mientras que el otro 20% es seco. Al ser “mayoritariamente húmedo, el exceso de precipitación lava o lixiviana las bases que están en el suelo y cationes tales como calcio, magnesio, potasio y sodio, dejándoles condiciones ácidas”, según lo explica Malagón (2002)¹⁷. Contrariamente lo que se observa en la región Caribe y los valles interandinos es que posean condiciones básicas o alcalinas.

Los suelos de la región andina, reciben aportes de ceniza volcánica, pueden presentar procesos erosivos e inestabilidad, son suelos jóvenes de ciclo corto. Forman horizontes de capas oscuras llamados andisoles formadas por material de humus, cenizas acumuladas en forma de complejo mineral de adsorción orgánico que genera esa capa oscura.

Los suelos de la altillanura como Orinoquía y Amazonía presentan un paisaje de lomerío entre un 70 a 80% del terreno poseen mayor alteración, con menor cantidad de nutrientes, predominancia de materiales como óxidos de hierro y aluminio. Los suelos representados allí son ultisoles y oxisoles altamente evolucionados debido en parte a los climas húmedos con altas temperaturas. Los suelos de altillanura son de color rojizo y amarillento con cobertura de capa vegetal mínima. Estas tres regiones y sus suelos hacen parte de la mitad del territorio Colombiano.

¹⁷Malagón, D. (2002). *Los suelos de Colombia*. Boletín de la Sociedad Geográfica de Colombia. Como se pudo apreciar luego de hacer visitar los taludes en la vía Florencia – Huila. Los suelos de estas dos muy separadas y geográficamente diferentes zonas de Colombia son ácidos tal como lo describe Malagón en su documento.

La región Caribe, presenta suelos con arcilla expandible (vertisoles) y acumulación de sales y sodio (ardisoles) y los suelos muy productivos (molisoles).

La ubicación biogeográfica de Colombia permite tener una edafodiversidad¹⁸ amplia con múltiples funciones ecológicas, lo que facilita el desarrollo de distintos servicios ecosistémicos¹⁹. Es importante anotar que las condiciones climáticas tropicales de Colombia, aceleran el grado evolutivo del suelo, puesto que a mayor biodiversidad mayor consumo energético del geosistema, por lo que los suelos respondiendo al clima como factor formador dinámico del suelo, están en constante producción de vida, pero así mismo su envejecimiento es más acelerado, facilitando la erosión natural con mayor avidez. Dicho esto, el uso del suelo demanda mayor responsabilidad y entendimiento en sus funciones agroecológicas²⁰. La cobertura vegetal cumple funciones preponderantes para contrarrestar suelos intervenidos que facilitan la erosión antrópica. Con el pasto Vetiver, de acuerdo con las bondades mencionadas, resulta ser una propuesta interesante en el ejercicio del control de la erosión antrópica en obras lineales de infraestructura vial, lo cual además, mejora la armonía paisajística de estas obras ingenieriles.

2.2.3 Fenómenos de degradación de suelos y erosión

Los suelos sufren procesos de degradación y erosión que se deben principalmente a fenómenos naturales y antrópicos. Como se puede apreciar a continuación las definiciones varían muy poco acorde a diversos autores:

Según la definición de Suarez (1988)²¹, “la erosión comprende el desprendimiento, transporte y posterior depósito de materiales de suelo o roca por acción de la fuerza de un

¹⁸ “Edafodiversidad” (Ibañez et al., 1995), concepto que la comunidad científica ya ha adoptado; sin embargo, la población en general aun no lo conoce con suficiencia. Al desconocer los suelos, su diversidad y funciones es de entender que no exista la sensibilidad para conservarlos. Los suelos no los vemos a diario y no son un bien tangible aun cuando los suelos son fuente y protección de vida. La edafodiversidad o diversidad de suelos es un concepto muy útil para mostrar al público los diferentes taxones (grupos, órdenes, tipos, clases) y la diversidad de funciones ambientales en las que participan y/o regulan.”

¹⁹ Los servicios ecosistémicos hacen posible la vida humana, por ejemplo, al proporcionar alimentos nutritivos y agua limpia; al regular las enfermedades y el clima; al apoyar la polinización de los cultivos y la formación de suelos, y al ofrecer beneficios recreativos, culturales y espirituales. Si bien se estima que estos bienes tienen un valor de 125 billones de USD, no reciben la atención adecuada en las políticas y las normativas económicas, lo que significa que no se invierte lo suficiente en su protección y ordenación. En la siguiente sección, podrá obtener más información sobre los cuatro tipos de servicios que prestan los ecosistemas mundiales. La biodiversidad comprende tanto la diversidad dentro de una especie o un ecosistema como la diversidad entre especies o ecosistemas. Los cambios en la biodiversidad pueden influir en el suministro de servicios ecosistémicos. La biodiversidad, al igual que los servicios ecosistémicos, ha de protegerse y gestionarse de forma sostenible. Recuperado de: <http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/es/>.

²⁰ Montoya, G. (2016). Investigación postdoctoral: indicadores edafoclimáticos para la adaptación al cambio climático.

²¹ Suárez, J. (1998). Estabilidad de taludes y deslizamientos. En este documento se evidencia un proceso muy común en la degradación de suelos cuando estos están desnudos y poco protegidos como se evidenció en los taludes de montaña

fluido en movimiento; puede ser generada tanto por el agua como por el viento”. La definición que tiene Malagón (1988)²² “la erosión se sucede en forma (normal) o geológica y de manera acelerada, por acción del hombre. En los procesos erosivos actúan tanto el agua como el viento, con predominio del primero en el país”.

Rodríguez (2006) indica que los procesos erosivos que afectan la estabilidad de los taludes de montaña se puede dividir en: 1-Factores Internos de tipo, geológicos, geomorfológicos, geotécnicos y vegetación. 2- Factores externos de tipo: climatológicos, sísmicos y antropogénicos.

Según Poveda, J., et al, (2006)²³, los procesos erosivos se presentan generalmente como resultados de procesos geomorfológicos, físicos o humanos en taludes de montaña.

Según Wischmeir et all (1971) la erodabilidad en los suelos varía de la siguiente manera:

- Es baja en gravas bien gradadas.
- Es alta en limos uniformes y arenas finas.
- Decrece a medida que crecen los porcentajes de arcilla y contenidos orgánicos.
- Decrece en suelos con baja relación de vacíos y alto contenido de humedad.
- Se incrementa con aumentos del contenido de sodio (Na) en los suelos y decrece con el intercambio iónico del agua.

Los procesos geomorfológicos pueden ser originados por movimiento tectónico, actividad volcánica, socavación de la pata del talud por corrientes de agua, socavación de las márgenes de ríos, erosión subterránea (disolución, tubificación), carga por sedimentación en la cresta del talud o remoción de la vegetación (por talas, quemadas, sequía).

visitados en Caquetá, y Boyacá y es una situación común que se presenta en otras zonas del país como resultado de mal manejo.

²²Malagón, D. (1988). El recurso suelo en Colombia – inventario y problemática.-Es evidente ese proceso de degradación de los suelos por manejo inadecuado de los mismos como en el talud de la vía Florencia – Huila, donde un talud de inclinación superior a 55 grados con pasturas y casi ninguna presencia de especies arbóreas, se deshacía ante el pisoteo del ganado, y como resultado de lluvias intensas.

²³Poveda y Vargas, (2006). Estabilización del talud en el pr55 + 950 de la vía Manizales – Mariquita. Los tres procesos comunes, geomorfológicos, físicos y humanos son evidentes y fácilmente observables en casi todos los suelos de Colombia, y claramente fueron los causales del desprendimiento de los taludes en las dos zonas de trabajo revisadas en campo en Caquetá y Boyacá.

Los procesos físicos generalmente son el resultado de: lluvias intensas de corta duración, descongelamiento rápido de nieves perpetuas, precipitaciones prolongadas, desembalse rápido seguido de flujos, o rompimiento de presas naturales, terremotos, erupción volcánica, rompimiento de lagos en cráteres, deshielo, meteorización por congelamiento y posterior deshielo, meteorización por contracción y expansión de suelos.

Por su parte los que son originados como resultado de la actividad humana son entre otros: excavación de la pata del talud, carga de la cresta del talud, desembalse rápido de presas, irrigación, mantenimiento defectuoso del sistema de drenaje, escapes de agua de las tuberías, remoción de la vegetación por deforestación, explotación minera, disposición muy suelta de los rellenos de estériles, vibración artificial (por tráfico, hincado de pilotes, maquinaria pesada.), esto como resultado de actividades tales como ganadería, cultivos, construcción de carreteras, minería y otras obras de ingeniería entre otros.

De acuerdo con lo investigado por Malagón, 1988, el uso de la tierra en Colombia está repartida en: 4.7% de las tierras del país dedicadas a la agricultura, 35.1% para la ganadería, las dedicadas a bosque primario e intervenido poseen el 49.0%, el 10.7% son pantanos, ciénagas, rastrojos, pajonales, paramos y nieves perpetuas; solo el 1.3% son las zonas urbanas y aguas. Estos datos han cambiado ligeramente en el tiempo. Según Reyes, (2010), las tierras han tenido una ocupación, distribución y uso del territorio inadecuados, donde las mejores tierras que son valles irrigados fértiles se dejan para la ganadería mientras que la agricultura, tiene tierras insuficientemente aprovechadas desperdiçando un alto potencial (hasta tres veces su tamaño actual), y lo que más afecta a los suelos es precisamente una problemática social como es el desplazamiento de la población campesina a zonas de ladera de montaña, paramos y bosques tropicales cálidos, con daños a veces irreversibles sobre esos frágiles ecosistemas que por ser en sí mismos poco productivos para la agricultura, genera pobreza y hambre en los mismos campesinos cuando los labran.

2.2.4 Movimientos de suelos

Dentro de las diversas definiciones y explicaciones de movimientos de suelos resultantes de la degradación y erosión de los mismos se presentan autores como Herrera, J. (2015), Poveda y Vargas, (2006), la USGS, (2004), de los que se han tomado conceptos para las definiciones presentadas a continuación.

- **Desprendimientos**

Material desprendido de diversos tamaños en un talud de pendiente fuerte, a lo largo de una superficie, o simplemente en caída libre, desplazándose en saltos o rodando cuesta abajo. Se conocen dos tipos de desprendimientos:

- 1- Desprendimientos en bloque, producidos al fracturarse la masa de roca en un talud empinado desplomándose en caída libre en grandes pedazos desde el talud empinado (**Figura 1**).
- 2- Desprendimiento de partículas, trozos pequeños de material desprendido que caen a manera de cantos rodados en la base del talud (**Imagen 5**).



Fuente: Higland, L (USGS, 2004)

Figura 1. Desprendimientos.



Fuente: www.nacion.com.

Imagen 5. Desprendimientos en bloque y de partículas.

Este tipo de desprendimientos es común observarlos en los cortes de talud para carreteras y en zonas de explotación de materiales conocidas como canteras.

- **Inclinación o volcamiento**

Es un movimiento producido por la rotación hacia adelante de uno o varios bloques de roca, siendo el centro de giro por debajo del centro de gravedad de los bloques. Lo pueden generar el movimiento de bloques adyacentes, expansión de la roca, degradación hídrica y temblores. Estos pueden darse en pequeñas zonas o cubrir grandes extensiones. Son tres tipos: de volcamiento, de materiales residuales y de falla por volcamiento y desmoronamiento. (**Figura 2, Imagen 6**).



Fuente: Higland, L (USGS, 2004)

Figura 2. Volcamiento de roca

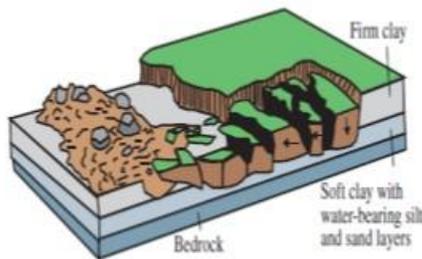


Fuente: www.forums.hardwarezone.com.sg

Imagen 6. Volcamiento de roca

- **Reptación**

Son movimientos poco notorios en el sub subsuelo que toman grandes periodos de tiempo siendo muy lentos o lentos, y pueden llegar a comprender grandes extensiones de terreno. El responsable de este tipo de movimientos es el clima cambiante súbito, secando o empanando los suelos de forma inmediata (**Figura 3, Imagen 7**).



Fuente: Higland, L (USGS, 2004)

Figura 3. Reptación.



Fuente: www.paisajesdltierra.blogspot.com

Imagen 7. Reptación de suelos en bosque.

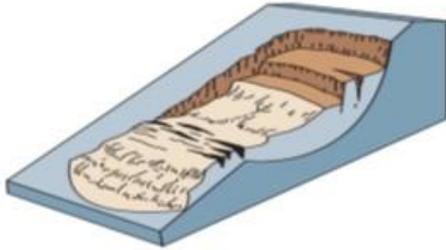
- **Deslizamiento**

En esencia son movimientos originados en los cortes de una falla, pudiendo darse en diferentes momentos y abarcando grandes extensiones. Puede moverse la masa de tierra de toda una falla o ser varias fallas las que producen su movimiento al tiempo. Este tipo de movimientos son propios de los rellenos, la deforestación, los cortes en taludes entre otros.

Deslizamiento rotacional

Es un movimiento de tipo rotacional producido alrededor de una falla con forma circular, los agrietamientos producidos son cóncavos y concéntricos y se desplazan en la misma dirección del movimiento de deslizamiento. Este movimiento se hace en dos fases,

primero en la parte superior se genera una depresión o hundimiento mientras que en la parte inferior se produce un deslizamiento viéndose un movimiento en forma de flujo de la masa de tierra en la base del talud (**Figura 4, Imagen 8**).



Fuente: Higland, L (USGS, 2004)

Figura 4. Deslizamiento rotacional

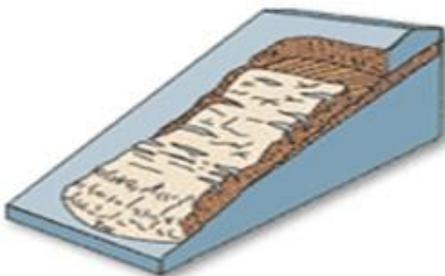


Higland, L (USGS, 2004)

Imagen 8. Deslizamiento rotacional

Deslizamiento traslacional

Se produce cuando la masa de tierra es desplazada hacia afuera o hacia abajo en la extensión de una superficie plana. Se produce porque son superficies débiles que han sufrido cambios en procesos de meteorización, por lo que se observan comúnmente en fallas, fracturas, entre otras. Es común ver estos movimientos cuando hay contacto entre la roca original y coluviones (**Figura 5, Imagen 9**).



Fuente: Higland, L (USGS, 2004).

Figura 5. Deslizamiento traslacional.



Fuente: Archivo personal.

Imagen 9. Deslizamiento traslacional.

- **Soliflucción lateral**

Se genera por lo que se denomina como extensión lateral de masa de tierra junto con mecanismo de falla donde se mezclan movimientos rotacionales, traslacionales y de flujo de tierra. El problema de este tipo de movimientos es que es tan lento que no es casi notorio. Se producen en suelos muy arcillosos o limosos, pero también en suelos rocosos. Se producen estos movimientos cuando los suelos absorben grandes cantidades de agua, sufren cortes, alteraciones en su composición.

Conocer cómo se llega a una degradación y erosión de los suelos y los movimientos masales de los mismos permitirá en este trabajo entender el uso del sistema vetiver por sí mismo o como apoyo, podrá ser o no un mecanismo eficiente para controlar estos procesos erosivos.

2.2.5 Técnicas convencionales de procesos de erosión y control de taludes

Una vez revisados los procesos de degradación y erosión de suelos más comunes, se presentan las estrategias más utilizadas para controlar esos procesos trabajadas desde la ingeniería convencional, esta búsqueda permite fortalecer la hipótesis que el pasto Vetiver es un tratamiento biológico muy útil y vanguardista para la ingeniería actual, aunque también se puede usar de manera combinada con la ingeniería convencional. Algunos de estas son:

- **Estructuras de contención**

Son básicamente utilizadas para detener pequeños deslizamientos y volcamientos en la pata o base de los taludes, también sirven para detener la ampliación de las fallas. Algunas estructuras de contención pueden ser:

Muros de contención o gravedad hechos en concreto. Por lo general son grandes estructuras hechas de concreto solido o mezclado con piedra o gravilla, que por su peso pueden ayudar a detener el movimiento de masas de tierra pero por su mismo diseño y las fuerzas que deben retener no se recomiendan que tengan más de 6 metros de altura (**Imagen 10**).

Muros de tierra reforzada. Hecho con material de relleno (arena, piedra)y capas de suelo de la zona. Se introduce el material de relleno en geotextiles o mallas que dan soporte sin tanto peso a la zona a proteger.

Muros de gaviones. Están formados por roca dura en pedazos, envueltas en malla de alambre galvanizado dándole un nivel importante de flexibilidad para soportar presión de suelos erosionados sin afectar su estructura original.

Muros de encofrado o cribas. Es una estructura hecha de celdas en madera que se rellenan de rocas y suelo con lo que adquieren peso necesario para trabajar como muro de contención. Al igual que los muros de concreto la altura máxima recomendada es de 6 metros (**Imagen 11**).



Fuente: www.asocreto.org.co

Imagen 10. Muro de Contención.



Fuente: www.neoweb.com.pl

Imagen 11. Muro de tierra reforzada.

Revestimiento de taludes. Se realiza con mezcla de piedras y mortero y se aplica generalmente en zonas de fácil desprendimiento, con ausencia de capa vegetal y arbórea. Son varios los tipos de revestimiento:

- **Con Vegetación.** Utilizando semillas mezcladas en el mortero, plántulas como pasto vetiver, leguminosas como maní forrajero e incluso cespedón de pasto.
- **Rígido liviano.** Son mallas metálicas ancladas sobre un talud previamente alisado y recubiertas con concreto lanzado.
- **Flexible.** Mallas metálicas ancladas con varillas y pernos que permitirán la caída o movimiento de rocas pero disminuyendo su velocidad y energía.
- **Rígido pesado.** Son entramados de concreto, bloques y pantallas de concreto que se funden directamente en el talud.

Anclajes en suelo y roca. Son tensores pre esforzados metálicos que ayudan a retener deslizamientos roca o de suelo. Pueden usarse solos o como refuerzo de estructuras de contención. Los más comunes son:

- **Anclajes en roca.** Controlan deslizamientos de rocas, taludes de suelos residuales y coluvios en los que se podrán amarrar cables de acero, cadenas y asegurados con pernos.
- **Soil nails o puntillas de tierra.** Se utilizan varillas de acero enclavadas en el talud, las cuales son aseguradas con pernos sobre una pantalla protectora de lechado de cemento que tienen la función de evitar la erosión sobre el suelo del talud (Ver imagen 12).
- **Pantallas ancladas.** Similares al anterior por que se vacía concreto en formaletas sobre el talud conformando un muro protector sujetado por varillas de concreto que se introducen en perforaciones hechas en cada placa y sujetas

al talud.

- **Pilotes.** Son estructuras tubulares enterradas verticalmente frente al área del deslizamiento. El material es de tablestacado para deslizamientos profundos o de concreto vaciado para deslizamientos poco profundos.

Las estructuras desarrolladas con ayuda de la ingeniería convencional son costosas, inertes y artificiales, son poco duraderas siendo vencidas por las fuerzas del agua, movimientos telúricos y la presión de los materiales que están conteniendo. Rivera (2015)²⁴ afirmó: “la ingeniería convencional del concreto, es puntual, no integral, es mono disciplinario, producto de ensayo y error, actúa sobre los efectos más no sobre las causas de los procesos degradativos, sus estructuras son rígidas, inertes y percederas, en el corto y mediano tiempo y muy costosas”(p.1). En estos casos se recurre a la utilización de metodologías de control de erosión con la ayuda de una rama derivada de la ingeniería denominada la Bioingeniería, todo lo cual se analizará más adelante en el desarrollo de este documento.

2.2.6 Técnicas de bioingeniería para control de taludes y erosión de suelos

La Bioingeniería de suelos es la utilización de plantas vivientes para desarrollar funciones de ingeniería (Oku y Aiyelari, 2011). En palabras de Rivera (2015), “La Bioingeniería difiere de la Ingeniería convencional, en el sentido que la primera, busca entender los procesos que originan la erosión y los deslizamientos, para lo cual se parte de un conocimiento integral y multidisciplinario de la problemática”. Lo que propone Rivera es que antes de hacer una intervención en un suelo erosionado se debe conocer a fondo todo lo que tiene relación con ese proceso erosivo, esto es desde cual es el material parental del que está hecho este suelo, que pendiente puede tener, si es inclinada o no, si esta vegetada o descubierta, el uso que tiene ese suelo por parte del hombre, si hay presencia de animales, o cultivos, cual es el clima de la zona, y que infraestructura se tiene instalada en la zona, para llegar a determinar las causas y los efectos de dicha degradación. Con esta información a mano se puede proceder a hacer un diagnóstico completo y saber cuáles son las posibles estrategias de manejo para darle un vuelco al estado degradado del suelo y conservarlo por medio de apropiadas técnicas de control que son naturales, se fortalecen con el tiempo, a la mitad o más de la mitad del costo de una obra de ingeniería convencional entre otras virtudes.

La utilización de estrategias de Bioingeniería, buscan reducir los problemas de erosión de suelos causados por uso inadecuado, desgaste y fenómenos naturales entre otros. Como

²⁴ Rivera, J. (2015). Experiencias de casos exitosos, con el uso de la bioingeniería en el control de problemas de erosión y movimientos masales. Es este documento se aprecia como estructuras rígidas y pesadas no logran contener la fuerza de una masa de tierra con el tiempo

tal la bioingeniería se basa en utilizar los aspectos biológicos para estabilizar el suelo a la vez que busca mejorar los aspectos ecológicos de este y de paso se desarrolla un manejo paisajístico de la zona intervenida.

Según Martínez et al (2013)²⁵, “Existen alrededor de más de 150 técnicas aplicables de bioingeniería, a fin de controlar la erosión y las consecuencias de la misma, es por ello que se convierte en un método ambiental y sostenible al utilizar materiales naturales”.

En el análisis de la bioingeniería se requiere tener en cuenta no solamente la ciencia de las plantas sino el comportamiento de los taludes y la mecánica de la erosión (Gray y Sotir, 1996), lo cual es importante porque al entender estos procesos se puede aplicar con mayor efectividad un control contra la erosión. (**Tabla 1**).

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los diversos tipos de planta

Tipo	Ventajas	Desventajas
Pastos	Versátiles y baratos; variedades para escoger con diferentes tolerancias; fácil de establecer; buena densidad de cobertura.	Raíces poco profundas y se requiere mantenimiento permanente.
Juncos	Crecen rápidamente y son fáciles de establecer en las riberas de ríos.	Difíciles de obtener y el sistema de plantación no es sencillo.
Hierbas	Raíz relativamente profunda.	Algunas veces son difíciles de establecer y no se consiguen raíces.
Arbustos	Variedades para escoger. Existen especies que se reproducen por estaca. Raíz profunda, buena cobertura, bajo mantenimiento.	Algunas veces son difíciles de establecer.
Arboles	Raíces profundas, no requieren mantenimiento.	Es demorado su establecimiento y generalmente son más costosos.

Fuente: Gray y Sotir, (1996)

Otra razón por la cual resultan interesantes las técnicas de Bioingeniería según Gray (1974) refirió:²⁶ “la disminución en las tasas de reptación puede obedecer al efecto de los árboles sobre la humedad superficial y al cambio de la estructura del suelo por acción de

²⁵ Alférez, L., E. Martínez y Miranda, R. (2013). La bioingeniería del suelo - modos y aplicaciones comunes. En este trabajo se han revisado varias de estas técnicas comparadas tanto contra ingeniería civil y con el sistema vetiver para ver cuál puede ser el más adecuado.

²⁶ Gray, D., H. (1974). Reinforcement and Stabilization of Soil by Vegetation. Es claro que en la medida en que se continua retirando la vegetación propia de los taludes para hacer terrenos de cultivo (especialmente monocultivos) o terrenos de pasturas para ganadería, se está propiciando una rápida degradación del suelo y su posterior erosión con los fenómenos comentados anteriormente.

las raíces” (p. 696). El movimiento de las raíces y el intercambio que estas tienen con las partículas del suelo, lo mantienen conformado y más estable en el tiempo.

Se entiende que cuando se hace una tala completa de la vegetación especialmente la arbórea con el fin de generar pasturas y zonas de siembra de cosecha, lo que se produce, es “una inestabilidad de las formaciones superficiales expresada por una gran cantidad de movimientos en masa”. En pendientes fuertes, parte de la estabilidad se debe al enraizamiento (Rice, 1977 citado por Florez, 1986), tanto por el anclaje vertical como por el horizontal (Gray, 1971, Dyrnes, 1967, citados por Florez, 1986) citados en Rivera, J. (2008).

Para Rivera, J. (2015) “en control de erosión y remociones masales, se debe evitar al máximo la afectación del terreno, conservando en el sitio toda la vegetación existente, ya que ella entra a ser parte de la solución del problema”. Esto tiene una gran validez teniendo en cuenta que son especies propias de la zona que en conjunto mantienen la calidad y agregación de las partículas del suelo, en parte por ello se está proponiendo que los suelos productivos se manejen por medio de técnicas más amigables como el silvopastoreo, la permacultura y otros, donde los suelos desnudos no son una opción.

Una de las ventajas que se puede encontrar en la bioingeniería del suelo, es que el tiempo es su aliado en el sentido de aumentar la resistencia y fortaleza de la obra construida, por el mismo crecimiento de la vegetación que al expandirse por el suelo ayuda a sostenerlo.

Para Resende, (1985), la formación de un centímetro de suelo en condiciones naturales, puede tardar entre 100 a 400 años aproximadamente. En Colombia “en la Zona Cafetera, se pueden perder hasta cinco centímetros de suelo en un año mediante desyerbas de los cultivos con azadón” (Suárez de Castro y Rodríguez, (1962)). Por tanto, si se logran entender los procesos intrínsecos relacionados con la erosión de los suelos se podrán aplicar las prácticas preventivas y de control que contrarresten la pérdida de suelos que tanto cuesta su desarrollo.

De acuerdo con Cortés, (1982)²⁷, en Colombia, el 75% del territorio Colombiano, estudiado (52'774,039 hectáreas) está entre las clases agrologicas VI, VII y VIII. En las Cordilleras Andinas donde está localizada la Zona Cafetera Colombiana, este porcentaje es del 89%, el cual debería ser utilizado con pastizales, bosques, áreas de recreación (parques nacionales) y como reserva forestal, siendo limitante, para cualquier otro tipo de cultivos productivos.

²⁷ Cortés, (1982). Geografía de los suelos en Colombia.

Según lo expresado por Barlatier De Mas, (1899); en Evette et al. (2009). “La naturaleza es pues un simbiote de esta bioingeniería, si se mantiene y crece y se cuida, se regenerará con el tiempo, pero si la vegetación muere, la protección desarrollada se desgastará. Se tendrán que hacer inversiones mayores no esperadas en recuperar nuevamente ese terreno”.

De acuerdo con lo que se ha observado con el mal manejo dado a los suelos en Colombia desde tiempos antiguos, el equivocado uso que se ha dado a los suelos y los tipos productivos están donde no deben situarse, generando daños y afectación en los suelos de la zona, a veces irreversibles. Analizando esta realidad se puede reforzar la idea de proponer que se utilice más las técnicas de Bioingeniería para proteger la capa de suelos y mejorar su calidad y que se tengan en cuenta recomendaciones de uso de suelos apropiadas.

De esta manera se aborda con mayor claridad la importancia de la utilización de las técnicas de bioingeniería de suelo, pero en sí ¿cómo se puede hacer la aplicación de la bioingeniería de suelos?

- **Algunos tipos de técnicas de Bioingeniería más utilizadas en control de taludes y erosión de suelos.**

Estas son algunas de las técnicas más utilizadas en el control de erosión de taludes de alta pendiente, basadas en los escritos de Suárez, J. (2001)²⁸:

- **Hidrosiembra.** Una maquina bombea una mezcla de semillas, nutrientes y agregantes tipo mortero sobre talud con
- **Estructuras vegetalizadas (cribas vivas).** Son esencialmente gaviones o muros criba con ramas o estacas vivas de plantas de estacas (bambú, guadua etc.)
- **Geomallas. Grama reforzada.** Las mallas sintéticas u orgánicas sirven de refuerzo para sostener el mulching y las semillas.
- **Biomantos.** Después de colocar la semilla y la fertilización se cubre el talud con una tela o biomanto de fibras orgánicas.
- **Mateado con hileras de bambú.** Se colocan horizontalmente ramas de bambú o guadua sostenidas por estacas y entre ellas se coloca suelo con nutrientes para el establecimiento de la vegetación.

²⁸ Suárez, J. (2001). Control de erosión en zonas tropicales. Instituto de Investigaciones sobre erosión y deslizamientos. Este importante documento explica los fenómenos que desencadenan la erosión y los deslizamientos y con detalle las diversas técnicas para controlar esos procesos.

- **Capas de enramados con o sin refuerzo.** Se colocan ramas de especies vivas entremezcladas con suelo y sostenidas en ocasiones por mallas de fibras sintéticas u orgánicas.
- **Cubiertas vivas.** El talud se cubre con un sistema de elementos de madera o bambú colocados horizontal y verticalmente, formando cajones los cuales se rellenan con ramas vivas y suelo.

La característica que tienen en común estas técnicas es la de generar una capa de protección de los suelos contra los efectos mecánicos de golpe de la gota de agua, que evita en el tiempo el arrastre de sedimentos.

La importancia, notoriedad y reconocimiento que ha alcanzado el sistema de pasto vetiver como una técnica de la Bioingeniería hace que se deba explicar y comentar por separado de las demás.

- **Sistema Vetiver como la principal técnica de Bioingeniería para control de taludes.**

Al igual que otras técnicas de bioingeniería la del sistema vetiver se ha utilizado en complemento con las de ingeniería civil o formal y en algunos casos como técnica única de control de erosión en taludes se ha trabajado con éxito en una gran cantidad de países en zonas tropicales y subtropicales.

La razón para ello está dada en un número importante de documentos e investigaciones en las que se resalta una longitud y fortaleza de raíz comprobada superior a los 4 metros que ayudan a amarrar y retener las partículas del suelo actuando de manera similar a una red de alambre, y en la parte superficial la estructura, en forma de macolla de esta planta retiene los suelos arrastrados por lluvias generando suelos depositados en la base de la planta y produciendo estructuras escalonadas tipo terraplén disminuyendo con el tiempo el deslave de los suelos. También se detalla la característica de no ser una especie alelopática, porque no compite con otras especies permitiendo el crecimiento de estas especies, a la vez que ayuda a mejorar las condiciones fisicoquímicas del suelo.

Según Luque, J. (2010), “el vetiver ha demostrado ser una alternativa ecológica eficiente en el control de procesos erosivos, la estabilización de suelos y la retención de sedimentos”. Los resultados de experiencias desarrolladas por este autor en suelos de Venezuela se analizaron en este documento siendo positivos sin requerir estructuras inertes de concreto y hierro, lo que será comentado posteriormente.

Según Eboli, J. (2013)²⁹ “la planta *Vetiveria zizanioides* puede rehabilitar y mantener taludes afectados por deslizamientos. Esto se debe a las propiedades de la planta de poseer raíces fuertes y largas equivalentes a las puntillas de tierra o soil nails”. Como se verá más adelante, en algunos artículos se realizaron investigaciones de fortaleza de la raíz, modos de crecimiento y manera de retener las partículas de suelo por parte del pasto vetiver, es comparable con mallas de hierro haciendo la misma labor.

Características del pasto vetiver. Es una gramínea perenne, hasta una altura de 2 m, con un sistema radical fuerte que crece verticalmente (en su mayoría) a profundidades hasta 5 metros. Naturalmente es una hidrófita, pero crece muy bien bajo condiciones xerófitas
Temperatura: Supervivencia: -9°C a más de 45° C Cuando el suelo se congela, se muere
En Colombia se ha logrado adaptar a temperaturas frías que en momentos bajan hasta –4°C, como es el caso de cultivos de agentes propagadores de Aguadas Caldas y Balboa Risaralda.

El crecimiento de Pasto Vetiver, es más rápido en climas cálidos, mientras en climas fríos es un poco más lento, pero su funcionamiento es mismo Humedad: Con manejo adecuado, utilizado en condiciones áridas (de 300 mm), pero de 700 mm por arriba es preferible

Resiste las sequías extremas, pero normalmente requiere un época de lluvias que dure por lo menos 3 meses. La condición idónea para su crecimiento es cuando las lluvias vienen regularmente durante el año. Crece mejor bajo condiciones húmedas, pero también comporta bien bajo condiciones de poca humedad. (Alegre, 2007).

Las características que hacen del vetiver una planta apta para la bioingeniería y ser aceptada como “segura” son las siguientes:

- No tiene semillas, y los estolones o rizomas no son invasivos, lo cual evita que la planta se convierta en maleza.
- La corona de la planta queda bajo el nivel del suelo, lo que le permite resistir incendios, pisoteo y ramoneo.
- Es capaz de formar setos en hilera densos y permanentes que actúan como un filtro y un difusor de energía ya que retienen la escorrentía y pérdida de suelos.
- Es perenne y de larga duración, puede quedar como un seto denso por décadas y solo crece en el sitio que se desea que crezca.
- Tiene tallos rígidos erectos que resisten flujos de agua de al menos 30 cm de

²⁹Eboli, J. 2011. Vetiver solution – a total success In landslide stabilization in Itaipava , Brazil.

profundidad.

- Posee características xerofíticas e hidrofíticas lo que los hace muy resistente a fenómenos naturales.
- Tiene un sistema radicular que penetra profundamente en el suelo, capaz de resistir las características de formación de túneles y de rompimiento o disgregación de los suelos. Las raíces penetran de manera vertical debajo de la planta hasta los 4.5 metros de profundidad.
- Es capaz de crecer en suelos con condiciones extremas de pH, sales, sulfatos y sodio y minerales tóxicos.
- Es capaz de desarrollar nuevas raíces desde los nódulos cuando queda sepultado por sedimentos, permitiéndole seguir creciendo desde ese nuevo nivel de suelo, hasta lograr formar nuevas terrazas naturales.
- No debe competir contra otras especies de plantas y cosechas a las cuales puede estar protegiendo
- No se ve afectado por plagas o enfermedades.
- Es capaz de crecer en un amplio rango de climas con niveles de lluvia menores a 300 mm a más de 6.000 mm, temperaturas que van desde los -15°C a más de 55°C. también es resistente a sequias superiores a los 6 meses una vez arraigado.

2.3 Marco legal - Normograma

El marco legal permite entender qué normas existen y cómo podrían aplicarse en las propuesta de revegetalización y manejo de erosión en suelos de talud. Aunque este documento hace una revisión y una discusión crítica en torno a técnicas diferentes en el manejo de suelos y control de erosión si se desea hacer un proceso aplicado, la consulta del nomograma descrito a continuación puede facilitar el trabajo a otros investigadores, ya que enmarcando sus trabajos dentro de la normativa nacional e internacional respecto al manejo de suelos y su recuperación se podrá adelantar un proceso con el soporte legal vigente para la restauración de suelos.

El normograma es simplemente una herramienta que permite organizar la normatividad que aplica a una institución, una organización (ayrgestion, 2016)³⁰. La utilidad del normograma es facilitar la lectura de las normas que pueden ser de utilidad para que se puedan implementar procesos de restauración de taludes y saber como sacar adelante dichos proyectos sin tener mayores complicaciones, permitiendo al usuario de esta herramienta consultarlas, estudiarlas y darles el uso adecuado.

³⁰ AyR gestión. ¿Qué es, para qué sirve, cómo estructurarlo y cómo usarlo? Recuperado de: <http://www.ayrgestion.com/index.php/publicaicones/editorial/128-rene-francisco-abello>

Con respecto a la normatividad legal que se debe tener en cuenta en manejo de taludes y control de erosión, a continuación se presenta en la tabla 4, un normograma definido por colores tipo semáforo indicando su relevancia con el tema de la restauración y manejo de suelos degradados por erosión donde pueden aplicarse técnicas de bioingeniería de la siguiente manera (

Tabla 2):

VERDE	AMARILLO	ROJO
Totalmente relevante con temas de restauración y control erosión de suelos.	Puede incidir en temas relacionados a restauración y control de suelos y ambiente natural	No tiene relación directa a temas de restauración y control de suelos y ambiente natural

Tabla 2. Normograma aplicable a la investigación

Norma	Número	Año	Entidad que lo expide	Descripción
Constitución Política de Colombia	Artículo 8	1991	Congreso de Colombia	“Es obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas culturales y naturales de la Nación” “Se garantizan la propiedad privada y los demás derechos adquiridos con arreglo a las leyes civiles, los cuales no pueden ser desconocidos ni vulnerados por leyes posteriores. Cuando de la aplicación de una ley expedida por motivo de utilidad pública o interés social, resultaren en conflicto los derechos de los particulares con la necesidad por ella reconocida, el interés privado deberá ceder al interés público o social. La propiedad es una función social que implica obligaciones. Como tal, le es inherente una función ecológica [...]”
Constitución Política de Colombia	Artículo 58	1991	Congreso de Colombia	“Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines”.
Constitución Política de Colombia	Artículo 79	1991	Congreso de Colombia	“El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas”.
Constitución Política de Colombia	Artículo 80	1991	Congreso de Colombia	Corresponde a los Concejos: “9. Dictar las normas necesarias para el control, la preservación y defensa del patrimonio ecológico y cultural del municipio”.
Constitución Política de Colombia	Artículo 313	1991	Congreso de Colombia	

Norma	Número	Año	Entidad que lo expide	Descripción
Ley	2	1959	Congreso de Colombia	“Sobre economía forestal de la Nación y conservación de recursos naturales renovables”.
Ley	23	1973	Congreso de Colombia	<p>Por la cual se conceden facultades extraordinarias al Presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y Protección al Medio Ambiente y se dictan otras disposiciones. Artículo 1. “Es objeto de la presente Ley prevenir y controlar la contaminación del medio ambiente y buscar el mejoramiento, conservación y restauración de los recursos naturales renovables [...]”.</p> <p>Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. “Artículo 2. Fundado en el principio de que el ambiente es patrimonio común de la humanidad y necesario para la supervivencia y el desarrollo económico y social de los pueblos, este Código tiene por objeto: 1. Lograr la preservación y restauración del ambiente y la conservación, mejoramiento y utilización racional de los recursos naturales renovables, según criterios de equidad que aseguran el desarrollo armónico del hombre y de dichos recursos, la disponibilidad permanente de estos, y la máxima participación social para beneficio de la salud y el bienestar de los presentes y futuros habitantes del territorio Nacional [...]”. “Artículo 13. “Con el objeto de fomentar la conservación, mejoramiento y restauración del ambiente y de los recursos naturales renovables, el Gobierno establecerá incentivos económicos”. Artículo 47. “Sin perjuicio de derechos legítimamente adquiridos por terceros o de las normas especiales de este Código, podrá declararse reservada una porción determinada o la totalidad de recursos naturales renovables de una región o zona cuando sea necesario para organizar o facilitar la prestación de un servicio público, adelantar programas de restauración, conservación o preservación de esos recursos y del ambiente, o cuando el Estado resuelva explotarlos [...]”. “Artículo 179. En la utilización de suelos se aplicarán normas técnicas de manejo para evitar su pérdida o degradación, lograr su recuperación y asegurar su conservación”</p> <p>“Artículo 182. Estarán sujetos a adecuación y restauración los suelos que se encuentren en alguna de las siguientes circunstancias:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Inexplotación si, en especiales condiciones de manejo, se pueden poner en utilización económica; b. Aplicación inadecuada que interfiera la estabilidad del ambiente; c. Sujeción a limitaciones físico-químicas o biológicas que afecten la productividad del suelo;
Decreto Ley	2811	1974	Congreso de Colombia	<p>“Artículo 182. Estarán sujetos a adecuación y restauración los suelos que se encuentren en alguna de las siguientes circunstancias:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Inexplotación si, en especiales condiciones de manejo, se pueden poner en utilización económica; b. Aplicación inadecuada que interfiera la estabilidad del ambiente; c. Sujeción a limitaciones físico-químicas o biológicas que afecten la productividad del suelo;

Norma	Número	Año	Entidad que lo expide	Descripción
				d. Explotación inadecuada”. “Artículo 183. Los proyectos de adecuación o restauración de suelos deberán fundamentarse en estudios técnicos de los cuales se induzca que no hay deterioro para los ecosistemas. Dichos proyectos requerirán aprobación”.
				Sección II. De administración y del uso. Artículo 332. “Las actividades permitidas en las áreas del Sistema de Parques Nacionales deberán realizarse de acuerdo con las siguientes definiciones: [...]
Ley	21	1991	Congreso de Colombia	f. De recuperación y control: son las actividades, estudios e investigaciones, para la restauración total o parcial de un ecosistema o para acumulación de elementos o materias que lo condicionan”. “Por medio de la cual se aprueba el Convenio número 169 sobre pueblos indígenas y tribales en países independientes, adoptado por la 76a reunión de la Conferencia General de la O.I.T., Ginebra, 1989”.
Ley	70	1993	Congreso de Colombia	“Por la cual se desarrolla el artículo transitorio 55 de la Constitución Política”. “Artículo 55. Se garantiza el derecho de negociación colectiva para regular las relaciones laborales, con las excepciones que señale la ley. Es deber del Estado promover la concertación y los demás medios para la solución pacífica de los conflictos colectivos de trabajo”.

Norma	Número	Año	Entidad que lo expide	Descripción
Ley	99	1993	Congreso de Colombia	<p>“Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones”. “Artículo 1. Principios generales ambientales: la política ambiental colombiana seguirá los siguientes principios generales: [...] 7. El Estado fomentará la incorporación de los costos ambientales y el uso de instrumentos económicos para la prevención, corrección y restauración del deterioro ambiental y para la conservación de los recursos naturales renovables”. Artículo 44. Porcentaje Ambiental de los Gravámenes a la Propiedad Inmueble: “[...] Las Corporaciones Autónomas Regionales destinarán recursos de que trata el presente artículo a la ejecución de programas y proyectos de protección o restauración del medio ambiente y los recursos naturales renovables, de acuerdo con los planes de desarrollo de los municipios del área de su jurisdicción [...]”. Artículo 96. Restricción de Destino de los Recursos del Fondo Ambiental de la Amazonía y del FONAM. “En ningún caso se podrán destinar los recursos de estos fondos para cubrir los costos que deban asumir los usuarios públicos o privados en la restauración, restitución o reparación de daños ambientales ocasionados por ellos, ni en la ejecución de obras o medidas que deban adelantar tales usuarios por orden la de entidad responsable del control”.</p>
Ley	152	1994	Congreso de Colombia	<p>“Por la cual se establece la Ley Orgánica del Plan de Desarrollo” Artículo 3. Los principios generales que rigen las actuaciones de las autoridades nacionales, regionales y territoriales en materia de planeación son: [...] h. Sustentabilidad ambiental. Para posibilitar un desarrollo socio - económico en armonía con el medio natural, los planes de desarrollo deberán considerar en sus estrategias, programas y proyectos, criterios que les permitan estimar costos y beneficios ambientales para definir las acciones que garanticen a las actuales y futuras generaciones una adecuada oferta ambiental”.</p>
Ley	164	1994	Congreso de Colombia	<p>“Por medio de la cual se aprueba la “Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático” hecha en Nueva York el 9 de mayo de 1992”.</p>

Norma	Número	Año	Entidad que lo expide	Descripción
Ley	165	1995	Congreso de Colombia	<p>“Por medio de la cual se aprueba el “Convenio sobre la Diversidad Biológica”, hecho en Río de Janeiro el 5 de junio de 1992”. Artículo 8. Conservación In Situ. Cada parte contratante, en la medida de lo posible y según proceda: [...] f. Rehabilitará y restaurará ecosistemas degradados y promoverá la recuperación de especies amenazadas, entre otras cosas mediante la elaboración y la aplicación de planes y otras estrategias de ordenación”</p> <p>Protege la flora colombiana y se reglamentan los jardines botánicos y se dictan otras disposiciones. Los jardines botánicos tienen entre sus objetivos primordiales contribuir a que la utilización de las especies de la flora y de los ecosistemas naturales se efectúe de tal manera que permita el uso y disfrute no solo para las actuales sino también para las futuras generaciones de habitantes del territorio colombiano, dentro del concepto del desarrollo sostenible. Así mismo, señala que los jardines botánicos establecerán programas especiales de arborización urbana, forestación y reforestación de cuencas hidrográficas.</p>
Ley	299	1996	Congreso de Colombia	<p>“Por la cual se modifica la Ley 9ª de 1989, y la Ley 3ª de 1991 y se dictan otras disposiciones”.</p>
Ley	357	1997	Congreso de Colombia	<p>“Por medio de la cual se aprueba la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas, suscrita en Ramsar el 2 de febrero de 1971”.</p>
Ley	388	1997	Congreso de Colombia	<p>Enfatiza el ordenamiento del territorio basado en la función social y ecológica de la propiedad, la prevalencia del interés general sobre el particular y la distribución equitativa de las cargas y los beneficios, y tiene por objeto complementar la planificación económica y social con la dimensión territorial, racionalizar las intervenciones sobre el territorio y orientar su desarrollo y aprovechamiento sostenible.</p>
Ley	461	2008	Congreso de Colombia	<p>Mediante la cual Colombia aprobó la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación y la Sequía.</p>
Ley	1333	2009	Congreso de Colombia	<p>“Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones”.</p>
Resolución	247	2007	Parques Nacionales Naturales	<p>Reglamenta el protocolo para los acuerdos transitorios de restauración con campesinos en las áreas del Sistema de Parques Nacionales Naturales</p>
Resolución	3000	1998	Instituto Nacional de Vías	<p>Por medio de la cual se adopta la política ambiental del Instituto Nacional de Vías.</p>

Norma	Número	Año	Entidad que lo expide	Descripción
Resolución	5865	1998	Instituto Nacional de Vías	Manual de diseño geométrico para carreteras
Resolución	63	2003	Instituto Nacional de Vías	Por la cual se fija el procedimiento para el trámite y otorgamiento de permisos para la ocupación temporal mediante la construcción de accesos, de tuberías, redes de servicios públicos, canalizaciones, obras destinadas a la seguridad vial, traslado de postes, cruce de redes eléctricas de alta, media o baja tensión, en la infraestructura vial nacional de carreteras concesionadas"
Resolución	3288	2007	Ministerio De Transporte	Especificaciones generales de construcción de carreteras
Decreto	3600	2007	Congreso de Colombia	Se regulan categorías de protección, desarrollo restringido y contenido de la unidad de planificación del suelo rural esto se logra reglamentando las leyes 99 del 93 y 388 del 2007.
Resolución	0170	2009		Por la cual se declara en Colombia el año 2009 como año de los suelos y el 17 de junio como Día Nacional de los Suelos y se adoptan medidas para la conservación y protección de los suelos en el territorio nacional.
Proyecto de acuerdo	230	2007	Consejo de Bogotá	Por el cual se ordena al gobierno distrital desarrollar gestiones tendientes a lograr la revegetalización de la franja de adecuación de los cerros orientales de Bogotá con especies nativas
Ley	105	1993	Congreso de Colombia	Por la cual se dictan disposiciones básicas sobre el transporte y sus Normas reglamentarias
Ley	70	1993	Congreso de Colombia	por la cual se desarrolla el artículo transitorio 55 de la Constitución Política para el derecho al reconocimiento de la propiedad colectiva
Ley	685	2001	Congreso de Colombia	Por el cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones y sus Normas reglamentarias.
Ley	842	2003	Congreso de Colombia	Por la cual se modifica la reglamentación del ejercicio de la ingeniería, de sus profesiones afines y de sus profesiones auxiliares, se adopta el código de ética profesional y se dictan otras disposiciones.
Ley	850	2003	Congreso de Colombia	Por la cual se reglamentan las veedurías ciudadanas.
Resolución	5282	2003	Instituto Nacional de Vías	por la cual se adopta el Manual de Interventoría en el Instituto Nacional de Vías.
Resolución	3157	2004	Dirección General Instituto Nacional de Vías	Por medio de la cual se establecen los criterios para la elaboración e implementación de planes de gestión socio predial con miras a compensar los impactos sociales generados en la adquisición de áreas requeridas para la ejecución de proyectos a cargo del Instituto Nacional de Vías.

Norma	Número	Año	Entidad que lo expide	Descripción
Resolución	3376	2010	Dirección General Instituto Nacional de Vías	Por medio de la cual se establecen las funciones de los supervisores de proyectos, de contratos de obra y consultoría.
Ley	80	1993	Congreso de Colombia	Por la cual se expide el Estatuto General de Contratación de la Administración Pública
Ley	361	1997	Congreso de Colombia	Por la cual se establecen mecanismos de integración social de las personas con limitación y se dictan otras disposiciones
Ley	418	1997	Congreso de Colombia	Por las cuales se consagran unos instrumentos para la búsqueda de la convivencia, la eficacia de la justicia y en materia de reincorporación a la sociedad civil.
Ley	548	1997	Congreso de Colombia	
Ley	782	1999	Congreso de Colombia	
Decreto	128	2002	Congreso de Colombia	
Ley	7418	2003	Congreso de Colombia	Por el cual se reglamenta la consulta previa con las comunidades
Decreto	1320	1998	Congreso de Colombia	
Ley	590	2000	Congreso de Colombia	
Ley	716	2001	Congreso de Colombia	
Ley	734	2002	Congreso de Colombia	Por la cual se expide el Código Disciplinario Único.
Ley	769	2002	Congreso de Colombia	Código Nacional de Tránsito y sus Normas reglamentarias.
Ley	789	2002	Congreso de Colombia	Por la cual se dictan normas para apoyar el empleo y ampliar la protección social y se modifican algunos artículos del Código Sustantivo del Trabajo.
Ley	816	2003	Congreso de Colombia	Por medio de la cual se apoya la Industria Nacional a través de la Contratación Pública.
Ley	828	2003	Congreso de Colombia	Por la cual se expiden normas para el control de la evasión del Sistema de Seguridad Social
Resolución	1101	2003	Dirección General Instituto Nacional de Vías	Por la cual se adopta el Manual de Gerencias Técnicas Comunitarias como norma para el desarrollo de las veedurías técnicas ejercidas en los proyectos a cargo del FONDO.
Resolución	4344	2004	Dirección General Instituto Nacional de Vías	Por la cual se reglamenta la competencia, el procedimiento, se fija los requisitos y se adoptan documentos modelo para la liquidación de los contratos celebrados por el FONDO, y se delega una facultad.
Decreto	2434	2006	Congreso de Colombia	Por la cual se reglamenta la Ley 80 de 1993, se modifica parcialmente el Decreto 2170 de 2002 y se

Norma	Número	Año	Entidad que lo expide	Descripción
				dictan otras disposiciones.
Resolución	950	2006	Dirección General Instituto Nacional de Vías	Por la cual se dicta una medida tendiente a mejorar la seguridad vial del país, reglamentando la zona de carretera utilizable.
Resolución	3662	2007	Instituto Nacional de Vías	Por medio de la cual se establecen las sanciones y se señalan las causales y cuantías para hacer efectiva la Cláusula de Multas en los contratos celebrados por el FONDO.
Ley	1150	2007	Congreso de Colombia	Por la cual se introducen medidas para la eficiencia y la transparencia en la Ley 80 de 1993 y se dictan disposiciones generales sobre la contratación con recursos públicos.
Decreto	66	2008	Congreso de Colombia	Por el cual se reglamenta parcialmente la Ley 1150 de 2007.
Decreto	2474	2008	Congreso de Colombia	Por el cual se reglamenta parcialmente la Ley 80 de 1993 y la Ley 1150 de 2007.
Resolución	3624	2011	Ministerio de Transporte	Por la cual, a partir de su vigencia, deberán instalarse con carácter obligatorio las vallas informativas. El FONDO suministrará la cantidad y la información requerida.

Fuente: Elaboración propia por el maestrando.

En Colombia en el año 2013 se desarrolla la política nacional para la gestión integral ambiental del suelo (GIAS)³¹, donde mediante el plan de acción de esta política se plantea un fortalecimiento institucional y la armonización de normas y políticas para el uso, gestión y manejo sostenible del suelo. En el documento los autores comentan que fue necesario desarrollar esta política debido a que hay una ausencia de coordinación institucional con relación a normas y políticas públicas para el manejo del suelo ya que hay cantidad de entidades que manejan temas relacionados pero que no se hablan entre si y no se articula un esquema de trabajo adecuado.

Esta situación es evidente hoy día en momentos en que se viene discutiendo la creación de indicadores de desarrollo sostenible para el país que deben ser reportados ante la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos – OCDE y respondiendo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible – ODS, también en talleres interinstitucionales se sigue viendo generación de esfuerzos repetidos, producción de información que no es

³¹ Política nacional para la gestión integral ambiental del suelo (GIAS). 2013. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Convenio Interadministrativo Número 25 de 2013 suscrito entre el MADS y la Universidad Nacional. Esta política es un interesante proceso para organizar los temas de manejo y protección del suelo que tiene un largo proceso por delante hasta generar normas y leyes pero sobretodo unificación de esfuerzos interinstitucionales.

conocida entre instituciones mucho menos concertada, y falta de comunicación entre entidades.

Con respecto a la normatividad legal que se debe tener en cuenta en manejo de taludes y control de erosión a continuación se presentan Leyes, Normas, Decretos.

Para el control de taludes y detectar daños sobre todo en carreteras y suelos aledaños a estas en Colombia, se creó el Convenio interadministrativo 587 de 2003 entre la Universidad Nacional de Colombia y el Instituto Nacional de Vías, para realizar la inspección y el reporte de daños que se puedan encontrar en las obras de estabilización de Taludes.

A nivel internacional, y debido a la importancia que se le da a la pérdida de suelos por erosión se han desarrollado estrategias legales robustas para combatir el fenómeno.

En el documento, Marco legal e institucional para los suelos sostenibles (traducción del nombre original en Ingles Legal and Institutional Frameworks for Sustainable Soils: A Preliminary Report) de Ian Hannam, I. y B. Boer. (2002),³² se muestran los diferentes temas relacionados a protección del suelo como son:

Las leyes nacionales, que en sus inicios y de manera equivocada en la mayoría de países se enfocaron a revisar el uso del suelo pero que no es lo apropiado para proteger el suelo. En esas épocas (décadas de los 80 y 90) se desarrollaron técnicas de conservación de suelos asociadas a la expansión de actividades de agricultura.

La legislación individual de más de 100 naciones fue revisada en el Marco Legal e Institucional para los Suelos Sostenibles y en cada nación la cantidad de normas puede ser amplia de acuerdo con los propósitos que tienen para manejo y protección de suelos. De manera general las leyes y normas poseen 8 categorías a saber:

1. Ley principal de conservación del suelo.
2. Protección de la tierra con el propósito de conservar suelos.
3. Protección de suelos en tierras de bosques y agricultura.

³² Ian Hannam with Ben Boer. (2002). Legal and Institutional Frameworks for Sustainable Soils: A Preliminary Report. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. xvi + 88 pp. Documento de alta importancia que da ideas de los protocolos y convenios internacionales en algunos de los cuales esta Colombia suscrita para dar cumplimiento a compromisos de protección de recursos naturales que están afectando sus suelos. Documento disponible en el sitio web: <https://portals.iucn.org/library/efiles/edocs/EPLP-045.pdf>

4. Legislación específica para el control de la erosión del suelo.
5. Legislación específica para el manejo de la contaminación del suelo.
6. Legislación para establecer comités y juntas en conservación del suelo.
7. Legislación para establecer instituciones o una autoridad en conservación del suelo.
8. Categorías misceláneas.

La mayoría de normas de este tipo pueden encontrarse en unos compendios llamados FAOLEX que es la base de datos de la FAO (Organización de Agricultura y Alimentos de las Naciones Unidas) y el ELIS que es el Sistema de Información de Leyes Ambientales de la IUCN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza – por sus siglas en inglés).

Los regímenes internacionales existentes para el manejo y protección de los suelos. Se habla puntualmente de la ley ambiental como elemento esencial para implementar las políticas ambientales y de desarrollo en ámbitos nacionales, regionales y globales, buscando atender problemas de suelos por degradación. Esta es la razón por la cual los países han venido firmando convenios, tratados y protocolos con relación al cambio climático, la biodiversidad, la desertificación, el comercio de especies amenazadas, de sustancias peligrosas, la capa de ozono y los humedales todas las cuales se relacionan de manera transversal con el uso del suelo.

Son temas como indicadores de la OCDE, la Agenda 21, Objetivos del Milenio y ahora Objetivos de Desarrollo Sostenible a los que las naciones deben apuntarle si quieren estar en el ámbito internacional sobre todo en momentos en los que se ven cambios drásticos que afectan sus propias economías, y bienestar de sus poblaciones. Por eso es que desde 1900 se han desarrollado más de 200 tratados, convenios y acuerdos ambientales multilaterales en temas que van desde protección de suelos, flora y fauna a protección de la identidad cultural y otros.

Existen instrumentos legales internacionales no vinculantes y vinculantes a los cuales las naciones están obligadas a cumplir con compromisos en caso de estar suscritas a tratados y convenios. Dentro de los instrumentos no vinculantes se encuentra la Declaración de Estocolmo de 1972 en la cual por primera vez se tocaron temas de lo que se llamó el Ambiente Humano y el Plan de acción para desarrollar el mismo. Luego de esta reunión se creó la UNEP o agencia para la protección ambiental de las Naciones Unidas que dio como resultado el dar a conocer el delicado estado de áreas deforestadas, degradación y desertificación de los suelos a nivel global que llegaron a proporciones alarmantes.

La Declaración de Río de 1992, reafirmó lo dicho en la de Estocolmo 1972 y crea tres capítulos para tratar los temas de degradación del suelo:

- El capítulo 8, que reseña los requisitos de manejo ambiental necesarios para implementar leyes y reglas efectivas.
- El capítulo 38, genera mandatos de acuerdos de Naciones Unidas y establece a la UNEP como órgano rector para temas ambientales colaborando con los países en desarrollar e implementar leyes, instrumentos legales, educación en temas ambientales.
- El capítulo 39 es uno de los más importantes porque hace énfasis en buscar el balance entre las leyes ambientales y el desarrollo y ver como se crean políticas eficaces para que esto se cumpla a través de acuerdos internacionales.

En Colombia, mediante el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018³³ se plantean dos de cinco estrategias transversales que son de impacto sobre los suelos: 1- la Infraestructura y competitividad estratégicas y la 3- Transformación del campo y crecimiento verde. Con la estrategia de infraestructura, se planea dar conectividad y comunicación a las regiones para impulsar el progreso económico y el aprovechamiento del comercio agropecuario, minero entre otros y para ello busca implementar la construcción de carreteras de cuarta generación, hacer investigación, innovación y aplicación de tecnología en varios frentes entre otros temas. La estrategia de transformación del campo busca disminuir la brecha entre lo rural y lo urbano en materia social, calidad de vida, educación, tenencia de tierra, pobreza y otros, para lo cual se debe reforzar la cartografía, catastro, títulos de propiedad todo alrededor del crecimiento verde, protegiendo el medio ambiente y conociendo aún más el estado de suelos y como protegerlos al generar una explotación de los recursos naturales de manera sostenible.

Se plantea que desde las regiones se de una orientación territorial específica, con un eje articulador propio y estas regiones tendrán roles puntuales:

Centro-Oriente: Conectividad para la integración; Centro-Sur: Desarrollo del campo y conservación ambiental; Llanos: Medio ambiente, agroindustria y desarrollo humano.

Colombia está buscando maneras de conocer su realidad ambiental, basarse en datos para poder generar políticas a posteriori y con fundamentos sobre temas como cantidad de

³³ Bases del Plan Nacional de Desarrollo. 2014-2018. DNP. Recuperado de: <https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/prensa/bases%20plan%20nacional%20de%20desarrollo%202014-2018.pdf>. Se esbozan allí las estrategias del Gobierno Nacional entre otras para hacer un adecuado manejo del territorio y de los recursos naturales, asociados al crecimiento social, y económico buscando reducir las brechas sociales.

hectáreas con problemas de erosión, degradación y mal manejo entre otros muchos temas, para lo cual se está trabajando en la identificación de indicadores ambientales con participación de la OCDE, el DNP y el DANE entre otras instituciones. Con este tipo de trabajos grupales interinstitucionales se puede lograr una mayor integración y coordinación de esfuerzos que van de la mano con lo propuesto tanto en el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018, como con la política nacional para la gestión integral ambiental del suelo (GIAS).

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en conjunto con el IDEAM mediante un convenio interadministrativo desarrollaron la propuesta para la gestión integral ambiental del recurso suelo (GIARS)³⁴, en el que buscan hacer un programa nacional de seguimiento a la degradación de suelos en Colombia y plantear estrategias para que sea implementado.

³⁴ Propuesta del programa nacional de monitoreo y seguimiento de la degradación de suelos y tierras en Colombia: Diseño estructura y estrategias para su implementación. (2012). Recuperado de: http://www.ideam.gov.co/documents/11769/153422/20121210_Propuesta_Programa_de_M%26SDS_Nov_23_12_v6.pdf/04ac8b73-303d-4d09-b2f5-9dc8b81b4f54

Capítulo 3. Metodología

Para la presente investigación se escogió el enfoque cualitativo de tipo exploratorio con un diseño no experimental de (Hernández, Fernández, Baptista pg 125-130).

Fase 1. Recopilación y selección de información bibliografica

Se hizo una selección bibliografica de entre 110 documentos consultados de los cuales se tomaron 80 mediante un método deductivo a los que se busco información refeten al suelo, su estructura, tipos y características; que se expliciara la erosion y los procesos que la producen; los métodos de control de taludes erosionados, desde la ingeniería convencional, la biotecnia, la bio ingeniería, las especies mas apropiadas para la bioingeniería y el uso del pasto vetiver en esta técnica de control de taludes. Se encontraron y seleccionaron documentos de Norte, Centro y Sur América, el Caribe, África, Madagascar, Europa, Medio Oriente, Asia y Oceanía.

Posteriormente se seleccionaro 30 documentos con la información más pertinente, apropiada y que tuviera similitudes en termininos de su iplementación en zonas climáticas tropicales y secas. Los 30 documentos seleccionados se les dio un color azul para diferenciarlos de la totalidad.

La manera de selección y el diseño para la misma se plasma en la **Tabla 3**, donde se puede detallar los sitios de procedencia de los documentos mas relevantes en color azul y algunas de las temáticas revisadas.

Tabla 3. Metodologia de selección de documentos por temática y procedencia.

Cantidad	Procedencia	Años	Temas
80	USA	1999 a 2015	<ul style="list-style-type: none"> Suelos de zonas tropicales y subtropicales. Protección del suelo y cultivos en ladera. Restauración de suelos. Estructuras de contención de taludes. Manejo ambiental de proyectos de infraestructura Bioingeniería. Bioingeniería y biotecnología. Control biomecánico de laderas.
30	BELIZE		
	GUATEMALA		
	EL SALVADOR		
	NICARAGUA		
Deductivo	COSTA RICA		
Erosión	COLOMBIA		
Métodos de control de erosión	VENEZUELA		
Clima T y S	PERU		
	BRASIL		
	CHILE		
	HAITÍ		
	CAMERÚN		
	CONGO		
	MADAGASCAR		
	ESPAÑA		
	ITALIA		
	GRECIA		
	ISRAEL		
	INDIA		
	NEPAL		
	TAILANDIA		
	VIETNAM		
	MALASIA		

Cantidad	Procedencia	Años	Temas
	SIRILANKA CHINA AUSTRALIA		<ul style="list-style-type: none"> • Usos del pasto vetiver en control de taludes. • Pruebas de fortaleza de la raíz del pasto vetiver. Geotropismo del pasto vetiver.

Fuente: Elaboración propia por el maestrando

Parte de la labor de consecución de información incluyó contactar directamente a personas que realizaron instalaciones del pasto vetiver como se ve en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Autores que compartieron sus artículos para este documento.

Documento tipo	Título	Fecha	Autor (es)	Descripción
Presentación	2ª Conferencia Latinoamericana em Sistemas Vetiver (laicvs 2) Tecnologia Verde para um Desenvolvimento Sustentável Medellín, Colombia, 2013	2013	João Henrique Eboli y Carmem Lucas Vieira	Presentación de resultados exitosos de la intervención del talud en una finca de Petrópolis, Brasil
Documento	Slope Stabilization in Itaipava- Petropolis, RJ, Brazil Using Vetiver Solution - A Total Success.	2012	Rogério, P., y Eboli, J.	Documento que relata el proceso de restauración de talud en Itaipava, Brasil.
Paper	Control de Erosión y Sedimentos con Sistemas Vetiver en Margen de Río, Taludes, Cárcavas y Minería	2013	José Gregorio Luque y Rafael Luque Mirabal	Este documnto es muy interesante por que hace relatos de resultados de la implementacion del sistema de pasto vetiver en taludes de rios, control de carcavas y restauracion de taludes de mineria.

Fuente: Elaboración propia por el maestrando.

Fase 2. Jerarquización de los principales documentos bibliográficos y normograma

Los 30 documentos que se seleccionaron por temáticas pasaron por un proceso arduo de pertinencia de la temática de interés, se determinó que se escogerían 10 documentos con los autores más citados y de mayor pertinencia en temas de control de taludes erosionados, que hubiesen presentado casos exitosos de implementación de las técnicas de control, en zonas geográficas con condiciones y características de suelo, sus usos, clima y otras que fuesen similares a las de la zona de influencia de la vía Florencia –Huila en el departamento del Caquetá, con el fin de determinar si se pueden replicar este tipo de montajes tal cmo se ve en la **tabla 5**.

Tabla 5. Metodo de jerarquización de documentos bibliográficos.

Cantidad	Procedencia	Años	Temas
10	COLOMBIA	1999 A 2015	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilización de cárcavas con pasto vetiver en Venezuela. • Estabilización de taludes, cárcavas, márgenes de ríos y zonas mineras en Venezuela. • Viabilidad de implementación del pasto vetiver para control de taludes en Colombia. • Bioingeniería en trópicos húmedos en Tailandia. • Restauración de cárcava en Talud de montaña superior a 60⁰ de inclinación en Brasil. • Morfología de las raíces del vetiver en suelos semiáridos en España. • Ingeniería biotécnica y bioingeniería para control de taludes erosionados en Colombia. • Efectos de la bioingeniería durabilidad de estructura de Ingeniería Civil.
Citado	VENEZUELA		
Éxito	BRASIL		
Clima Suelos	ESPAÑA		
Uso	NEPAL		
Similares	TAILANDIA		

Fuente: Elaboración propia por el maestrando.

Fase 3. Visitas a campo

Con ayuda de Green Terra SAS e Ingeos SAS las compañías que ofrecieron el contrato para hacer la propuesta de revegetalización de taludes, se planeó y realizó la visita de campo a los terrenos donde se produjeron los deslizamientos de tierra en la vía Florencia – Huila en los kilómetros 73 y 80 en inmediaciones de del departamento del Caquetá como (**imagen 12**).

Fase 4. Planteamiento de propuesta revegetalización de taludes.

De acuerdo con la información recolectada se comprendió que el suelo de la zona es de difícil manejo por el alto grado de erosión y exposición al clima. En los taludes de los kilómetros 73 y 80 se evidenció que las estructura contención eventualmente podrían ceder ante la masa de tierra del talud en la parte superior si este no se le hacia un proceso de protección y cobertura vegetal. Se propuso el uso de la bioingeniería para detener el proceso erosivo, controlar la escorrentía, evitar la formación de cárcavas y el posterior desprendimiento del suelo.

Se definió hacer una combinación de técnicas de bio ingeniería con ayuda del pasto vetiver y otras especies vegetales para que tuvieran la función de disipadores de energía, retenedores de las partículas de suelo y mejoradores de las condiciones, proporcionando una mayor cobertura a los suelos desnudos y una apariencia estética agradable al terreno.

Estas técnicas servirían de refuerzo y complemento a las estructuras inertes de la ingeniería convencional. Se presentaron dos propuestas diferentes para cada talud, en las cuales se explica claramente los pasos para hacer su montaje.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Selección de documentos

En la siguiente tabla se presentan 30 de los documentos más representativos para la temática de suelos, erosión, técnicas de control desde la ingeniería convencional, la bioingeniería y el uso del pasto vetiver. Se organizaron por título, fecha, autor, y breve descripción y con el color azul se identifican aquellos que se escogieron por importancia y relevancia a este documento como se ve en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Selección de documentos bibliográficos más representativos

Número	Título	Fecha	Autor (es)	Descripción
1	The Practical Streambank Bioengineering Guide	1998	Bentrup, G. and J. Hoag	Guía práctica para desarrollar control de erosión en bancadas de ríos utilizando técnicas de bioingeniería, con énfasis en control de suelos erosionados de zonas áridas y semi áridas de Estados Unidos. Hace un interesante repaso de las diversas técnicas de bioingeniería aplicada incluyendo un listado de especies de plantas y sus características principales.
2	Técnicas para prevenir derrumbes	2008	Fuentes, L.	Artículo que describe las bondades de la enseñanza de técnicas de bioingeniería a los pobladores de Villa Rica en Valle del Cauca para hacer control de erosión de taludes. EL objetivo del documento es demostrar el empoderamiento de la comunidad en el uso de dichas técnicas para proteger los suelos de ladera donde están asentados sus hogares y terrenos productivos.

Número	Título	Fecha	Autor (es)	Descripción
3	15 years of bio engineering in the wet tropics	1999	Hengchaovanich, D.	Documento que se presentó en la primera conferencia Asia-Pacífico sobre la bioingeniería de tierra y de agua. Hace un recuento de los trabajos realizados en una zona del cinturón monzónico del sur este asiático, que presenta altos niveles de erosión de suelos e inestabilidad por la alta pluviosidad donde la ingeniería convencional ha ido siendo reemplazada por la bioingeniería y específicamente con el uso del pasto vetiver debido a sus cualidades de fortaleza, rapidez de crecimiento y durabilidad en el tiempo entre otras.
4	Soil Bioengineering An Alternative for Roadside Management	2000	Lewis, L.	Guía práctica de uso de técnicas de bioingeniería para realizar labores de control de taludes de carretera erosionados. Son técnicas que no cuentan con la aplicación de pasto vetiver, sin embargo explican en detalle cómo puede hacerse el montaje uso de cada uno y cuáles son sus ventajas y manejo.
5	Soil bioengineering for risk mitigation and environmental restoration in a humid tropical area	2010	Petrone, A. and F. Preti.	Artículo científico que busca hacer tipología de suelos y montaje de 4 tipos de técnicas de bioingeniería que se pueden aplicar en control de erosión utilizando especies autóctonas en el trópico húmedo de Nicaragua. En este trabajo se compararon sistemas de crecimiento de las especies <i>Erythrina fusca</i> , <i>Gliricidia sepium</i> y <i>Tabebuia rosea</i> . Se comprobó que de las tres especies la <i>G. sepium</i> presentó una supervivencia de los cortes de planta sembrados de 100% luego de 18 meses. Determinaron que <i>G. sepium</i> y la <i>E. fusca</i> son más apropiadas para control de taludes mientras que la <i>T. rosea</i> es más apta para las bancas de ríos

Número	Título	Fecha	Autor (es)	Descripción
6	Trees and shrubs as invasive alien species – a global review	2011	Richardson, D., and M, Rejmánek	Artículo científico que discute sobre lo que son especies de árboles y arbustos invasivos, sus modos de dispersión y otras características poniendo en contexto este tema. Se revisó para ver el contexto de lo que son especies invasivas y de lo cual el pasto vetiver no cumple dicho parámetro, al no poderse reproducir mediante semilla, solo por siembra de esquejes.
7	Vetiver system: green technology for stabilization and rehabilitation of slopes	2009	Eboli, J. and C. Vieira.	Documento que relata la intervención exitosa con pasto Vetiver realizada sobre un talud de montaña erosionado y desestabilizado por lluvias intensas en el año 2008 en Itapaiva, Petropolis, Brasil. Donde se recuperó un talud que presento un deslizamiento de cárcava de 1840 m ² con una inclinación de pendiente del 44° en la parte alta y de 67° en la parte baja con la instalación del pasto vetiver como principal técnica de bioingeniería.
8	Experiencias en la estabilización de una gran cárcava en terrenos de los manantiales de agua minalba - Venezuela	2012	Luque, R., O. Luque y G. Posada.	Documento que describe la manera como se hizo control efectivo en suelos erosionados y cárcava en una zona del Parque Nacional de Maracao en, Miranda, Venezuela. La obra se hizo en 2009 y se le realizo seguimiento de resultados hasta 2011. Se demostró la fortaleza de la planta no solo reteniendo suelos sino mejorando la condición del talud intervenido produciéndose resultados de control de la cárcava en solo un año.
9	Control de erosión y sedimentos con sistemas vetiver en margen de río, taludes, cárcavas y minería en Venezuela.	2012	Luque, R., y J. Luque.	Recuento de procesos exitosos de montaje del sistema vetiver para control de erosión en taludes, márgenes de río, cárcavas de montaña y zonas de minería en Venezuela durante un periodo de 12 años. Se hace una descripción de la especie y las diversas maneras como se abordaron los procesos de siembra de la especie

Número	Título	Fecha	Autor (es)	Descripción
				para controlar la erosión en los sitios anteriormente nombrados.
10	Productive Rural Infrastructure Sector Project in the Central Highlands of Vietnam – Bioengineering report.	2012	Asian Development Bank - ADB	Reporte hecho por el ADB sobre la utilización de técnicas de bioingeniería en contraste con las de ingeniería convencional, para controlar suelos erosionados en las zonas de ladera y montaña en Vietnam. Se describen la manera de escoger las técnicas y especies a sembrar y se generan recomendaciones de uso para su desempeño exitoso en el tiempo. Definen los autores que la manera de mayor beneficio costo de proteger un talud de la erosión y deslizamiento es a través de las técnicas bioingeniería.
11	Ingeniería biotécnica y bioingeniería. nuevas tendencias de la geotecnia para las obras de tierra, la estabilización de taludes y el control de la erosión.	2002	Centeno, F.	Recuento de las diversas experiencias desarrolladas en torno a la estabilización de taludes y control de erosión de suelos con la utilización de la biotécnica y la bioingeniería, en las cuales las dos comparten el uso de material vegetal vivo para dar mayor firmeza y duración en el tiempo al talud con la diferencia del uso de estructuras inertes prefabricadas de la biotécnica.
12	Restauración y revegetación de taludes de carreteras en ambientes mediterráneos semi - áridos: procesos edáficos determinantes para el éxito	2009	Tormo, J., E. Brochet y P. García – Fallos.	El documento trata específicamente la problemática presentada por los taludes de carretera que por sus características de conformación y gradientes de inclinación es difícil que permanezcan naturalmente cubiertos con especies vegetales. Se hacen propuestas de siembras y mejoras edáficas para hacer control de erosión con el apoyo de técnicas ingenieriles.
13	Plan Nacional de Restauración: restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de áreas disturbadas.	2015.	Vanegas, S., Ospina, O., Escobar, G., Ramírez, W., y J. Sánchez.	Documento originado en el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible que da las pautas de manejo e implementación de la Política Nacional Para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Eco Sistémicos (PNGIBSE) y de la política forestal (plan nacional de

Número	Título	Fecha	Autor (es)	Descripción
				desarrollo forestal). Con la idea de proteger los ecosistemas desde el ámbito marino hasta los páramos haciendo propuestas de manejo de los suelos y controlar la erosión de los mismos.
14	Efectividad de la bioingeniería para el tratamiento de la erosión y los movimientos en masa en laderas	2014	Flórez, G.	Tesis de maestría hecha con el objetivo de comparar la problemática de la erosión en tres regiones de del Departamento de Caldas para determinar el nivel de efectividad del uso del pasto vetiver como técnica de bioingeniería para controlar la erosión en taludes de ladera en tiempo y espacio y mostrar un análisis de costos de estas técnicas.
15	Experiencias en Bioingeniería implementando el uso del vetiver (Vetiveria zizanioides, (L) Nash) en diferentes localidades de Venezuela	2014	Gomis, C.	En este documento se hace un recuento de experiencias exitosas con la implementación del sistema vetiver como técnica de bioingeniería en diversas zonas con características diferentes de climas, suelos e inclinaciones de talud en Venezuela entre los años 2000 a 2006.
16	Evaluación de parámetros de resistencia al corte en suelos de ladera cubiertos con pasto vetiver (Chrysopogon zizanioides) en la vía neiva-vegalarga departamento del huila. Trabajo de grado	2015.	Herrera, J.	Documento que explora por diferentes métodos las fortaleza de la raíz del pasto vetiver a los fenómenos de corte con el fin de establecer su viabilidad de uso para manejo de taludes de ladera erosionados en inmediaciones del departamento del Huila.
17	Bioengineering: An Innovative Approach towards Sustainability of Civil Engineering Structures.	2011.	Dipendra, G.	Documento científico que hace una breve pero profunda descripción de la bioingeniería en un contexto inicialmente histórico, su aplicación y metodología específicamente en Nepal y los resultados que ha tenido su utilización en el control de taludes erosionados teniendo en cuenta la dificultad del terreno y lo hiper poblado de las zonas de ladera y la pobre infraestructura con que se cuenta.

Número	Título	Fecha	Autor (es)	Descripción
18	Extreme Slope Stabilization Using Vetiver System	2014	Truong, P.	El documento presenta los resultados exitosos comprobados mediante fotografías de montajes de pasto vetiver en diferentes partes del mundo. Muestra la importante característica de la raíz del pasto y como esta puede tomar geotropismo positivo así se siembra lateral al talud. Se presenta el tipo de montajes en taludes de pared casi vertical, de suelos complejos como arenas deslebles en Australia, el uso de ecomortero en Colombia que retiene los suelos pero permite el desarrollo pleno del pasto vetiver en nichos. Y de esta manera se presentan casos en Asia, America, Africa, Madagascar y otros sitios.
19	La bioingeniería del suelo -modos y aplicaciones comunes-	2013.	Alfárez, L., E. Martínez., y R. Miranda.	Documento que hace un recuento de los orígenes de la bioingeniería, sus usos y principales técnicas y mostrando una DOFA entre ellas para ver cuál podría ser más apropiada en control de erosión de taludes.
20	Elaboración de un manual con ejercicios para la estabilización de taludes utilizando estructuras de contención	2008	Oquendo, D., y A. Quintero.	Tesis de grado donde se desarrolla un manual con una metodología para el diseño de estructuras de contención y estabilización de taludes, presentando ventajas y desventajas al momento de escoger la estructura que mejor se ajusta a las condiciones generales del Proyecto.
21	Growth management of vetiver (<i>Vetiveria zizanioides</i>) under Mediterranean conditions	2008	Dudai, N., E. Putievsky., D. Chaimovitch and M. Ben-Hur.	El documento busca determinar por qué el vetiver no se utiliza en la región mediterránea, y determinar las condiciones de crecimiento para esa región. Para ello desarrollan una serie de experimentos en invernadero que les dan ideas de cómo hacer el montaje de la misma en la zona y como podría resistir condiciones de sequía temporales, dando patrones para su implementación.

Número	Título	Fecha	Autor (es)	Descripción
22	Manual para la inspección visual de obras de estabilización	2006	Grupo Técnico – convenio 587 de 2003 Universidad Nacional - INVIAS	Manual que explica detalladamente los daños en infraestructura vial y cuáles son las técnicas más apropiadas para su estabilización.
23	Root systems of native shrubs and trees in Hong Kong and their effects on enhancing slope stability	2015	Lueung, F., W. Yan., B. Haun and Tham, L.	El estudio determino entender la importancia de las raíces de arbustos y árboles en la estabilidad de los suelos de talud, para lo cual trabajaron con dos especies nativas de arbustos y dos de árboles en Hong Kong, en múltiples taludes con y sin vegetación y bajo dos escenarios hidrológicos (taludes húmedos y secos).
24	Root morphology and effects on soil reinforcement and slope stability of young vetiver (<i>Vetiveria zizanioides</i>) plants grown in semi-arid climate	2009	Mickovski, S. B. & van Beek, L. P. H.	Esta investigación se realizó para determinar el sistema morfológico de la raíz del vetiver, que crecía en una mina abandonada del sur de España. A esto también se le determinó, la distribución de la raíz con la profundidad lateral desde la planta y la fortaleza tensora. Se encontró que la raíz en un suelo tan limitado en nutrientes y con condiciones de lluvia bajas se distribuye más ampliamente en profundidades de 0.3 m, para maximizar el aprovechamiento del escaso alimento, por lo tanto afectó la morfología de la raíz en esas condiciones comparados a sitios más húmedos y de suelos menos endurecidos de zonas tropicales. Para lograr estos análisis de las raíces usaron el método de perfil de pared y el de excavación de bloque. Ambos son métodos buenos pero no perfectos por que pueden afectar conteo de raíz y no dar cuenta totalmente real de hasta donde se extiende esta, por lo que recomiendan usar tecnología de escaneo 3D. Concluyen que la raíz de vetiver en crecimiento vertical si puede penetrar y reforzar el suelo adyacente. Aunque las condiciones de suelo y clima extremos limitaron el crecimiento

Número	Título	Fecha	Autor (es)	Descripción
				de la raíz, este trabajo presentó pruebas de resistencia muy altas al corte y la ruptura. En comparación con otros pastos los niveles de cohesión con las partículas de suelo son muy altos.
25	Técnicas de mitigación para el control de deslizamientos en taludes y su aplicación a un caso específico	2006	Alberti, J., Canales y Elizabeth.	Este trabajo recopila la información sobre técnicas de mitigación de deslizamientos en taludes que podrían ser aplicables en el Salvador, como desarrollar los proyectos y sus costos.
26	Viabilidad de la implementación del pasto vetiver para la estabilización de taludes en Colombia periodo 1, año 2104	2014	Escobar D.E., Orduña, L.	El documento realizado busca describir el control exitoso en la estabilización de taludes, su adaptabilidad a las condiciones climáticas y de suelo en Colombia y como puede llegar a ser más eficiente que las técnicas de ingeniería convencional a una diferencia de costos notoriamente bajo
27	Laboratory investigation of vetiver root reinforcement for slope protection	s.f.	Likitlersuang, S., B. Lohwongwatana, S. Vanno & S. Boonyananta.	Los autores demuestran luego de pruebas como el rápido crecimiento y la profundidad de las raíces del vetiver logra aumentar la fortaleza al corte reteniendo notablemente las partículas del suelo. Mediante microscopia electrónica demostraron que el abundante manojo de raíces y sus capilaridades son importantes la lograr mayor cohesión con las partículas del suelo en áreas amplias mejorando así la estabilidad de los taludes.
28	Root strength measurements of vetiver and ruzi grasses.	2014	Teerawattanasuk, C., J. Maneecharoen , D. T. Bergado, P. Voottipruex & L. Gia Lam	Comparación entre los pastos vetiver y ruzi para determinar cuál de los dos es más fuerte en generar cohesión y retención de suelos y cómo se comportan combinados sobre el sustrato. Se estudia este comportamiento durante un periodo de 6 meses.

Número	Título	Fecha	Autor (es)	Descripción
29	Experimental research for riverbank restoration by using soil bioengineering	2012	Gu L, Gao J, Liu Y, Wang Y, Qian B	Documentan el uso de la especie <i>Salix alba</i> de la variedad Tristis para hacer un control de bancada del río Huaijiu en Beijing, China, como técnica de bioingeniería. Dan cuenta de los buenos resultados y de cómo la técnica logró una restauración casi natural de la bancada.
30	Soil Bioengineering Measures in Latin America: Autochthonal Cuttings Suitability. Landslide science and practice	2013	Petrone, A., y F. Preti.	El documento hace el recuento del uso de especies nativas 4 (<i>Brugmansia versicolor</i> , <i>Euphorbia continifolia</i> , <i>Malvaviscus pendiliflorus</i> y <i>Trichantera gigantea</i>) en una zona deprimida en Ecuador para enseñar a los pobladores a controlar naturalmente los taludes y evitar los deslizamientos de tierra por medio de cercas vivas.

Fuente: Elaboración propia por el maestrando.

Nota: De la anterior revisión de documentos se seleccionaron en color azul aquellos que tienen mayor importancia y relevancia para el análisis de resultados de este trabajo porque son los que más se comparan a las propuestas de control de erosión y revegetalización en territorio colombiano, en Florencia, Caquetá, por los resultados exitosos de su aplicación, por el haber utilizado en la mayoría de ellos con excelentes resultados a la especie vetiver y por qué se acomodan en tema de costos más que el uso de técnicas de ingeniería convencional.

4.2 Jerarquización de documentos

Los diez documentos que presentaron mayor relevancia, cuyo autor fuese de los más citados y donde los trabajos de implementación fueron exitosos en sitios con características de climas y suelos semejantes a la zona de Florencia, Caquetá se organizaron en la (**Tabla 7**).

Tabla 7. Documentos más aplicables al territorio colombiano específicamente Florencia, Caquetá

Documento	Como se aplica a las dos zonas de propuesta de manejo de taludes	Jerarquización por aplicación
Experiencias en la estabilización de una gran cárcava en terrenos de los manantiales de agua minalba - Venezuela	Este documento es importante porque explica como en un talud de carretera el mal manejo de las aguas de escorrentía generó la erosión y con la ayuda de las plantas de vetiver se dio sujeción al suelo conteniendo el talud en menos de un año lo cual puede ser replicable en la propuesta de interés de este documento. Las recomendaciones de cuidado y mantenimiento que se tienen para el establecimiento del vetiver pueden bien funcionar en taludes similares en el territorio colombiano.	1
Control de erosión y sedimentos con sistemas vetiver en margen de río, taludes, cárcavas y minería en Venezuela.	Es un documento clave por la similitud de suelos que se tiene con los de Caquetá, y porque hace una presentación de diversas aplicaciones del sistema vetiver en las márgenes de un río torrentoso con resultados exitosos, propiciando el desarrollo del bosque originario de la zona por las propiedades de mejora de suelos que ofrece la pasto vetiver, en un terreno ya presentaba agotamiento de nutrientes, por haber sido mina a cielo abierto.	2
15 years of bio engineering in the wet tropics	Por ser una serie de trabajos realizados en zonas tropicales húmedas, es apropiado tomar resultados de este documento para hacer una réplica de montaje con características similares en Florencia, Caquetá, ya que esta zona también el comportamiento de lluvias es intenso, el suelo es deleznable como en del sur este asiático. En cuanto al uso del vetiver como especie principal para hacer montajes de bioingeniería controlando la erosión de los taludes, es totalmente aplicable el tipo de resultados al talud de Florencia, Caquetá.	3
Viabilidad de la implementación del pasto vetiver para la estabilización de taludes en Colombia periodo 1, año 2104	Es uno de los documentos de mayor utilidad para este trabajo por que determinó que el pasto vetiver si es una planta potencialmente resistente a las condiciones climáticas y de suelo en Colombia a las cuales puede adaptarse perfectamente luego de verificar similitudes en experiencias desarrolladas en países diversos.	4

Documento	Como se aplica a las dos zonas de propuesta de manejo de taludes	Jerarquización por aplicación
Vetiver system: green technology for stabilization and rehabilitation of slopes	Este documento se escoge porque el tamaño de la cárcava que fue intervenida y controlada en Petropolis, Brasil, tiene características similares a las de los terrenos donde se hizo la propuesta ya que son de gran tamaño y se intervinieron con ayuda de la ingeniería convencional. En cuanto al tema de lluvias intensas es una característica compartida con Florencia. La especie que se escoge en este documento es aplicable ya que es el pasto vetiver donde se describe la manera como retuvo los suelos de ese talud que poseía inclinaciones cercanas al 60%.	5
Root morphology and effects on soil reinforcement and slope stability of young vetiver (<i>Vetiveria zizanioides</i>) plants grown in semi-arid climate.	Importante y muy apropiado documento ya que es uno que demuestra una de las principales cualidades del pasto vetiver para hacer control de taludes erosionados y es través de su fuerte y profunda raíz, lo cual en una propuesta de montaje como le hecha en Florencia, ayudaría enormemente para sustentar su aplicación en dichos suelos.	6
Ingeniería biotécnica y bioingeniería. nuevas tendencias de la geotecnia para las obras de tierra, la estabilización de taludes y el control de la erosión.	Interesante documento que da luces del aprovechamiento de materiales inertes en conjunto con las plantas para aprovechar la biotécnica en proceso de control de taludes erosionados. Se pueden sacar resultados interesantes para la propuesta hechas en Caquetá, ya que se propuso utilizar el sistema de geo mallas tipo Neoweb en forma de panal de abeja en donde se agregaba material de la zona y suelo abonado para dar mayor firmeza y acelerar el proceso de establecimiento de las plantas de vetiver en cada sitio.	7
La bioingeniería del suelo - modos y aplicaciones comunes-.	La utilidad de este documento para este trabajo radica en que hace un recuento de los orígenes de la bioingeniería, sus usos y las principales técnicas y mostrando una DOFA entre ellas para ver cuál podría ser más apropiada en control de erosión de taludes lo cual sirve de guía en la propuesta de montaje.	8
Efectividad de la bioingeniería para el tratamiento de la erosión y los movimientos en masa en laderas.	Es apropiado este documento por desarrollarse en Colombia y por el fomento de técnicas de bioingeniería pero carece de la utilización del sistema vetiver que ayudaría en gran manera a fortalecer la estructura de los suelos y contener los procesos de erosión.	9

Documento	Como se aplica a las dos zonas de propuesta de manejo de taludes	Jerarquización por aplicación
Bioengineering: An Innovative Approach towards Sustainability of Civil Engineering Structures.	Es un Documento de interés para las propuestas en Caquetá, Colombia, ya que habla de Nepal, país en el que las difíciles condiciones del terreno, generalmente montañoso y altamente degradado por la intensa construcción de viviendas con mala infraestructura, genera problemas de erosión, que no han podido ser resueltos mediante la ingeniería convencional, pero si a través del uso de la bioingeniería. El documnto relata como en este sitio trabajaron con especies nativas pero no específicamente el pasto vetiver por lo que hasta allí puede ser de utilidad.	10

Fuente: Elaboración propia por el maestrando.

Capítulo 4. Propuesta de revegetalización con pasto vetiver como técnica de bioingeniería del suelo

Los seres humanos desde épocas remotas han tenido una relación directa con los suelos, al usarlos para cultivos, pastoreo y desarrollar sus comunidades entre otras actividades. Este uso y a veces abuso de los suelos ha generado desgaste, erosión, alteración y movimientos de masas de tierra, así como contaminación de cuerpos de agua, inundaciones y otras situaciones que terminan afectando al hombre mismo, tal como se evidencia en estos dos sitios puntuales de la carretera Florencia – Huila, generando derrumbes, cierres parciales de la vía, y riesgo a los que la utilizan.

Asociado a las obras de ingeniería civil, los trabajos para realizar el control de erosión con técnicas de bioingeniería comprenden una serie de técnicas que utilizan material vegetal vivo como elemento de construcción, de manera individual o combinada con materiales inertes, dentro del campo de la restauración ambiental. La ingeniería biológica o bioingeniería se utiliza en todos los ámbitos de obra civil, especialmente en el ámbito de consolidación de taludes, riberas y para el control de la erosión (Sangalli, 2008).

En Colombia la bioingeniería de suelos, ha sido aplicable como control de erosión, al revegetalizar zonas con diferentes especies arbóreas, estabilización de taludes tanto a nivel rural como a nivel vial, por medio de técnicas de barrera o cubiertas geotextiles entre otras, que protejan el suelo y lo recuperen.

Desarrollar algunas propuestas para revegetalizar los taludes de los kilómetros 73 y 80 de la vía Florencia – Neiva no solo servirán para reducir costos de obras civiles en dichos sitios sino para afianzar la idea de que los sistemas de bioingeniería son beneficiados y aliados por el tiempo, ya que con su paso, la estrategia se fortalece con el crecimiento y arraigo de las especies vegetales y el talud será más armónico y estable con este tipo de solución natural.

4.1 Datos generales de importancia en florencia, caquetá

Florencia es un municipio que se encuentra en el piedemonte de la Cordillera Oriental de Colombia, en la Cordillera de los Andes, a orillas del río Hacha, en el noroeste del departamento de Caquetá, del cual es capital. Está situada en una vía de comunicación entre la región andina de Colombia y la región amazónica de Colombia. Limita por el norte con el departamento del Huila y el municipio de La Montañita, por el este con el municipio de La Montañita, por el sur con los municipios de Milán y Morelia, y por el oeste con el municipio de Belén de los Andaquíes y el departamento del Huila.

Su ubicación urbana se encuentra en la confluencia de aguas del piedemonte en el río Orteguzaza. A la vez que esto le concede preeminencia por la abundancia de agua natural también se convierte en una amenaza permanente de riesgo por inundaciones. Florencia tiene unas dinámicas particulares determinadas por su estructura urbana y las restricciones físicas, caracterizada por su sistema hídrico que inhabilita por riesgos de avalancha e inundación una parte importante del territorio.

La altitud promedio de la zona es de 230 msnm. El territorio de Florencia lo conforman tres conjuntos fisiográficos: Vertientes, Piedemonte y Llanura. La cordillera Oriental es uno de los tres ramales de la cordillera de los Andes en Colombia. Florencia está sobre unos ramales del piedemonte oriental de esta cordillera, que es atravesada por la carretera que comunica Caquetá con Altamira, pasando por Suaza, en el departamento de Huila.

En la cordillera Oriental se encuentra el bosque de niebla más bajo del mundo, a partir de la cota de 1.400 msnm. El cerro del Sinaí está situado sobre un ramal de la cordillera Oriental y en él nacen varios afluentes del río Hacha. Es un mirador de Florencia y los valles del río Orteguzaza. A partir de él hay una pequeña reserva natural, donde hay varias especies de simios, borugas, armadillos, pequeños roedores y cientos de aves.

El clima de Florencia es de tipo cálido-húmedo, característico del ecosistema de bosque húmedo tropical, con una tendencia mono modal a lo largo del año, la temperatura media de 27° C, la precipitación media anual de 3840 mm. Según la clasificación de Köppen, el macroclima de mayor incidencia en Florencia es el «tropical lluvioso de selva sin sequía», caracterizado por precipitación constante durante todo el año y una alta humedad relativa, superior al 80%. No obstante, en la zona cordillerana, se presenta el macroclima de montaña. La presencia de lluvias es constante durante todo el año, pero se pueden definir unas épocas de «verano ecológico» en las cuales el volumen de lluvia mensual está por debajo del promedio sin configurar un período de sequía, que corresponde a los meses de diciembre a febrero. Por otra parte, se observa también un período en el cual el volumen de lluvias es superior al promedio mensual, determinando una época de «invierno ecológico» sin alcanzar niveles de monzón, correspondiente a los meses de mayo a julio. Para el resto de los meses se registran volúmenes de precipitación localizados dentro del intervalo de la media (Alcaldía de Florencia, (s.f.))³⁵.

La duración del día oscila entre las 11h50m durante el invierno ecológico, y las 12h30m durante el verano ecológico, con una radiación solar que varía alrededor de 113,7

³⁵ Alcaldía de Florencia - Nuestro Municipio. S.F. Recuperado de: http://www.florencia-caqueta.gov.co/informacion_general.shtml

kcal/cm²/año. El recurso hídrico pluvial se cuantifica en 65 L/km². La velocidad del viento en promedio alcanza 1,1 m/s, con máximos de 1,3 m/s en febrero y mínimos de 0,8 m/s registrados en octubre.

4.2 Tramos de revegetalización para control de erosión de taludes

4.2.1. Montaje propuesto para el Kilómetro (Km) 73



Fuente: Fotografía tomada por el autor

Imagen 13. Talud del Km 73 en la vía Florencia – Huila Vista desde el rio Hacha.

Debido a las intensas lluvias presentadas en la zona de influencia de Florencia Caquetá se produjeron una serie de deslizamientos y derrumbes en zonas cercanas a la carretera entre Florencia y Huila específicamente en los Km 73 y 80. En este punto (Km 73) ya hay un adelanto significativo en el trabajo de los ingenieros a cargo de la reparación de los taludes con movimientos de tierras, puesta de drenaje y retiro de material como rocas, agua y arcillas.

Como herramienta de apoyo a la propuesta de revegetalización, puntualmente se analiza en una matriz de debilidades, oportunidades, amenazas y fortalezas - DOFA – (según Panagiotou, G. (2003)³⁶el termino DOFA (del inglés SWOT – Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats) se originó entre los años 50 y 60 por varios autores como Albert Humphrey profesor de la Universidad de Stanford quien lo desarrollo para medir potenciales mercados, y los profesores George A. Smith Jr., y C. Roland Christensen de la unidad de política de la Escuela de Negocios de Harvard que crearon el sistema de medición de Debilidades Oportunidades, Fortalezas y Amenazas de los negocios), de los componentes ambientales de manera integral, como se sintetiza en la **Tabla 8**.

Este análisis permite orientar el diseño de la revegetalización y su posterior implementación.

³⁶ Panagiotou, G. (2003). Bringing SWOT into focus. Documenta el origen y como desarrollar la metodología DOFA (SWOT por sus siglas en Inglés).

Tabla 8. Matriz de análisis DOFA de los componentes ambientales Km73.

	Debilidades	Oportunidades	Fortalezas	Amenazas	Soporte Bibliografico
Atmosférico: Clima	Variaciones climáticas que pueden bloquear carreteras y aeropuerto, alterando cronogramas y logística.	La intensidad de las lluvias se puede aprovechar para evitar riego de las especies sembradas.	Tener en un mismo día la posibilidad alta de lluvia y sol lo cual acelera el proceso de arraigo de las especies vegetales.	Inicios de adaptación al cambio climático, acelerado por procesos de deforestación de la zona.	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Climatografía de la principales ciudades
Geosférico: Geomorfología	El terreno tiene una pendiente superior al 45% lo que puede dificultar la mano de obra.	Debido a lo inclinado y visible, si la técnica se aplica adecuadamente, la recomendación puede ser un trabajo que se pueda replicar en otras zonas con características similares.	La presencia de afloramientos rocosos ayudará a enclavar algunas técnicas.	La zona de la corona a revegetalizar es muy pequeña y se deben establecer bien los puntos de amarre de elementos de la técnica a escoger.	Observación en visita de campo por el autor.
Geosférico: Suelo	Mal drenaje del suelo	La estabilización del suelo con la obra geotécnica ayuda en el proceso de revegetalización.	El suelo muestra tener nutrientes parciales para las especies a sembrar. El contenido de arcillas favorece la retención de nutrientes y facilita el posterior enraizamiento.	El suelo es susceptible a fenómenos de remoción en masa, si bien se estabiliza estructuralmente de manera puntual, la condición generalizada de retención de humedad del suelo puede activar un nuevo deslizamiento si se rompe la capacidad de carga de manera temporal.	Corpoamazonia, región Caquetá, suelos. (s.f.)
Geosférico: Geología	El fracturamiento de la roca por el paso de la carretera y por la meteorización.	Utilizar las rocas consolidadas en la zona permite anclaje de las mallas.	Tener afloramientos rocosos localizados que sirven de soporte del suelo.	El material coluvial es indicador de movimientos en masa, el afloramiento rocoso limita la profundidad efectiva del suelo y por ende limita el enraizamiento en algunos sectores.	Corpoamazonia, región Caquetá, suelos. (s.f.).
Hidrosférico: Cuenca del	Inadecuado manejo de aguas	Puede utilizarse agua del río	No hay déficit de humedad.	Saturación del suelo de	Pelaez, M., M. Saldaña y Y

	Debilidades	Oportunidades	Fortalezas	Amenazas	Soporte Bibliografico
Amazonas. Microcuenca del Rio Hacha	de escorrentía propicia encharcamientos y saturación del suelo.	Hacha frente al Talud para riego en épocas secas. La infiltración de agua alimentara las especies sembradas una vez establecidas. Realizar adecuados sistemas de drenaje	Al hacer parte de la cuenca hidrográfica del Amazonas este río Hacha puede ser fuente de irrigación útil a este punto.	humedad, lo que puede generar nuevos puntos de remoción en masa, flujo de suelo y/o deslizamiento.	Ome (s.f.) en Vanina. A., y L. Fernandez (2008)
Biosférico: Cobertura vegetal	Cobertura vegetal inadecuada, pastos <i>Brachiaria decumbens</i> y pocos árboles o arbustos, suelos desnudos en partes. Procesos de deforestación de la cuenca.	Es un terreno que permitirá modificarse para mejorarlo con otras especies de pastos, arbustivas y arbóreas.	La abundancia de especies vegetales en las inmediaciones indica la posible facilidad de arraigo de las plantas que se utilizarán.	La presencia de ese pasto <i>Brachiaria decumbens</i> de poco arraigo hace que no se retenga con fuerza el suelo.	Corpoamazonia, región Caquetá, Naturaleza. Información general. (2016)
Antrópico: Usos del suelo	Es un terreno con un uso inadecuado por el tipo de suelo, por tener ganado en una pendiente alta	Puede darse un mejor aprovechamiento con las especies utilizadas.	La estabilización geotécnica y las obras de bioingeniería que se proponen, mejorará la aptitud de uso a protector y no de ganado como se tenía.	Permitir el ingreso de ganado que afecte el proceso de revegetalización.	Pelaez, M., M. Saldaña y Y Ome (s.f.) en Vanina. A., y L. Fernandez (2008)

Fuente: Elaboración propia por el maestrando, basado en

4.2.1.1. Técnicas sugeridas de revegetalización

Previo a iniciar la revegetalización se espera que esta zona sea entregada con el terreno totalmente adecuado, nivelado, sin pedregosidad mayor que genere problemas para la instalación de la técnica, entendiéndose que los afloramientos rocosos en el sitio son inamovibles, que el material removido no este acumulado en la zona de trabajo, con los drenajes y manejo de aguas de la mejor manera esperada y haber removido la vegetación tipo maleza para iniciar las labores. También que esté limpio de cualquier otro material que no deba estar en el sitio.

a. Biomortero y Pasto Técnica combinada.

Revegetalización con uso de biomortero y líneas tupidas de pasto vetiver *Chrysopogon zizanioides* con ayuda de agromanto, geotextil o biomanto (**imagen 14**).



Fuente: Elaboración propia por el maestrando.

Imagen 14. Talud erosionado del km73. Súper posición de arreglo de plántulas de vetiver con biomortero y malla.

Convenciones

Biomortero tipo bokashi



Malla metálica o plástica



Pasto Vetiver



Es conveniente aclarar que al momento de la implementación, el diseño puede tener ajustes, así mismo durante el seguimiento, con el fin de lograr de la manera exitosa el proceso de revegetalización hasta el arraigo de las especies. Para dicha técnica se recomienda tener en cuenta lo siguiente:

Requerimientos y pre alistamiento

- Estabilizado geotécnicamente.
- Terreno nivelado y limpio de escombros, libre de pedregosidad, manteniendo los afloramientos rocosos.
- Con drenajes y manejo de aguas adecuado que evite saturación de humedad.
- Cercamiento preferiblemente con cercas vivas de especies nativas de toda el área.
- Muestreo de suelos (2 muestras para determinar macro y micronutrientes), costo por muestra \$70.000 materiales para el muestreo costo aproximado 15.000.
- Mano de obra preferiblemente de vecinos y gente de la zona con las herramientas necesarias (barreno, pala, pica, machete).
- Especies vegetales que se tengan en viveros de la zona.
- Suelo abonado de la zona.

- Aseguramiento de personal de trabajo de alturas.
- No revegetalizar en época de alta pluviosidad, preferiblemente iniciar las labores a las 6:00 am y terminar a las 3:00 pm, con el fin de ir generando un proceso de adaptación de la especie y obtener el máximo de brillo solar inicial.
- Diseño de protocolo y ficha técnica de implementación y otra de seguimiento.

Materiales

- Biomortero o abono mejorado tipo Bokashi.
- Semillas de Pasto Limonaria *Cymbopogon sp.*
- Esquejes de pasto Vetiver.
- Agro manto, Geotextil o biomanto.
- Estacas.
- Malla en acero o plástica de ojo grande y malla verde de cerramiento.
- Tanque de almacenamiento de agua lluvia, sistema de anclaje de los tanques.
- Mangueras para el riego de ser necesario.

Implementación

- a- Aplicar biomortero o empañetado de fibras naturales, polímeros, enmiendas orgánico-minerales, semillas de pastos como pasto limonaria *Cymbopogon sp.*, aglutinantes y cementantes que protegerán el terreno de la erosión por efecto de la lluvia que cae y a la vez ser medio de crecimiento para pastos y especies rastreras.
- b- Sembrar en hileras laterales esquejes de pasto Vetiver arraigados en hoyos con preparación del biomortero hechos de melaza, fibra de papel, cascarilla de trigo o arroz, sal marina, polvo cerámico, agua y bacteria descomponedora o levadura. Esto para acelerar el proceso de crecimiento de las plántulas de Vetiver. Entre plántula de vetiver y plántula lateral se dejara un espacio de 50 cm para que la planta crezca ampliamente y entre hileras de pastos se dejara una distancia de 80 centímetros para que conformen redes densas de raíces que amarren adecuadamente los suelos.
- c- Los esquejes sembrados en la parte baja deben sembrarse más unidos cada 40 cm entre plantas y cerca de la base del talud hacer 2 líneas seguidas de pasto vetiver.
- d- Extender la malla plástica o metálica con cuidado sobre la siembra y anclarla con ayuda de las varillas metálicas de 50-70cm de largo para afianzar las plántulas y el terreno y evitar el arrastre por agua de lluvia. (Suarez, 2001)
- e- Colocar malla verde de cercamiento alrededor de toda el área de trabajo para evitar el paso de ganado que pueda pisotear o comerse las plantas en proceso de crecimiento.

Si la siembra se hace durante los meses de lluvias es mejor para el arraigo de las plantas y evitar el riego pero si se acercan a los meses de menores niveles de precipitación que son diciembre a febrero se recomienda colocar en la corona del talud una par de tanques de almacenamiento de aguas lluvias y una tubería de riego gota a gota colocado a lo largo de las plántulas sembradas para asegurar el crecimiento de las especies.

Las líneas tupidas o barreras vivas de Vetiver generaran con el tiempo terraplenes naturales que desviarán la dirección de escorrentía del agua y reducirán su fuerza y velocidad, igualmente sus raíces que crecen hasta 5 metros en profundidad tienen la cualidad de actuar como redes que retienen sedimentos, filtran aguas y conformar suelos además de meterse en las grietas de rocas rotas y amarrarlas.

Número de Plantas de Vetiver a sembrar: Se requerirán aproximadamente 3400 esquejes de pasto vetiver para cubrir el área correspondiente 0.17 Hectáreas. Se define un esqueje como un material de propagación asexual compuesta de pedazos de tallos y hojas (20 cm. de alto) con una pequeña cantidad de raíces (no más de 5 cm.). Cuando no se dispone de esquejes y se van a propagar por primera vez es necesario adquirir este material del campo de los agricultores que ya tiene experiencia en su manejo.

Requerimientos de seguimiento

- Visitas de campo.
- Ajustes de materiales.
- Acompañamiento.
- Posibles resiembras por sectores.
- Trasplantes.
- Diseño de protocolo y ficha técnica.
- Posible bombeo de agua si hay variación climática y/o riego con el sistema colector de aguas lluvia.

b. Revegetación lateral con fajinas.



Fuente: Elaboración propia por el maestrando

Imagen 15. Vista del talud km 73 con súper posición de arreglo con fajinas, mata ratón y pasto vetiver.

Convenciones

Fajinas



Estacas



Esquejes de mata ratón



Pasto Vetiver

Requerimientos y pre alistamiento

- Estabilizado geotécnicamente.
- Terreno nivelado y limpio de escombros, libre de pedregosidad, manteniendo los afloramientos rocosos.
- Con drenajes y manejo de aguas adecuado que evite saturación de humedad.
- Cercamiento preferiblemente con cercas vivas de especies nativas de toda el área.
- Muestreo de suelos (2 muestras para determinar macro y micronutrientes), costo por muestra \$70.000 materiales para el muestreo costo aproximado 15.000.
- Mano de obra preferiblemente de vecinos y gente de la zona con las herramientas necesarias (barreno, pala, pica, machete).
- Especies vegetales que se tengan en viveros de la zona.
- Suelo abonado de la zona.
- Aseguramiento de personal de trabajo de alturas.

- No revegetalizar en época de alta pluviosidad, preferiblemente iniciar las laboras a las 6:00 am y terminar a las 3:00 pm, con el fin de ir generando un proceso de adaptación de la especie y obtener el máximo de brillo solar inicial.
- Diseño de protocolo y ficha técnica de implementación y otra de cerramiento.

Materiales

- Fajinas de ramas vivas que permitan recrecimiento.
- Varilla metálica de 70 cm de largo y media pulgada de grosor.
- Esquejes de pasto vetiver.
- Esquejes de mata ratón.
- Suelo abonado según muestreo de suelo y requerimiento de la planta.
- Malla metálica o plástica de ojo grande.
- Malla verde de cercamiento.
- Tanque de almacenamiento de agua lluvia, sistema de anclaje de los tanques.
- Mangueras para el riego de ser necesario.

Procedimiento

- a- Se colocan las cañas o guaduas o material vegetal en fajinas o paquetes de ramas, horizontalmente a lo ancho del talud formando líneas y se aseguran en el piso con la ayuda de varilla metálica de hasta 40 cm de largo, por que hay alta presencia de afloramiento rocoso lo cual dificultaría el uso de estacas de madera para asegurar las fajinas al piso.
- b- Se instalan fajinas cada 70 cm de distancia vertical para permitir el crecimiento de las plantas y verticalmente se contraponen unas a otras para demorar la escorrentía.
- c- Sembrar líneas tupidas de esquejes de pasto vetiver *Chrysopogon zizanioides* con especie que arraiga y retiene con fuerza la tierra pero dejando espacios entre planta y planta de 40 cm. En los espacios entre líneas de caña se puede sembrar esquejes de mata ratón *Gliricidia sepium* que crecen rápidamente y sus raíces colaboran en la fijación de los suelos.
- d- Colocar malla verde de cercamiento alrededor de toda el área de trabajo para evitar el paso de ganado que pueda pisotear o comerse las plantas en proceso de crecimiento.
- e- Es un proceso de mayor trabajo pero permite un crecimiento de dos especies llamativas y fuertes que sostendrán y fortalecerán el talud ampliamente.

Número de plantas de Vetiver a sembrar: Se requerirán aproximadamente 3400 esquejes de pasto vetiver para cubrir el área correspondiente 0.17 Hectáreas de este talud. Número de esquejes de mata ratón: 2000.

Requerimientos de seguimiento

- Visitas de campo.
- Ajustes de materiales.
- Acompañamiento.
- Posibles resiembras por sectores.
- Trasplantes.
- Diseño de protocolo y ficha técnica.
- Posible bombeo de agua si hay variación climática y/o riego con el sistema colector de aguas lluvia.

4.2.2. Montaje propuesto para el Kilómetro (Km) 80

En este punto está más adelantado el trabajo de los ingenieros a cargo de la reparación del talud con movimientos de tierras, puesta de drenaje y retiro de material como rocas, agua y arcilla. Nos parece que sería conveniente recomendarles hacer unos ligeros terraplenes cada 4 metros del talud a revegetalizar para ayudar a disminuir la velocidad del agua escurriendo. Como herramienta de apoyo a la propuesta de revegetalización, puntualmente se analiza una matriz DOFA de los componentes ambientales de manera integral, como se sintetiza en la **Tabla 9**. Tal análisis permite orientar el diseño de la revegetalización y posterior implementación.

Tabla 9. Matriz de análisis DOFA de los componentes ambientales. Km80.

	Debilidades	Oportunidades	Fortalezas	Amenazas	Soporte Bibliografico
Atmosférico: Clima	Variaciones climáticas que pueden bloquear carreteras y aeropuerto, alterando cronogramas y logística.	La intensidad pluviométrica se puede aprovechar para evitar riego de las especies sembradas.	Tener en un mismo día la posibilidad alta de lluvia y sol lo cual acelera el proceso de arraigo de las especies vegetales.	Inicios de adaptación al cambio climático, acelerado por procesos de deforestación de la zona.	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Climatografía de la principales ciudades
Geosférico: Geomorfología	Están haciendo un solo talud con inclinación menor a 35° pero muy liso.	Debido a lo inclinado y visible si la técnica se aplica adecuadamente la recomendación puede ser un trabajo que se pueda replicar en otras zonas con	La terraza superior ayuda a enclavar algunas técnicas.	Activación de fenómenos de remoción en masa en zonas laterales	Observación en visita de campo por el autor.

	Debilidades	Oportunidades	Fortalezas	Amenazas	Soporte Bibliografico
		características similares.			
Geosférico: Suelo	Mal drenaje del suelo	La estabilización del suelo con la obra geotécnica coadyuva el proceso de revegetalización.	El suelo muestra tener nutrientes parciales para las especies a sembrar. El contenido de arcillas favorece la retención de nutrientes y su posterior enraizamiento.	El suelo es susceptible a fenómenos de remoción en masa, si bien se estabiliza estructuralmente de manera puntual, la condición generalizada de retención de humedad del suelo pueden activar un nuevo deslizamiento si se rompe la capacidad de carga y capacidad d campo de manera temporal.	Corpoamazonia, región Caquetá, suelos, (s.f.).
Geosférico: Geología	El suelo como se observa esta hecho de coluvión pedregoso y arcilla.	El sustrato base puede servir para sostener la capa vegetal a introducir.	Roca sedimentaria que ha proporcionado suelos con fertilidad moderada.	La roca puede limitar la profundidad efectiva y favorecer el rápido drenaje interno del suelo.	Corpoamazonia, región Caquetá, suelos, (s.f.).
Hidrosférico: Rio hacha	Inadecuado manejo de aguas de escorrentía que propicia encharcamientos y saturación del suelo.	Puede utilizarse agua del río Hacha frente al Talud para riego en épocas secas. La infiltración de agua alimentara las especies sembradas una vez establecidas. Realizar adecuados sistemas de drenaje	No hay déficit de humedad. Al hacer parte de la cuenca hidrográfica del Amazonas este río Hacha puede ser fuente de irrigación útil a este punto.	Saturación del suelo de humedad, lo que puede generar nuevos puntos de remosi3n, flujo de suelo y/o deslizamiento.	Pelaez, M., M. Saldaña y Y Ome (s.f.). en Vanina. A., y L. Fernandez (2008)

	Debilidades	Oportunidades	Fortalezas	Amenazas	Soporte Bibliografico
Biosférico: Cobertura vegetal	En el terreno inmediato se ve presencia de rastreas y especies de poco arraigo.	Es un terreno que no presenta usos actuales y gran vegetación variada en los alrededores.	Es un terraplén amplio que permite un buen desarrollo de las especies a ofrecer.	Colonización de especies de poco enraizamiento.	Romero, M., E. Cabrera y Ortiz, N. (2008). Informe sobre el estado de la biodiversidad en Colombia 2006-2007.
Antrópico: Usos del suelo	No tener terraplenes y dejar una pendiente uniforme	Puede darse un mejor aprovechamiento con las especies revegetalizadas.	La estabilización geotécnica y las obras de bioingeniería que se proponen, mejora la aptitud de uso a protector y no de ganado como se tenía.	Escurrencimiento y pérdida de material revegetalizado si no se hacen terraplenes	Pelaez, M., M. Saldaña y Y Ome (s.f.) en Vanina, A., y L. Fernandez (2008)

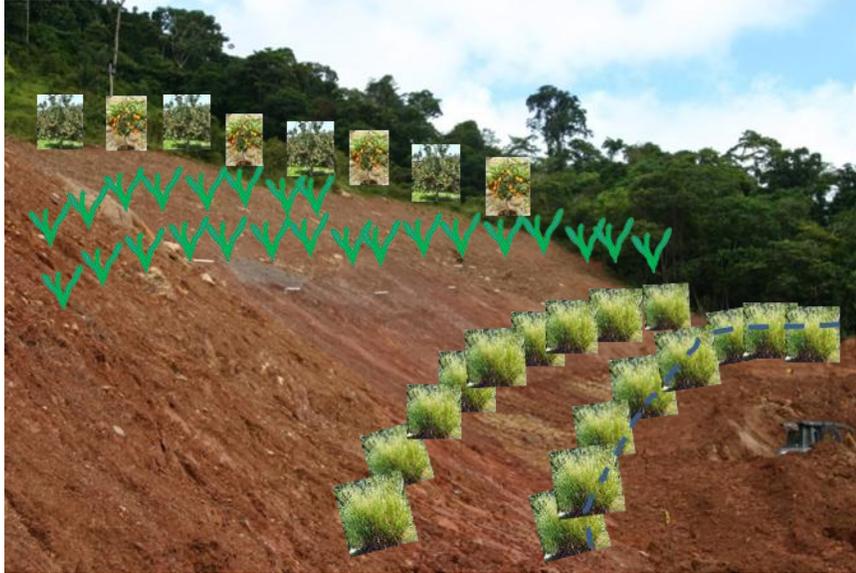
Fuente: Elaboración propia por el maestrando.

4.2.2.1. Técnicas sugeridas de Revegetalización

Previo a iniciar la revegetalización se espera que esta zona sea entregada con el terreno totalmente adecuado, sin pedregosidad mayor que genere problemas para la instalación de la técnica, que el material removido no este acumulado en la zona de trabajo, con los drenajes y manejo de aguas de la mejor manera esperada y haber removido la vegetación tipo maleza para iniciar las labores. También que esté limpio de cualquier otro material que no deba estar en el sitio.

En la terraza en la parte alta y en la parte baja sin importar la técnica sugerida se recomienda retirar la vegetación existente y colocar 2 líneas tupidas de pasto vetiver *Chrysopogon zizanioides* en el borde de la misma como barrera viva y detrás de este especies arbustivas de naranjos *Citrus x sinensis* y mandarinos *Citrus reticulata* mezclados entre si. Se pueden sembrar 20 arbustos de estos frutales en la corona y 40 en la terraza inferior.

a. **Siembra de hileras de vegetación**



Fuente: Elaboración propia por el maestrando

Imagen 16. Talud del km 80, con las terrazas alisadas y una sobre posición de Imágenes de vetiver y frutales.

Convenciones

Arbustos frutales



Estacas



Pasto Vetiver



Líneas de siembra radial



Requerimientos y pre alistamiento

- Estabilizado geotécnicamente.
- Terreno nivelado y limpio de escombros, libre de pedregosidad, manteniendo los afloramientos rocosos.
- Terraplenes laterales ovalados cada 4 metros.
- Con drenajes y manejo de aguas adecuado que evite saturación de humedad.
- Cercamiento preferiblemente con cercas vivas de especies nativas de toda el área.
- Muestreo de suelos (1 muestra para determinar macro y micronutrientes), costo por muestra \$70.000 materiales para el muestreo costo aproximado 15.000.
- Mano de obra preferiblemente de vecinos y gente de la zona con las herramientas necesarias (barreno, pala, pica, machete).
- Especies vegetales que se tengan en viveros de la zona.
- Suelo abonado de la zona.

- Aseguramiento de personal de trabajo de alturas.
- No revegetalizar en época de alta pluviosidad, preferiblemente iniciar las labores a las 6:00 am y terminar a las 3:00 pm, con el fin de ir generando un proceso de adaptación de la especie y obtener el máximo de brillo solar inicial.
- Diseño de protocolo y ficha técnica de implementación y otra de seguimiento.

Materiales

- Esquejes de pasto vetiver.
 - Agro manto, geotextil o biomanto en los sectores del pasto.
 - Estacas para el agro manto.
 - Plantas juveniles de naranjos *Citrus x sinensis* y mandarinos *Citrus reticulata*.
 - Semillas de pasto *Brachiaria humidicola*.
 - Bultos de biomortero tipo bokashi.
 - Malla verde de cerramiento.
 - Tanque de almacenamiento de agua lluvia, sistema de anclaje de los tanques.
 - Mangueras para el riego de ser necesario.
1. Para ello se utilizaran esquejes del pasto vetiver *Chrysopogon zizanioides* sembrado de forma radial en todo el talud, esto para favorecer la escorrentía de manera lateral en el talud. Debido a la inclinación que presenta este talud se recomienda dejar un espacio entre las hileras de 1 metro en la parte alta y media y ya en la parte baja llegando a la terraza espacios de 40 cm para hacer barreras vivas.
 2. Las plantas de vetiver se sembrarán a una distancia de 50 cm entre una y otra.
 3. Entre las hileras de vetiver para no dejar el suelo desnudo puede sembrarse semillas de pasto *Brachiaria humidicola* mezclado con pasto limonaria mezclados con biomortero tipo bokashi: (mezcla de melaza, fibra de papel, cascarilla de trigo o arroz, sal marina, polvo cerámico, agua y levadura).
 4. Colocar malla verde de cercamiento alrededor de toda el área de trabajo para evitar el paso de ganado que pueda pisotear o comerse las plantas en proceso de crecimiento.

Numero de esquejes de pasto vetiver a sembrar para toda esta área correspondiente a 0.41 hectáreas: 8200 esquejes.

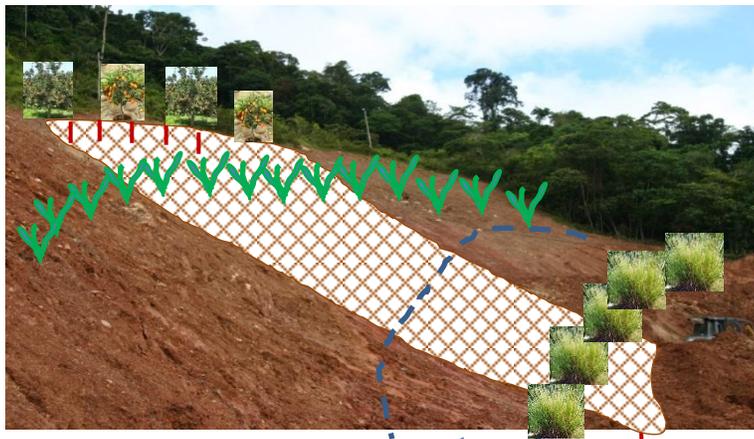
Requerimientos de seguimiento

- Visitas de campo.
- Ajustes de materiales.
- Acompañamiento.
- Posibles resiembras por sectores.

- Trasplantes.
- Diseño de protocolo y ficha técnica.
- Posible bombeo de agua si hay variación climática y/o riego con el sistema colector de aguas lluvia.

b. Neo celdas

Siembra de plántulas y semillas mediante uso de sistemas sintéticos de confinamiento de suelo o neo celdas tipo panal (Neoweb).



Fuente: Elaboración propia por el maestrando
Imagen 17. Talud con terrazas con sobre posición de plántulas de vetiver, arbustos frutales y neo celdas

Convenciones

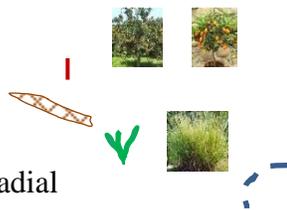
Arbustos frutales

Estacas

Neoweb

Pasto Vetiver

Líneas de siembra radial



Requerimientos y pre alistamiento

- Estabilizado geotécnicamente.
- Terreno nivelado y limpio de escombros, libre de pedregosidad, manteniendo los afloramientos rocosos.
- Terraplenes laterales ovalados cada 4 metros.
- Con drenajes y manejo de aguas adecuado que evite saturación de humedad.
- Cercamiento preferiblemente con cercas vivas de especies nativas de toda el área.

- Muestreo de suelos (1 muestra para determinar macro y micronutrientes), costo por muestra \$70.000 materiales para el muestreo costo aproximado 15.000.
- Mano de obra preferiblemente de vecinos y gente de la zona con las herramientas necesarias (barreno, pala, pica, machete).
- Especies vegetales que se tengan en viveros de la zona.
- Suelo abonado de la zona.
- Aseguramiento de personal de trabajo de alturas.
- No revegetalizar en época de alta pluviosidad, preferiblemente iniciar las laboras a las 6:00 am y terminar a las 3:00 pm, con el fin de ir generando un proceso de adaptación de la especie y obtener el máximo de brillo solar inicial.
- Diseño de protocolo y ficha técnica de implementación y otra de seguimiento.

Materiales

- Neeoceldas.
 - Neoclips o anclajes del sistema.
 - Esquejes de pasto vetiver.
 - Plantas juveniles de naranjos *Citrus x sinensis* y mandarinos *Citrus reticulata*.
 - Semillas de pasto *Brachiaria humidicola*
 - Bultos de biomortero tipo bokashi.
 - Malla verde de cerramiento.
 - Tanque de almacenamiento de agua lluvia, sistema de anclaje de los tanques.
 - Mangueras para el riego de ser necesario.
1. Antes de hacer la siembra se recomienda hacer una terraplenes suaves con ayuda de azadón, lo cual reducirá la velocidad de escorrentía del agua en este talud y hacer con caídas laterales. En la corona del talud se hará una estructura en concreto para anclar fuertemente el material
 2. Se extiende una manta tipo panal llamada neocelda del ancho que viene y a todo lo largo del talud hasta anclado desde la base de la terraza superior mediante elementos tipo estaca llamados neo clips, dejando descolgar esta tela hasta la terraza inferior del mismo talud, lo cual genera una ventaja adicional que es retener los suelos y protegerlos contra la erosión generada por el goteo de la lluvia.
 3. Cada metro de distancia se sembrarán los esquejes del pasto vetiver *Chrysopogon zizanioides* en forma radial en todo el talud, esto para favorecer la escorrentía de manera lateral en el talud. Debido a la inclinación que presenta este talud se recomienda en la parte baja llegando a la terraza inferior se deja una distancia entre

las líneas de 40 cm para hacer barreras vivas. Las plantas de vetiver se sembrarán a una distancia de 50 cm entre una y otra.

4. Entre las hileras de vetiver se mezclara con suelo abonado semillas de pasto *Brachiaria humidicola* mezclado con pasto limonaria mezclados con biomortero tipo bokashi hechos de melaza, fibra de papel, cascarilla de trigo o arroz, sal marina, polvo cerámico, agua y bacteria descomponedora o levadura.
5. Colocar malla verde de cercamiento alrededor de toda el área de trabajo para evitar el paso de ganado que pueda pisotear o comerse las plantas en proceso de crecimiento.

Numero de esquejes de pasto vetiver a sembrar para toda esta área correspondiente a 0.41 hectáreas: 8200 esquejes³⁷.

Requerimientos de seguimiento

- Visitas de campo.
- Ajustes de materiales.
- Acompañamiento.
- Posibles resiembras por sectores.
- Trasplantes.
- Diseño de protocolo y ficha técnica.
- Posible bombeo de agua si hay variación climática y/o riego con el sistema colector de aguas lluvia.

³⁷ Protección de taludes tuna alta localidad suba Bogotá, Colombia. Recuperado de: http://pavco.com.co/files/data/20130730133559_s_1.pdf Se aprecia el nivel de efectividad haciendo uso de este material Neoweb® con resultados han sido satisfactorios a la fecha.

Banco Fotográfico de la Salida a Campo

A continuación se encuentra un banco fotográfico del contorno natural y paisajístico de la zona de influencia de los dos tramos de la carretera kms 73 y 80 vía Florencia – Huila, del departamento del Caquetá en donde se plantearon las propuestas para utilizar el pasto vetiver como técnica de bioingeniería del suelo para el control de la erosión.

En las imagenes se aprecia la abundante vegetación en algunos terrenos de montaña con presencia de escarpes inclinados y taludes pronunciados, donde se evidencia el uso inadecuado de suelos para agricultura y ganadería, siendo un equivoco ya que el desmontar la vegetación arbórea y arbustiva para reemplazarla por pasturas y ganado favorece el proceso erosivo y facilita los movimientos de suelo sumado a regímenes intensos de lluvias.



Imagen 18. Talud vegetado.



Imagen 19. Lotes con pasturas



Imagen 20. Detalle de pasturas de ganado en talud inclinado

a- En las imagines 18, a 20 se puede evidenciar abundante vegetación mezclada entre la nativa, la de siembra y zonas de pastoreo. La inclinación de los taludes en algunos casos supera los 60° y con el evidente inadecuado uso de suelos, se producen fácilmente los movimientos masales y erosivos de los terrenos. En las imagenes inferiores 21 a 23 se aprecia el río Hacha.



Imagen 21. Vegetación de ribera rio Hacha



Imagen 22. Rio Hacha.



Imagen 23. Talud con inclinacion superior a 60° .

Las imagenes son archivo personal del autor.

Fotografías del estado actual del tramo Km73 y zona a revegetalizar



Imagen 24. Talud en borde de la vía con estructura de contención.



Imagen 25. Coluvio cerca del pie del talud con remanentes de vegetación.



Imagen 26. Coluvios inestables en la parte baja del talud.

b- En las imágenes 24 a 26 se aprecia el pie del talud al borde de la carretera, zona que no será revegetalizada. Se aprecia el material vegetal original presente en el terreno y lo poco estable del suelo desnudo.



Imagen 27. Corona del talud con presencia notoria de coluvios inestables.



Imagen 28. Detalle de canaleta de recolección de agua y disipadora de fuerzas erosivas rodeando la corona y lados del talud.



Imagen 29. Carcavamiento cerca de la estructura de recolección de agua.

c- En las imágenes 27 a 29 se muestra el detalle de la corona del talud a revegetalizar. Se puede apreciar el afloramiento rocoso y un talud con inclinación superior a 60°. Rodeando la corona se construyó un canal de desagüe con bolsas de polícreto. Se observan los remanentes de pasturas *Brachiaria decumbens* ya que el terreno se utilizaba para para pastoreo de ganado vacuno. En las imágenes 30 a 31 se aprecia un suelo inestable con piedras y rocas de diverso tamaño. En la propuesta se comenta que las rocas podrán quedar reforzadas y sujetas con la ayuda de las raíces del pasto vetiver que crecerán sobre y rodeando de ellas, y con la ayuda de redes geotextiles de neoceldase aumentará el soporte; en caso de retirar las rocas, puede quedar en riesgo el colapso del talud.

Imagen 30. Terraza reconfomada.



Imagen 31. Afloramiento rocoso.



Imagen 32. Detalle de rocas.



Imagen 34. Despeje y terraceo.



Imagen 33. Frente del afloramiento rocoso.

d-En las imagenes 33 y 34 se aprecia en detalle el coluvio y los afloramientos rocosos del talud, material del suelo con desprendimientos, lo cual presenta una dificultad en manejo del terreno, obliga recubrirlo con material vegetal y biomortero.



Imagen 35. Pasturas y corte de suelo.



Imagen 36. Rastros del pisadas de ganado denominado efecto pata de vaca en el talud.



Imagen 37. Corte de talud.

e-Imagenes 35 a 37 muestran detalle del tipo de suelo de este talud desprovisto de vegetación arbórea. La cobertura conformada principalmente por pastos de poco arraigo y se denota el rastro de pisadas del ganado vacuno en un lote contiguo y el fenómeno conocido como pata de vaca que actúa como un barretón, soltando las partículas del suelo, generando agretamiento y promoviendo el movimiento al dejar un acceso rapido del agua de escorrentia en esas formaciones.



Imagen 38. Escasos arboles en la corona del talud



Imagen 39. Bolsas de concreto formando canal de escorrentia.



Imagen 40. cobertura minima en la parte superior.

f-Imágenes 38 a 41 muestra el detalle de la zona de corona del talud. Material poco estable. Canal de desagüe para desviar las aguas en la parte alta y disipar la energía para ayudar a detener el proceso erosivo.

Todas las fotografías son del archivo particular del autor

Fotografías del estado actual del tramo Km80 y zona a revegetalizar



Imagen 41. Detalle de tarreceo.



Imagen 42. Movimiento del bulldozer.



Imagen 43. Suavizado del terraplen.

a-Imágenes 41 a 43 muestran el talud y como viene siendo limpiado y puesto a punto para iniciar proceso de revegetalización. Se suavizo la pendiente y se crearon tres terrazas con pendientes entre 45o y 60o. Se puede apreciar un suelo de difícil manejo, al que se le pueden hacer los montajes propuestos.



Imagen 44. Pedregosidad



Imagen 45. Rocas que no se puede sacar y sistemas de desagüe.



Imagen 46. Alizado de la pendiente.

b-En las imagenes 44 a 46 se nota algo de pedregosidad en el talud y el detalle de su parte alta.



Imagen 47. Trinchera, tela asfáltica impermeable y gravilla.



Imagen 48. Bolsas de concreto.



Imagen 49. Receptor de agua canalizada.

c-Las imagenes 47 a 49 enseñan las fases de construcción del canal del de desagüe que se construye detrás de la parte alta del talud para desvío de aguas.



Imagen 50. Detalle de la canaleta de desagüe.



Imagen 51. Interrupción de la canaleta en concreto que termina en una quebrada.



Imagen 52. Vegetación del lote aledaño.

d-Las imagenes 50 a 52 dejan ver la caída de agua a una quebrada ocasional, se puede observar la formación de cárcavas, que podrían afectar la pared lateral del talud una vez haya sido intervenido.



Imagen 53.Detalle de pruebas de siembra



Imagen 54.Plantulas de *Brachiaria decumbens*.



Imagen 55. Ensayos de cobertura con pasto *Brachiaria decumbens*.



Imagen 56. Pruebas de cobertura



Imagen 57. Poca viabilidad de la cobertura

e-Las imágenes 53 a 57 dan el detalle de ensayos de cobertura con dos tipos de pastos *Brachiaria* como método de revegetalización inadecuada, ya que no se protegen las especies de la escorrentía según las técnicas apropiadas de bioingeniería.

Todas las fotos son del archivo personal del autor



Imagen 58. Vegetación nativa mezclada con pasturas.



Imagen 59. Arbustos y árboles.



Imagen 60. Detalle de suelo y plántulas de pobre cobertura

f-Las imágenes 58 a 60 son muestra de la vegetación observada en el área de influencia al talud. Detalle del tipo de vegetación arbustiva y pasturas con raíz poco profunda generan escasa protección a los suelos y ser propensos a deslizarse.

Fotografías de la experiencia de revegetalización vista en un tramo cercano a los taludes 73 y 80 de la vía hecho por otra compañía.



Imagen 61. Talud revegetalizado con pastura de manera poco adecuada.



Imagen 62. Crecimiento poco regular de las pasturas.



Imagen 63. Suelos anegados.

g-Ejemplo de un proceso de revegetalización en el que se instalaron bolsas rellenas de material parental y sobre esto sembraron pasto *Brachiaria decumbens*, que como se puede apreciar produce insuficiente arraigo al terreno. Se aprecia un muro de concreto en la parte baja del talud para contener la fuerza del terreno pero eventualmente este puede ceder, al no contar con un soporte suficiente debido a la especie de pasto escogida para la labor de cobertura y revegetalización que posee raíces de poca longitud y fortaleza.



Imagen 64. Canal de desagüe y detalle del cárcavamiento en formación en el talud lateral que terminara afectándolo.



Imagen 65. Detalle de la Tela asfáltica recubre la canaleta y conduce el agua hacia la parte baja del talud.

f- Las imágenes 64 Y 65 evidencian áreas desnudas, suelos anegados como resultado de una inadecuada nivelación del terreno. Adicionalmente se aprecia en las paredes de los taludes laterales no protegidos, la formación de cárcavas que eventualmente podrán afectar la canal de disipación de energía hídrica..

Fuente: Todas las fotos fueron tomadas por el autor en la salida a campo para los km 73 y 80 respectivamente.

Capítulo 5. Discusión de resultados

Las propuestas de montaje de cuatro diferentes combinaciones de estrategias de control de taludes serán discutidas a continuación para determinar cuales se consideran más apropiadas para cada tipo de talud.

En el talud del km73 posee inclinacion superior a los 60° y afloramientos rocosos. El manejo de este tipo talud requiere por parte de la bioingenieria el uso de especies de plantas que logren penetrar en el suelo y retener el suelo de manera apropiada.

La utilización del pasto vetiver es la principal estrategia de control de erosión de taludes por la efectividad de sus raíces. Eboli (2013) refiere a la fortaleza de las raíces del pasto vetiver, las cuales comparó con las puntillas de tierra (generalmente hechas de hierro) ya que demostro que penetraron en el talud que restauró (inclinacion superior a las 60°) a una profundidad de 1.80 y 2.50 m. Tambien pudo demostrar la foracion de red de las raíces, plenamente formada a 60 cm de profundidad.

Debido a lo complejo del terreno del talud en el km 73 se puede decir que la tecnica que combina el uso de pasto vetiver con montaje de fajinas de guadua y esquejes de mata raton puede ser la más apropiada por que mientras se enraizan y fortalecen las plántulas de vetiver, las fajinas podrán ejercer la labor de retención de agua de escorrentia. Una vez establecido el crecimiento de las tres especies vegetales, este talud podrá quedar totalmente reforzado y revegetalizado.

Las raíces del pasto vetiver pueden crecer rapidamente razon por la cual se argumenta su bondad en la restauración de taludes erosionados. Likitlersuang, Lohwongwatana, Vanno & Boonyananta. (s.f.) refieren a que el sistema de raíces del vetiver puede alcanzar una profundidad de 200 cm en un año y el incremento diario de las raíces es de aproximadamente. 10 mm. Likitlersuang, et al. (s.f.).

Con relación a si la raíz del vetiver es verdaderamente fuerte para sostener un talud erosionado, se determino que es la mas fuerte de las plantas para esta labor. Teerawattanasuk, Maneecharoen, Bergado, Voottipruex & Gia (2014) afirma que “las raíces de pasto vetiver (*Vetiver (Chrisopogon) zizanoides* (L.) Nash) tienen mayor resistencia a la tensión que el pasto Ruzi (*Brachiaria ruziziensis*)”(p79), luego de realizar diversas pruebas.

Por su parte Hengchaovanich (1999) afirmo “que la media de fuerza de tension de las raíces de vetiver varia entre 180 to 40 MPa para las que están en los ragos de diámetros

de raíz entre los 0.2~2.2 mm” (p 6). Con este resultado se puede decir que entre mas jóvenes las raíces del vetiver, mayor es u fortaleza y esa es precisamente una de las características por las cuales se puede utilizar como restaurador de suelos en taludes.

Respecto al talud del kilometro 80 de las dos propuestas sugeridas para control de erosion, la más apropiada es la que combina el uso de biotecnica con la neocelda, el pasto vetiver y algunos arbustos frutales. La razón se debe a que en un talud tan extensor, el implementar la neocelda, ayuda de manera inmediata a retener el suelo y afirmar el enraizamiento de las plantulas de vetiver y poseriormente de los arbustos frutales. Adicionalmente hacer uso de biomortero acelerara el proceso de crecimiento de las plantas pues en su mezcla se adicionan nutrients y minerales.

Teerawattanasuk et al (2014) afirmo que “la fortaleza de cohesión la dan las raíces jóvenes y más finas sumado a la composición y adhesión de las partículas del suelo con dichas raíces en comparación a las de mayor diámetro”(p 77), comos e aprecia en la Tabla 10.

Tabla 10. Prueba de Fortaleza directa sobre suelo para determinar la cohesión de las raíces (C_R) y de la cohesión suelo (C_s) en periodos de 2, 3, 4, 5, y 6 meses.

Cohesión del suelo y de las raíces de Vetiver y Ruzi (kPa)										
Periodos de crecimiento (meses)	SUELO	Vetiver			Ruzi			Vetiver + Ruzi		
	Cs	Cs	Cr	Cs+Cr	Cs	Cr	Cs+Cr	Cs	Cr	Cs+Cr
2	8.77	8.77	2.25	11.02	8.77	1.27	10.04	8.77	2.71	11.48
3	8.31	8.31	3.58	11.89	8.31	1.96	10.27	8.31	5.37	13.67
4	9.23	9.23	5.19	14.42	9.23	1.15	10.39	9.23	4.38	13.62
5	9.58	9.58	8.02	17.60	9.58	1.56	11.14	9.58	9.23	18.81
6	8.02	8.02	7.04	15.06	8.02	1.15	9.17	8.02	6.98	15.00

Fuente: Teerawattanasuk et al (2014)

Capítulo 6. Conclusiones

Los resultados presentados en diversos documentos sugieren que el uso exclusivo de técnicas de ingeniería convencional para el control de taludes erosionados no es suficiente y tampoco tiene duración en el tiempo ya que el hierro se corroe con el pasar de los años debilitando las estructuras.

Combinar técnicas de ingeniería convencional con bioingeniería para hacer control de erosión en taludes, de acuerdo con los resultados de procesos exitosos parece ser una buena recomendación a quien desee hacer este tipo de proyectos.

De acuerdo con las investigaciones realizadas por un número importante de autores que se consultaron en este documento se puede recomendar el uso del pasto vetiver por la fortaleza de sus raíces, la rapidez de su crecimiento, la tolerancia a diferentes tipos de suelos.

Las propuestas de control de erosión hechas para los taludes de los kilómetros 73 y 80 en la vía Florencia – Huila, pueden resultar exitosas de acuerdo con los resultados presentados en implementaciones similares en sitios con condiciones de suelo y clima semejantes a las de Florencia en el Departamento del Caquetá.

Se requiere hacer mayor investigación en el uso del pasto Vetiver en diferentes zonas del territorio Colombiano para determinar la factibilidad de ser una adecuada estrategia de control de erosión como se evidenció en los documentos consultados.

Dar un manejo adecuado a los suelos de ladera y taludes, podrá ayudar a controlar procesos erosivos en el corto y mediano plazo en un país donde uno de las amenazas principales es la de deslizamientos.

Se debe buscar un acercamiento entre los profesionales que realizan procesos de revegetalización y restauración de taludes y suelos erosionados con el Ministerio de Ambiente, el INVIAS y otras organizaciones que pueden tomar decisiones respecto al uso de pasto vetiver como una apropiada estrategia de bioingeniería para control de taludes.j

Capítulo 7. Recomendaciones

7.1 Futuras líneas de investigación

Con este documento se pueden tomar referencias que pueden resultar útiles si se desea hacer un mecanismo de control de taludes y suelos erosionados efectivo.

Se sugiere apoyar el uso de técnicas de bioingeniería y que de estas hagan un énfasis en la utilización del pasto vetiver, ya que es evidente en los resultados registrados en el contexto internacional y en algunos casos en el contexto nacional que es una especie resistente y fuerte que ayuda a retener los suelos, aumentando la cohesión de las partículas y mejorando de manera general las condiciones de suelo.

Se pueden generarse líneas de investigación en universidades en conjunto con compañías que desarrollan trabajos de manejo de suelos como son compañías de ingeniería, consorcios viales y otros para seguir mejorando las técnicas implementadas, investigar sobre nuevos productos que acompañen adecuadamente las plantas de los arreglos de bioingeniería y comenzar a dar un apropiado manejo a los suelos de ladera principalmente en zonas contiguas a las vías nacionales.

A nivel de normas y leyes es necesario que se estudien mecanismos para facilitar procesos de manejo de suelos erosionados mediante la aplicación de técnicas de bioingeniería y biotécnica bien sea a través de generación de incentivos para hacer los montajes, facilitar la creación de viveros con las especies vegetales que falta hacen en Colombia como vetiver, permitir la capacitación y entrenamiento a pobladores rurales y otros interesados en apoyar estos procesos e ir introduciendo estas técnicas y el uso de la especie de pasto en normas y documentos gubernamentales que tratan la temática. Esto permitirá a futuro, reducir los riesgos por deslizamientos, generar empleo, mantener la infraestructura en mejores condiciones y dar cambios a las políticas de manejo de suelos a nivel nacional

Como se discute en algunos de los documentos consultados es necesario implementar tecnologías de punta que permitan medir la fortaleza de arraigo y profundidad de la raíz de vetiver para poder establecer la manera de aprovechar sus ventajas biológicas en el amarre de los suelos.

Bibliografía

- Acevedo, L. (2013). Situación y perspectiva de la infraestructura en Colombia en Serfinco. Investigaciones económicas. 28 diapositivas. Recuperado de: <http://www.serfinco.com.co/site/Portals/0/Coyuntura/An%C3%A1lisis%20y%20perspectiva%20de%20la%20infraestructura%20en%20Colombia.pdf>
- Alcaldía de Florencia - Nuestro Municipio. (s.f.). Recuperado de: http://www.florencia-caqueta.gov.co/informacion_general.shtml
- Alegre, J. (2007). Manual sobre el uso y manejo del pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*). Organización Panamericana de la Salud. Pp 1-37.
- Alfárez, L., E. Martínez., y R. Miranda. (2013). La bioingeniería del suelo -modos y aplicaciones comunes-. Trabajo de clase. Edafología. Maestría en ciencias ambientales. 22 p.
- Alberti, J., R. Canales y B. Elizabeth. (2006). Técnicas de mitigación para el control de deslizamientos en taludes y su aplicación en un caso específico. Tesis de grado. Universidad de el Salvador. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Escuela de Ingeniería Civil. San Salvador. 489 p.
- Barlatier, F. (1899). Cours de navigation intérieure de l'Ecolenationale dés ponts et chaussées: rivieres a courant libre. Baudry. Paris.
- Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2014 - 2018. DNP. 780 P. Recuperado de: <https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/prensa/bases%20plan%20nacional%20de%20desarrollo%202014-2018.pdf>
- Bentrup, G. and J. Hoag. (1998). The Practical Streambank Bioengineering Guide. USDA Natural Resources Conservation Service. Plant Material Service. Aberdeen, Idaho. 150 P.
- Cano, I. & N. Zamudio. (2006). Recuperar lo nuestro. Una experiencia de restauración ecológica con participación comunitaria en predios del embalse de chisacá. En: Vargas y Grupo de Restauración Ecológica (eds). Universidad Nacional de Colombia, Acueducto de Bogotá, Jardín Botánico y Secretaría Distrital de ambiente. 126 p. ISBN: 958-701-740-4
- Centeno, F. (2002). Ingeniería biotécnica y bioingeniería. Nuevas tendencias de la geotecnia para las obras de tierra, la estabilización de taludes y el control de la erosión. XVII Seminario Venezolano de Geotecnia. 30 p. Recuperado de: http://www.centenorodriguez.com/files/Trabajo_de_FCP_SVDG_XVII_Seminario_Nov_2002.pdf
- Corpoamazonia, región Caquetá, Naturaleza. Información general. Recuperado de: http://www.corpoamazonia.gov.co/region/Caqueta/Caq_Natural.htm
- Corpoamazonia, región Caquetá, suelos. Recuperado de: http://www.corpoamazonia.gov.co/region/Jur_suelos.htm

- Cortés, A. (1982). Geografía de los suelos en Colombia. Bogotá (Colombia). Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. 161 p. Recuperado de: <http://www.erosion.com.co/presentaciones/category/9-control-de-erosion-en-zonas-tropicales.html?download=59:279-capitulo9-bioingenieria-y-biotecnologia>.
- Desertification land degradation & drought (DLDD)- some global facts & figures. (2015). Recuperado de: <http://www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibrary/WDCD/DLDD%20Facts.pdf>
- Dipendra, G. (2011). Bioengineering: An Innovative Approach towards Sustainability of Civil Engineering Structures. Researchgate. The Civizoic – Civil Engineering Student’s Publication. P 51-54.
- Éboli, J. (2013). Vetiver solution – a total success in landslide stabilization in Itaipava – Petropolis, Rio de Janeiro, Brazil. 12 P.
- Evette, S., Labonne, F., Rey, F., Liebault, O., Jancke & J. Girel. (2009). History of Bioengineering Techniques for Erosion Control in Rivers in Western Europe. Environmental Management. 43: 972-984. DOI 10.1007/s00267-009-9275-y.
- La federación de cafeteros y los gobiernos de Colombia y Alemania celebran el vigésimo aniversario. (s.f.). Recuperado de: http://www.federaciondecafeteros.org/particulares/es/sala_de_prensa/detalle/la_federacion_de_cafeteros_y_los_gobiernos_de_colombia_y_alemania_celebran/
- Finney, K. (1993). History of Soil Bioengineering. Eugene OR: Masters Thesis, University of Oregon. Thesis. P. 7.
- Franti, G. (1997). Bioengineering for Hillslope, Streambank and Lakeshore Erosion Control. Electronic version. pubs@unl.edu. 8p.
- Fondo de Adaptación. (2015). Construcción de obras que brinden solución a sitios críticos para el tramo comprendido entre los prs45+000 y 85+900 de la carretera Málaga (pr0+000)- los curos (pr113+000) en el departamento de Santander. Apéndice b. Especificaciones y normas técnicas obligatorias. 6 p. Recuperado de: <http://fondoadaptacion.gov.co/download/APENDICE%20B%20%20Especificaciones%20Estabilidad%20de%20TaludesMalaga%20-%20Los%20Curos.doc>.
- Florez, A. (1986). Geomorfología del área Manizales – Chinchiná, Cordillera Central, Colombia. Documento de Tesis Doctoral. Amsterdam, Universidad Van Amsterdam. 159 p.
- Fuentes, M. (2006). Técnicas para prevenir derrumbes. Unidad de Medios de Comunicación – Unimedios. Universidad Nacional UN Periódico. 1p. Impreso No. 20. Recuperado de: <http://www.unperiodico.unal.edu.co/dper/article/tecnicas-para-prevenir-derrumbes.html>
- Gomis, C. (s.f.). Experiencias en Bioingeniería implementando el uso del vetiver

- (*Vetiveria zizanioides*, (L) Nash) en diferentes localidades de Venezuela. Recuperado de: <http://www.vetiver.org/ICV4pdfs/BA12es.pdf>
- Gray, D. (1974). Reinforcement and Stabilization of Soil by Vegetation. ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, GT6 pp. 695-699, New York.
- Gray, D. and R. B. Sotir. (1996). Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization. John Wiley. 378 p.
- Greenfield, J. (1990). Vetiver grass: the hedge against erosion. World Bank Publications; 3rd Sub edition. ISBN: 978-0-8213-1405-0. <http://dx.di.org/10.1596/0-8213-1405-X>. 78 p.
- Grimshaw, R. (2013). Past Achievements and future direction of the Vetiver Network International. The Vetiver Network International. 27 p. Recuperado de: www.vetiver.org/TVN_Hist_ppt_pdf.pdf
- Hannam I. and B. Boer. (2002). Legal and Institutional Frameworks for Sustainable Soils: A Preliminary Report. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. xvi + 88 pp. ISBN: 2-8317-0653-X.
- Hengchaovanich, D. (1999). 15 Years of Bio engineering in the Wet Tropics from A (*Acacia auriculiformis*) to V (*Vetiveria zizanioides*). Paper. First Asia – Pacific Conference on Land and Water Bio-engineering, Manila. 11 p.
- Herrera, J. (2015). Evaluación de parámetros de resistencia al corte en suelos de ladera cubiertos con pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en la vía neiva-vegalarga departamento del huila. Trabajo de grado para optar el grado de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia. Director Ing. Jose Vicente Amortegui. Escuela colombiana de ingeniería julio garavito facultad de ingeniería civil programa maestria en ingeniería civil bogotá d.c. 175 p.
- Highland, L. (2004). Landslide types and processes. Factsheet. U.S. Geological Survey Landslide Program. USGS. Science for a changing world. Recuperado de: <http://www.pacificdisaster.net/pdnadmin/data/documents/1411.html> <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/fs-2004-3072.html>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia – IDEAM. (2012). Propuesta del programa nacional de monitoreo y seguimiento de la degradación de suelos y tierras en Colombia: Diseño estructura y estrategias para su implementación. Recuperado de: http://www.ideam.gov.co/documents/11769/153422/20121210_Propuesta_Programa_de_M%26SDS_Nov_23_12_v6.pdf/04ac8b73-303d-4d09-b2f5-9dc8b81b4f54
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia – IDEAM. (2016). Pronósticos y alertas nacionales por amenaza de ocurrencia de deslizamiento de tierra. Recuperado de: <http://www.pronosticosyalertas.gov.co/alertas>

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.- IDEAM - Climatografía de las principales ciudades. Recuperado de: <http://bart.ideam.gov.co/cliciu/floren/temperatura.htm>
- Ibáñez, J.J., De-Alba, S., Bermúdez, F.-F., García-Álvarez, A. (1995). Pedodiversity: concepts and measures. *Catena*. 24, 215–232. 2015.
- Jaimés, N. y A. Pedroza. (2005). Control biomecánico de laderas, en zonas mineras abandonadas. Ejercicios de experimentación con vetiver (proyecto de investigación en marcha). Universidad Francisco de Paula Santander. Grupo de Investigación en Geotecnia Ambiental – SIGIGA. 17 P.
- Lewis, L. (2000). Soil bioengineering - An alternative to roadside management - a practical guide. Technical Report.0077-1801-SDTDC. San Dimas, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, San Dimas Technology and Development Center. 44 p.
- Likitlersuang, S., Lohwongwatana, B., Vanno, S., & Boonyananta, S. (s.f.). Laboratory investigation of vetiver root reinforcement for slope protection. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand. 11p. Recuperado de: http://www.vetiver.org/ICV6_PROC/BIOENGINEERING%20/6%20S%20Likitlersuang%20Paper.pdf
- Luque, J. G., y R. Luque. (s.f.). Control de erosión y sedimentos con sistemas vetiver en margen de río, taludes, cárcavas y minería. Folleto de Vetiver anti erosión. 1p. Venezuela.
- Malagón, D. (1988). El recurso suelo en Colombia –Inventario y Problemática- Rev. Acad. Colomb. Cienc. Vol. 22. Número 82. 13-52. ISSN 0370-3908.
- Malagón, D. (2002). Los suelos de Colombia. Boletín de la Sociedad Geográfica de Colombia. Bogotá, D.C. Vol.46, no.135 [Dic. 2002]; p. 29-53.
- Montoya, Grace Andrea (2016). Investigación postdoctoral: indicadores edafoclimáticos para la adaptación al cambio climático. Universidad de Ciencias Ambientales y Aplicadas, U.D.C.A. Bogotá, Colombia
- McDonald, D., Stenn, H & Berger, J. (2011). The science and practice of sustainable sites: practical implementation of soil protection and restoration. 22 p. Recuperado de: http://depts.washington.edu/uwbg/docs/sites/Sites_Soil_McDonald_Stenn_Berger.pdf
- Mickovski, S. B. & H. van Beek, L. P. (2009). Root morphology and effects on soil reinforcement and slope stability of young vetiver (*Vetiveria zizanioides*) plants grown in semi-arid climate. *Plant Soil*. 324. Pp 43-46. DOI 10.1007/s11104-009-0130-y

- Muñoz, W. (2002). Concesiones viales en Colombia, historia y desarrollo. *Tecnura* 10. 9 p.
- National Research Council – NRC. (1993). *Vetiver grass – a thin green line against erosion*. N D Vietmeyer, Editor. National Academy Press, Washington, D C.
- Oku, E., A. Aiyelari, and P. Truong. (2014). Green Structure for Soil and Water Conservation on Cultivated Steep Land. *Kasetsart J. (Nat. Sci.)* 48: 167 – 174.
- Ospina, O. L., Vanegas, S., Escobar, G.A., Ramirez, W., y J.J. Sánchez. (2015). *Plan Nacional de Restauración. Restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de áreas disturbadas*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Grupo de Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental. 92 p. ISBN: 978-958-8901-02-2. Medio electrónico o digital.
- Osorio, I. (2014). Reseña histórica de las vías en Colombia. *Ingeniería Solidaria*, vol. 10, n.º 17, pp 183-187, en. –dic., 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.16925/in.v10i17.880>.
- Panagiotou, G. (2003). Bringing SWOT into focus. *Business Strategy Review*. Vol 14, Issue 2, pp8-10. DOI: 10.1111/1467-8616.00253. Recuperado de: www.marketingteacher.com.
- Pelaez, M., M. Saldaña y Y Ome (s.f.). Impactos del uso de la tierra sobre los ríos andino-amazónicos. Estudio de caso cuenca río Hacha, en Vanina, A., y L Fernandez. (2008). Efecto de los cambios globales sobre la biodiversidad. CYTED - Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. ISBN: 978-987-05-5533-9
- Petrone, A., y F. Preti. (2010). Soil bioengineering for risk mitigation and environmental restoration in a humid tropical area. *Hydrology and Earth Systems Sciences*. 239-250. Recuperado de: www.hydrol-earth-syst-sci.net/14/239/2010/
- Petrone, A., y F. Preti. (2013). *Soil Bioengineering Measures in Latin America: Autochthonal Cuttings Suitability*. *Landslide science and practice*, vol 7. Springer Berlin Heidelberg. DOI10.1007/978-3-642-31313-4_43.
- Poveda, J., Vargas, G. (2006). Estabilización del talud en el pr 55 + 950 de la vía manizales – mariquita. Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería Civil. 435 p.
- Resende, M. (1985). Aplicações de conhecimentos pedológicos A conservação de solos. *Informe Agropecuario, Bello Horizonte (Brasil)*. 11 (128): pp3 - 18.
- Reyes, A. (2010). El problema de la tierra en Colombia. Publicación en línea Word Press. 8 p. Recuperado de: <https://alejandroreyesposada.wordpress.com/2012/10/31/el-problema-de-la-tierra-en-colombia/>
- Reyes, N., y M, España. M. (2008). La radiación solar en Florencia, centro de investigaciones Macagual Caquetá. *Revista Momentos de la Ciencia*. Vol 5. Num

1. ISSN 1692 – 5491. Recuperado de:
<http://www.udla.edu.co/revistas/index.php/momentos-deciencia/article/view/154>
- Richardson, D. and M. Rejmánek. (2011). Trees and shrubs as invasive alien species – a global review. *Diversity and distributions. A journal of conservation biogeography.* 10.1111/j.1472-4642.2011.00782.x. Recuperado de:
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1472-4642.2011.00782.x/abstract>
- Rincón Romero et al., (2012), p. 2., en Nieto, O., L. Jiménez y Nieto, M. (2014). Variación de coberturas forestales y ocupación del territorio en el municipio de Armenia 1939-1999. *Luna Azul.* ISSN 1909-2474. No. 42. Enero – junio 2016. DOI: 10.17151/luaz.2016.42.19. Recuperado de:
http://lunazul.ucaldas.edu.co/downloads/Lunazul42_19.pdf.
- Rivera, J. (1988). Plan de Uso, Manejo y Conservación de Suelos del Centro Experimental Cotové. Sociedad Colombiana De La Ciencia Del Suelo. *Revista Suelos Ecuatoriales* V.18 fasc.2 p.118 - 125 ISSN: 0562-5351
- Rivera, J., Sinisterra, R. J., Calle, D. Z. (s.f.). Restauración Ecológica de suelos degradados por Erosión en Cárcavas en el enclave xerofítico de Dagua, Valle del Cauca, Colombia. Área de restauración ecológica de CIPAV. Centro para la investigación en sistemas sostenibles para la producción agropecuaria. Recuperado de: <http://www.cipav.org.co/noticias/noticias-n01.html>.
- Rivera, J. (2013). Experiencias de casos exitosos, con el uso de la bioingeniería en el control de problemas de erosión y movimientos masales. Documento PDF. 27 p. Ponencia del VI Seminario de Gestión Ambiental internacional – SIGA 2013. Recuperado de:
<http://www.idiger.gov.co/documents/10180/57166/experiencias+de+algunos+casos+exitosos.pdf/bbd9c78f-4ab7-4a64-a666-c112a771b635> 2015.
- Rodríguez, C. (2006). Apuntes curso de estabilidad de taludes. Maestría en geotecnia. Universidad Nacional de Colombia. Semestre 1.
- Romero, M., E. Cabrera y Ortiz, N. (2008). Informe sobre el estado de la biodiversidad en Colombia 2006-2007. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 181 p. ISBN 978-958-8343-22-8
- Sangalli, P. (s.f.). Material vegetal vivo como elemento de construcción. ¿Qué es la ingeniería biológica o la “bioingeniería”? *Arquitectura del paisaje. Construcción y medio ambiente.* 8 p. Recuperado de:
<http://www.horticom.com/pd/imagenes/61/269/61269.pdf>.
- Sangalli, P. y Valenzuela, M. (2008). Bioingeniería o Ingeniería Biológica – Introducción a la Bioingeniería Biológica o Ingeniería Biológica. AEIP Asociación Española de Ingeniería del Paisaje. 1-14

- Singh, A. K. (2010). Bioengineering techniques of slope stabilization and landslide mitigation. *Disaster Prevention and Management*.19: 384. Recuperado de: <http://www.emeralinsight.com/journals.htm?articleid=1865068&show=abstract>.
- Soluciones para la infraestructura vial Neoweb®. (s.f.). Sistema de confinamiento celular. Geosistemas PAVCO. Recuperado de: <http://www.pavco.com.co/2/refuerzo-de-vias/5-47-325/i/325>.
- Stiles, R. (1988). *Engineering with Vegetation, Landscape Design*. (172): 57-61.
- Suárez, J. (1998). Deslizamiento y estabilidad de Taludes en zonas tropicales. Universidad Industrial de Santander. Instituto de Investigación sobre erosión y deslizamientos. Recuperado de: <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonas-tropicales.html>.
- Suárez, J. (2001). Control de erosión en zonas tropicales. Instituto de Investigaciones sobre erosión y deslizamientos. Universidad Industrial de Santander. ISBN 958-33-2734-4
- Teerawattanasuk, C., J. Maneecharoen , D. T. Bergado, P. Voottipruex & L. Gia Lam. (2014). *Lowland Technology International*. Vol. 16, No. 2, 71-80. International Association of Lowland Technology (IALT), ISSN 1344-9656. Recuperado de: www.ilt.saga-u.ac.jp/ialt/lti/jnls/php/decide_open.php?file=16-2-9.pdf
- Truong, P. (1994). Back from the future: Do's and Don'ts after 50 years of Vetiver utilization in Fiji. Resource Management Institute, Queensland Department of Primary Industries. Recuperado de: www.vetiver.org/FIJI_15.HTM.
- Truong, P. (2000). Vetiver Grass System: Potential Applications for Soil and Water Conservation in Northern California. Paper. Stiff grass technology seminar. Woodland, Ca. P. 562 -571.
- Truong, P. (2014). Extreme Slope Stabilisation Using Vetiver System. Pacific Rim Vetiver Network, Office of the Royal Development Projects Board, Bangkok. ISBN No.: 978 - 616 - 7671 - 20 – 8. 56 p. Recuperado de: http://www.vetiver.org/TVN_Extreme%20slope_pub.pdf
- Vanegas, S., Ospina, O., Escobar, G., Ramírez, W., y J. Sánchez. (2015). Plan Nacional de Restauración: restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de áreas disturbadas. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Grupo de Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental. 92 p. ISBN: 978-958-8901-02-2 Medio electrónico o digital.
- Van Westen, C. (s.f.). Introducción a los deslizamientos. Tipos y causas. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Enschede, The Netherlands. UNESCO – RAPCA. 7 p. Recuperado de: <https://www.itc.nl/external/unescorapca/Presentaciones%20Powerpoint/04%20Amenaza%20por%20Deslizamientos/Introduccion%20a%20los%20Deslizamientos.pdf>.

- Verheye, W. (2015). Soils of the humid and sub humid tropics. Land use, land cover and soil science. Vol VII. National Science Foundation Flanders/Belgium and Geography Department, University of Gent, Belgium.8 P. Recuperado de: <http://www.eolss.net/Eolss-sampleAllchapter.spx>
- Vetivernet. (2016). El Biomortero. Pdf. 3p. Recuperado de:http://vetivernet.com.co/norma_biomortero.pdf
- Li, X., Zhang, L and Zhang, Z. (2006). Soil bioengineering and the ecological restoration of riverbanks at the Airport Town, Shanghai, China. Ecological Engineering 26. P 304 – 314.
- Wischmeier, W. H., C. B. Johnson, and B. V. Cross. (1971). Soil credibility nomograph for farmland and construction sites. Journal of Soil and Water Conservation 26:189-193. Recuperado de: www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/es/.
- Zamudio, C. y T. León. (2008). Transferencia y adopción de prácticas de agricultura de conservación del “proyecto Checua”, en los municipios de Caldas (Boyacá y Nemocón (Cundinamarca). Revista Gestión y Ambiente. Vol. 11. P 149 – 162. ISSN: 2357-2905.