



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**COMPARACIÓN DE LA BIOINGENIERÍA CON LOS MÉTODOS TRADICIONALES PARA LA
REDUCCION DE RIESGOS Y SU APLICACIÓN COMO REFUERZO ESTRUCTURAL SOBRE
DIQUES LONGITUDINALES EN DIFERENTES PUNTOS DE LA COSTA SUR DE
GUATEMALA**

Cecilia María De León Solís

Asesorado por el Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez

Guatemala, marzo de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN DE LA BIOINGENIERÍA CON LOS MÉTODOS TRADICIONALES PARA LA
REDUCCION DE RIESGOS Y SU APLICACIÓN COMO REFUERZO ESTRUCTURAL SOBRE
DIQUES LONGITUDINALES EN DIFERENTES PUNTOS DE LA COSTA SUR DE
GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CECILIA MARÍA DE LEÓN SOLÍS

ASESORADO POR EL ING. YEFRY VALENTÍN ROSALES JUÁREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, MARZO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Raleón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
EXAMINADORA	Inga. Carmen Marina Mérida Alva
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

COMPARACIÓN DE LA BIOINGENIERÍA CON LOS MÉTODOS TRADICIONALES PARA LA REDUCCION DE RIESGOS Y SU APLICACIÓN COMO REFUERZO ESTRUCTURAL SOBRE DIQUES LONGITUDINALES EN DIFERENTES PUNTOS DE LA COSTA SUR DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 8 de noviembre de 2019.

Cecilia María De León Solís

Guatemala, 21 de agosto del 2019

Ingeniero
Juan Carlos Linares
Coordinador del área de planeamiento.
Facultad de ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Juan Carlos Linares:

Le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado "COMPARACIÓN DE LA BIOINGENIERÍA CON LOS MÉTODOS TRADICIONALES PARA LA REDUCCIÓN DE RIESGOS Y SU APLICACIÓN COMO REFUERZO ESTRUCTURAL SOBRE DIQUES LONGITUDINALES, EN DIFERENTES PUNTOS DE LA COSTA SUR DE GUATEMALA" desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil Cecilia María De León Solís, quien conto con mi asesoría.

Considero que el trabajo realizado por el estudiante satisface los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,


Yefry Valentín Rosales Juárez
INGENIERO CIVIL
Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez
No. de Colegiado 7177



Guatemala, 16 de septiembre de 2020
EIC-JP-011-2020/jcl

Ingeniero
Pedro Antonio Aguilar Polanco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

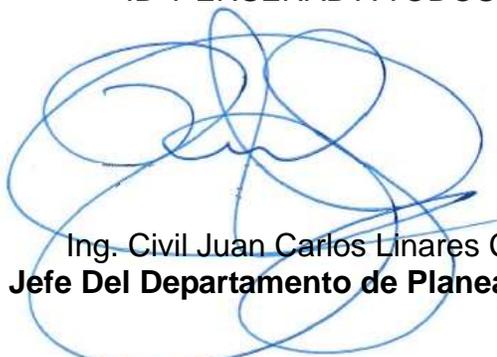
Ingeniero Aguilar:

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **COMPARACION DE LA BIOINGENIERÍA CON LOS METODOS TRADICIONALES PARA LA REDUCCION DE RIESGOS Y SU APLICACIÓN COMO REFUERZO ESTRUCTURAL SOBRE DIQUES LONGITUDINALES EN DIFERENTES PUNTOS DE LA COSTA SUR DE GUATEMALA**, desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil Cecilia María De León Solís, quien contó con la asesoría del Ingeniero Yefry Valentín Rosales Juárez.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la Ingeniería nacional y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Civil Juan Carlos Linares Cruz
Jefe Del Departamento de Planeamiento

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO
DE
PLANEAMIENTO
USAC

Cc: Estudiante Cecilia María De León Solís
Archivo





El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez y Coordinador del Departamento de Planeamiento Ing. Juan Carlos Linares Cruz al trabajo de graduación de la estudiante Cecilia María De León **COMPARACIÓN DE LA BIOINGENIERÍA CON LOS MÉTODOS TRADICIONALES PARA LA REDUCCION DE RIESGOS Y SU APLICACIÓN COMO REFUERZO ESTRUCTURAL SOBRE DIQUES LONGITUDINALES EN DIFERENTES PUNTOS DE LA COSTA SUR DE GUATEMALA**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Sin otro particular, le saludo muy atentamente.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Armando Fuentes Roca
Director Escuela Ingeniería Civil

Guatemala, febrero 2021
/mrrm.



DTG. 075.2021.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **COMPARACIÓN DE LA BIOINGENIERÍA CON LOS MÉTODOS TRADICIONALES PARA LA REDUCCION DE RIESGOS Y SU APLICACIÓN COMO REFUERZO ESTRUCTURAL SOBRE DIQUES LONGITUDINALES EN DIFERENTES PUNTOS DE LA COSTA SUR DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Cecilia María De León Solís**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
★

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, marzo de 2021.

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

**Dios y a la
Virgen María**

Por ser mi guía y mi compañía en los momentos difíciles.

Mi madre

Dora Cecilia De León, por todo el apoyo y el amor que me dedicó a lo largo de mi carrera y de mi vida entera.

Mis abuelos

Mario René De León y María Dolores de León, por ser los pilares de mi educación y amarme incondicionalmente.

Mis hermanas

Roshell y Josseline Carranza, por darme su cariño, apoyo y una familia con quien compartir mis logros.

Mis amigos

Por permanecer junto a mí en los momentos difíciles y motivarme a seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios y a la Virgen María	Por ser mi guía y mi compañía en los momentos difíciles.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por prepararme como profesional en esta casa de estudio.
Mi asesor	Ing. Yefry Valentín Rosales, por compartir sus conocimientos y dedicarle el tiempo necesario a este trabajo de graduación.
Mi madre	Por haber creído en mí siempre y darme la oportunidad de estudiar.
Mi hermana	Roshell Carranza, por ser mi confidente, mi apoyo y motivación para salir adelante.
Mis amigos	Rafael Hernández, Sonia Guamuch, Karina Barrios, Nathalie Morán, Oscar Esquivel, Oscar Montes, Francisco Castellanos, Allan Mejía, Rudy García, Martin Velásquez y César Castillo, por ser parte importante de este logro.
Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático	Por darme la oportunidad de participar en el proyecto y compartir sus conocimientos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Inundación	1
1.1.1. Definición de inundación.....	1
1.1.2. Tipos de inundación.....	1
1.1.2.1. Inundaciones repentinas.....	2
1.1.2.2. Inundaciones fluviales	2
1.1.2.3. Inundaciones costeras.....	3
1.1.3. Contribución de los seres humanos.....	3
1.1.4. Vulnerabilidad	4
1.1.5. Efectos adversos típicos	5
1.1.5.1. Daños físicos	5
1.1.5.2. Muertes y Salud Pública	5
1.1.5.3. Suministro de agua.....	6
1.1.5.4. Cosechas y suministro de alimentos	6
1.1.6. Posibles medidas de reducción del riesgo.....	8
1.1.6.1. Mapa de la tierra de aluvión.....	8
1.1.6.1. Mapa de riesgos múltiples	9
1.1.6.1. Control del uso de la tierra.....	9

	1.1.6.2.	Control de la inundación.....	13
	1.1.7.	Antecedentes en Guatemala.....	14
	1.1.8.	Vulnerabilidad de Guatemala.....	16
1.2.		Obras de mitigación de tipo estructural.....	20
	1.2.1.	Definición de dique longitudinal.....	21
	1.2.2.	Tipos de diques construidos en la costa sur de Guatemala.....	21
	1.2.2.1.	Diques de arena.....	23
	1.2.2.2.	Enrocado.....	24
	1.2.2.3.	Espigones.....	26
	1.2.2.4.	Gaviones.....	27
	1.2.2.5.	Colchoneta gavión.....	30
	1.2.2.6.	Diques de arena y refuerzo de jumbos	31
2.		BIOINGENIERÍA.....	33
	2.1.	Vegetación.....	33
	2.2.	Características de las plantas y del suelo fértil.....	34
	2.3.	Efectos hidrológicos de la vegetación.....	35
	2.3.1.	Intercepción de la lluvia.....	36
	2.3.2.	Retención de agua.....	36
	2.3.3.	Acumulación de agua.....	36
	2.3.4.	Goteo o flujo por el follaje.....	37
	2.3.5.	Evapotranspiración.....	37
	2.3.6.	Sobrecarga y fuerzas del viento.....	39
	2.3.7.	Otros efectos negativos.....	39
	2.4.	Características de las raíces.....	39
	2.4.1.	Acción de refuerzo de las raíces.....	42
	2.4.2.	Efecto de anclaje.....	46
	2.5.	Bioingeniería.....	47

2.5.1.	Limitaciones de la protección vegetal	48
2.5.2.	Selección de especies vegetales.....	49
2.5.3.	Siembra y establecimiento.....	50
2.5.3.1.	Estacas vivas.....	51
2.5.3.2.	Fajinas vivas.....	53
2.5.3.3.	Estructuras y revestimientos artificiales con vegetación.....	55
2.6.	Bioingeniería en el ámbito fluvial.....	55
2.7.	Sistemas de vegetalización de orilla.....	57
2.7.1.	Cordones de vegetación.....	57
2.7.2.	Estacas vivas de arbustos nativos.....	58
2.7.3.	Barreras longitudinales de ramas vivas	59
2.7.4.	Trinchos vivos.....	59
2.7.5.	Diques contra inundación	60
2.7.6.	Revestimiento de canales con vegetación.....	60
2.7.7.	Espigones de vegetación.....	61
2.7.8.	Vegetalización de orillas de lagos.....	64
2.8.	Guía para el diseño de obras de bioingeniería para estabilizar riberas de corrientes.....	65
2.8.1.	Caracterización de la hidrología	65
2.8.2.	Determinación de las condiciones hidráulicas	66
2.8.3.	Análisis de los procesos geomorfológicos	68
2.8.4.	Análisis geotécnico	70
2.8.5.	Aspectos de la vegetación.....	71
2.8.6.	Requerimientos para la preservación de la fauna acuática y terrestre	72
2.8.7.	Viabilidad de la construcción	73
3.	PASTO VETIVER (<i>VETIVERIA ZIZANIOIDES L.</i>)	75

3.1.	Características morfológicas	77
3.2.	Características fisiológicas	78
3.3.	Características ecológicas	79
3.4.	Tolerancia de la planta de vetiver al frío.....	80
3.5.	Características mecánicas de las raíces del vetiver.....	80
3.6.	Usos del pasto vetiver	81
3.6.1.	Control de la erosión	82
3.6.2.	Usos	82
3.6.2.1.	Protección de las terrazas de mampostería o barreras de rocas ..	83
3.6.2.2.	Protección de puentes.....	84
3.6.2.3.	Protección de acueductos	85
3.6.2.4.	Utilización de vetiver en techos para construcciones rurales	85
3.6.3.	Otros usos.....	86
3.7.	Pasto vetiver y la climatología guatemalteca	87
3.7.1.	El pasto vetiver en la región con condiciones más secas de Guatemala.....	87
3.7.2.	El pasto vetiver en la región con condiciones más lluviosas de Guatemala	88
3.8.	Desarrollo experimental	89
3.8.1.	Descripción del ensayo a tensión.....	89
3.9.	Diseño de la siembra en talud utilizando el pasto vetiver.....	96
3.9.1.	Calidad del material para la plantación	97
3.9.2.	Distancias de siembra	97
3.9.3.	Preparación del terreno.....	99
3.9.4.	Preparación mecánica del sustrato	100
3.9.5.	Plantación de esquejes	100
3.9.6.	Preparación de esquejes.....	101

3.9.7.	Siembra	101
3.9.8.	Cuidados posteriores a la plantación.....	102
4.	BIOINGENIERÍA EN OBRAS DE MITIGACIÓN DE TIPO ESTRUCTURAL EN GUATEMALA.....	105
4.1.	Antecedentes.....	105
4.2.	Análisis de bordas	105
4.2.1.	Santa Odilia, río Coyolate.....	105
4.2.1.1.	Fases que se utilizaron en la construcción.....	110
4.2.1.2.	Evaluación de borda en Santa Odilia.	116
4.2.2.	Comunidad Los Naranjos, río Paz	116
4.2.2.1.	Evaluación de borda sobre río Paz....	119
4.2.3.	Las Pozas, río Los Esclavos.....	120
4.2.4.	Evaluación de la borda sobre el río Los Esclavos	123
4.3.	Comparación de la bioingeniería con los métodos tradicionales.....	125
4.3.1.	Ventajas.....	125
4.3.2.	Desventajas	126
4.4.	Integración de costos de borda con bioingeniería	132
	CONCLUSIONES	139
	RECOMENDACIONES	141
	BIBLIOGRAFÍA.....	143

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Zonas susceptibles a inundación para diferentes periodos de retorno	10
2.	Amenaza de inundaciones en Guatemala.....	19
3.	Borda de arena realizada en el municipio de Masagua sobre el río Guacalate.....	23
4.	Corte transversal de enrocado	25
5.	Enrocado realizado en Santa Odilia sobre el río Coyolate	25
6.	Bordas ejecutadas en finca Las Lagunas sobre el río Samalá.....	27
7.	Borda en el cantón El Amatillo sobre el río Coyolate	29
8.	Bordas ejecutadas en aldea Canoguitas, sobre el río Coyolate.....	31
9.	Bordas ejecutadas en Cerro Colorado, sobre el río Coyolate	32
10.	Efectos de la vegetación sobre la estabilidad de una ladera.....	34
11.	Esquema del efecto de la vegetación sobre el modelo hidrológico subsuperficial	37
12.	Tipos de raíz	40
13.	Refuerzo de superficie de falla por las raíces de los árboles	43
14.	Talud tipo A	44
15.	Talud tipo B	44
16.	Talud tipo C.....	45
17.	Talud tipo D.....	46
18.	Estacas vivas	53
19.	Fajinas vivas	54
20.	Refuerzo con vegetación de los puntos críticos de un río.....	62
21.	Espigones de troncos y ramas vivas.....	64

22.	Protección de la ribera de un lago utilizando vegetación	65
23.	Protección de terrazas	83
24.	Funcionamiento del vetiver	84
25.	Colocación del vetiver para protección	84
26.	Protección de canal de concreto.....	85
27.	Techos en casas rurales.....	86
28.	Plantación del pasto en ingenio Magdalena	90
29.	Trenzado de raíces para la formación de una probeta	91
30.	Distanciamientos de cercos de vetiver.....	97
31.	Especificaciones para la siembra.....	102
32.	Cuenca del río Coyolate	106
33.	Área seleccionada para la implementación de la parcela demostrativa en el plan DIPECHO VI, en la comunidad de Santa Odilia.....	108
34.	Ubicación del proyecto en las coordenadas 14° 02' 05.9" N, 91°16'35.7"W	109
35.	Borda de bioingeniería con doble lancero, cubierta de tierra negra y estacas de sauce	110
36.	Perfil de la colocación de los postes en la base de las bordas	111
37.	Colocación de estacas vivas con medidas de 5 metros.....	112
38.	Siembra de estacas o esquejes de especies pastizales con capacidad de rebrote para fines de estabilización del primer sustrato de suelo de la borda.....	113
39.	Recuperación de la biodiversidad y consolidación de la borda, meses después de terminada la obra	114
40.	Consolidación de la borda años después de terminada la obra	115
41.	Perfil de la colocación de los postes en la base de la borda sobre el río Paz.....	117

42.	Borda de bioingeniería con un solo lancero, refuerzo del posteo vertical con sacos llenos de arena.....	118
43.	Posteo y colocación de la barrera de protección con sacos de la borda sobre el río Paz	119
44.	Consolidación de la borda años después de terminada la obra sobre río Paz.....	120
45.	Ubicación del proyecto en las coordenadas 13° 54'1 5.52" N, 90° 16' 24.49" O	122
46.	Borda de bioingeniería con un solo lancero, cubierta de tierra negra y vetiver o camalote	123
47.	Consolidación de la borda años después de terminada la obra sobre el río Los Esclavos	124

TABLAS

I.	Población vulnerable a las inundaciones (por departamento).....	18
II.	Componente de la planta y sus funciones.....	35
III.	Sistemas de protección utilizando biotecnología.....	48
IV.	Ventajas y desventajas de los diversos tipos de planta	50
V.	Árboles utilizados para cercas vivas y estabilización de taludes.....	52
VI.	Espaciamiento recomendado para fajinas vivas	55
VII.	Velocidades máximas permisibles en canales revestidos con vegetación	62
VIII.	Parámetros hidráulicos para la selección de las técnicas	67
IX.	Clasificación científica del pasto vetiver	78
X.	Resistencia a la tensión de algunas plantas	81
XI.	Descripción de número de plantas por muestra	92
XII.	Resultados obtenidos con el ensayo de tensión	93
XIII.	Comparación usando máquina electrónica	95

XIV.	Comparación usando máquina universal.....	96
XV.	Distancias de siembra.....	98
XVI.	Ventajas y desventajas de los métodos tradicionales utilizados en Guatemala	128
XVII.	Integración de borda con bioingeniería utilizando vetiver	133
XVIII.	Integración de borda con bioingeniería utilizando vetiver, postes y estacas	134
XIX.	Integración de borda con bioingeniería utilizando vetiver, postes, estacas y jumbos.....	135
XX.	Comparativa entre los métodos utilizados en Guatemala.....	136

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetros
°C	Grados centígrados
kg	Kilogramos
km	Kilómetros
MPa	Megapascal
%	Porcentaje
m	Metro
mm	Milímetro

GLOSARIO

Aluvial	Suelos que se han formado a partir de materiales arrastrados y depositados por corrientes de agua.
Agradación	Ocurre cuando los sedimentos de un río superan la cantidad que dicho río puede arrastrar en su cauce.
Biorremediación	Cualquier proceso que utilice microorganismos, hongos, plantas o las enzimas derivadas de ellos para retornar a un medio ambiente alterado por contaminantes a su condición natural.
Canto	Piedra o fragmento de ella.
Casuística	Razonamiento basado en casos.
Coluvión	Es un aluvión constituido por los granos más finos del limo y arena, transportados a corta distancia por la arroyada difusa.
Estaca	Es un fragmento de tallo con yemas de consistencia leñosa que se separa de un árbol o de un arbusto y se introduce en el suelo o en un sustrato, para que arraigue en él y forme una nueva planta.

Estolón	Tipo de tallo que tienen las plantas que suele nacer en la base de los tallos principales, es más débil y se va arrastrando sobre la tierra, mientras desarrolla nuevas raíces con las que producirá nuevas plantas.
Hidrófito	Son plantas adaptadas a los medios muy húmedos o acuáticos.
Junco	Plantas angiospermas monocotiledóneas, de tallos delgados, lisos, cilíndricos y flexibles, que se crían en sitios húmedos.
Meándrico	Concerniente y perteneciente al meandro. Se refiere a cada una de las figuras curvaturas en que se describe una rivera o río, y también a la disposición de una senda o un camino.
Revegetalizar	Es una práctica que consiste en devolver el equilibrio o restaurar la cubierta vegetal de una zona donde sus formaciones vegetales originales están degradadas o alteradas.
Reproducción asexual	Se da en las plantas cuando una parte de ellas se divide (tallo, rama, brote, tubérculo, rizoma...) y se desarrolla por separado hasta convertirse en una nueva planta.
Siega	Cortar mieses o hierba para recolectarlas, generalmente con hoz y guadaña.

Vernáculo

Originario y propio de una determinada zona geográfica bien delimitada.

Xerófita

Es una especie de planta que tiene adaptaciones para sobrevivir en un ambiente con poca agua líquida.

RESUMEN

Guatemala es un país que se caracteriza por desastres a causa de fenómenos naturales frecuentes; debido a sus características hídricas es altamente vulnerable a inundaciones y los efectos de la falta de una reacción temprana para prevenir desastres siguen experimentándose. Por lo que en el presente trabajo se presentan los antecedentes y las técnicas tradicionales para mitigar estos desastres en el país.

En el siguiente capítulo se describen los antecedentes de la vegetación en las riberas que ha demostrado una resistencia importante a la erosión, siendo los cauces que poseen abundante vegetación los que presentan generalmente menor problema y a la explicación de la bioingeniería, ya que este es un campo que se debe explorar y expandir en el país, debido a los beneficios que puede brindar en la reducción de riesgo en las comunidades aledañas a ríos.

Luego se realizó un estudio de la planta vetiver, por ser la especie que se aplica en las técnicas de bioingeniería en la costa sur de Guatemala, la cual si es sembrada correctamente puede formar una sólida cobertura que evita la erosión.

Finalmente se presentan las bordas con bioingeniería, realizadas en la costa sur y su evaluación, una integración de los costos aplicados y la comparación de los métodos tradicionales con la experiencia de bioingeniería adquirida.

OBJETIVOS

General

Analizar la aplicación de la bioingeniería como un refuerzo estructural sobre diques longitudinales para la reducción de riesgos en la costa sur de Guatemala.

Específicos

1. Identificar cuáles son los métodos tradicionales de obras de mitigación de tipo estructural más utilizados en la costa sur del país.
2. Describir el método de bioingeniería utilizado y enumerar los beneficios que tiene su implementación en las áreas de la costa sur en que fue aplicada para la reducción de riesgo.
3. Comparar la factibilidad técnico-económica de la bioingeniería con las obras tradicionales de tipo estructural.

INTRODUCCIÓN

Las riberas de los ríos son áreas muy degradadas, especialmente por su utilización para agricultura, para vías de comunicación y urbanizaciones, debido a que son zonas de menor pendiente, así como para la explotación de materiales, rectificación de los cauces, entre otros. Por lo que Guatemala se considera un país altamente vulnerable a inundaciones.

Para prevenir las inundaciones en campos aledaños a los ríos se construyen diques longitudinales conocidos como bordas que cumplen la función de contener el empuje del agua, y en algunos casos también, son utilizados para encajonar la corriente del río.

Debido a la manera en que son construidos los diques longitudinales en Guatemala, esto constituye un riesgo para las comunidades por diferentes factores, sin mencionar los costos en millones de quetzales que causan las inundaciones anualmente. Para la construcción de dichos diques, la bioingeniería es una alternativa que puede traer grandes beneficios.

La bioingeniería se refiere a “una disciplina técnico-científica que estudia las modalidades de uso como materiales de construcción en intervenciones de control de erosión, de contención y recuperación ambiental, de plantas vivas (vetiver), de partes de plantas o de asociaciones vegetales, a menudo en combinación con materiales orgánicos muertos y no orgánicos naturales (piedras, tierra, entre otros) y sintéticos (hierro, plástica, entre otros)”¹.

Esta se utiliza para consolidar y corregir laderas y orillas de ríos que presentan inestabilidad o erosión, y proteger el suelo de los fenómenos de deslizamiento, derrumbes y de erosión.

El vetiver es una especie vegetal que, cuando se siembra correctamente puede formar una sólida cobertura que sirve para prevenir la erosión, formar terrazas naturales e incrementar el almacenamiento de la humedad del suelo; ya establecida puede resistir sequías e inundaciones. Actualmente se utiliza en las técnicas de bioingeniería aplicadas en los diques longitudinales en la costa sur del país. La bioingeniería es utilizada en múltiples proyectos alrededor del mundo; en Guatemala su aplicación en bordas aún es un proyecto en evolución.

En el presente trabajo de graduación se tiene por objeto ampliar el conocimiento sobre la bioingeniería y sus aplicaciones, así como la comparación de las técnicas tradicionales aplicadas a bordas en cauces de ríos, para reducir el impacto de inundaciones en la costa sur del país. Los estudios establecerán los parámetros que se deben tomar en cuenta para la realización de obras de mitigación de tipo estructural con bioingeniería y determinarán la compatibilidad de la construcción con su medio, así como las características que afectan el comportamiento, para comparar los resultados con las técnicas tradicionales

¹ CROCETTI, Cesare; FERRARI, Roberto; PETRONE, Alessandro. *Estimación de Vulnerabilidades y Reducción del Riesgo de Desastres a Nivel Municipal en el Ecuador*. Ecuador, 2012. p. 4.

1. ANTECEDENTES

1.1. Inundación

Las inundaciones se producen por crecimiento del caudal de las aguas de un río, lago o laguna, que como consecuencia de las lluvias aumenta. Estos fenómenos naturales son causantes de la destrucción de campos de cultivo, a veces de poblados, y dejan una secuela infecciosa que ocasiona enfermedades y epidemias.

1.1.1. Definición de inundación

La inundación puede definirse como una incursión lenta o violenta de aguas de río, lagunas o lagos, debido a fuertes precipitaciones fluviales o rupturas de embalses, causando daños considerables. Se puede presentar en forma lenta o gradual en llanuras y de forma violenta o súbita en regiones montañosas de alta pendiente; es un fenómeno natural por el cual el agua cubre los terrenos, llegando en ciertas ocasiones a tanta altura que puede dejar sumergidas viviendas y calles, destruir cosechas, con peligro incluso vital para toda la población que habiten el lugar, y enormes pérdidas económicas. ²

1.1.2. Tipos de inundación

A continuación, se describen los diversos tipos de inundación.

² DEBROISE, Anne; SEINANDRE, Érick. *Fenómenos naturales: un planeta activo*. p. 127.

1.1.2.1. Inundaciones repentinas

Normalmente se les define como inundaciones que ocurren dentro de las primeras seis horas de lluvia intensa, y comúnmente están asociadas con nubes cúmulo altas, truenos, ciclones tropicales, o el paso de frentes de clima frío. Este tipo de inundación requiere advertencias localizadas rápidas y respuesta inmediata de las comunidades afectadas, si se desea mitigar los daños.³

Las inundaciones repentinas suelen ser el resultado del aflujo de una lluvia torrencial, particularmente si las pendientes de la cuenca de captación no pueden absorber y retener una parte significativa del agua.

1.1.2.2. Inundaciones fluviales

Las inundaciones fluviales son causadas normalmente por precipitación sobre cuencas de captación extensas o por derretimiento de la acumulación invernal de nieve o, a veces, por ambos.

Las inundaciones ocurren en sistemas de ríos con afluentes que descargan las aguas de áreas geográficas grandes e incluyen muchas cuencas fluviales independientes.⁴

En contraste con las inundaciones repentinas, las inundaciones fluviales suelen gestarse lentamente; a menudo son estacionales, y pueden continuar por varios días o semanas. Los factores que regulan la magnitud de la inundación incluyen las condiciones del terreno y el tamaño de la cuenca de captación.

³ REED, Sheila. *Introducción a las amenazas*. p. 84.

⁴ Ibid.

1.1.2.3. Inundaciones costeras

Algunas inundaciones se deben a ciclones tropicales (también llamados huracanes y tifones). Las inundaciones catastróficas causadas por las lluvias a menudo se agravan por las olas de tormenta impulsadas por los vientos a lo largo de la zona costera. El agua salada puede inundar la tierra como consecuencia de mareas altas, oleaje de tempestad o tsunamis, ya sea por separado o en combinación.⁵

1.1.3. Contribución de los seres humanos

Las inundaciones son amenazas que ocurren naturalmente. Se convierten en desastres cuando hay asentamientos humanos en las tierras aluviales. La presión poblacional es ahora tan grande que ha habido que contemplar los riesgos asociados con inundaciones debido a la necesidad cada vez más grande de encontrar un lugar donde vivir.⁶

La combinación del aumento en la población con una deficiente administración de recursos ha creado nuevos tipos de inundación. La conversión de bosques a tierras de pastoreo o de cultivo en la cuenca de captación se traduce en una menor cantidad de agua retenida en las partes superiores de la cuenca; el aumento en el escurrimiento fluye rápidamente hacia la planicie, con el efecto de crear inundaciones más frecuentes e inesperadas, y más severas.

Otro tipo de inundación que es cada vez más común es la inundación repentina urbana.

⁵ REED, Sheila. *Introducción a las amenazas*. p. 85.

⁶ *Ibíd.*

Las edificaciones y los caminos que cubren el terreno impiden que se filtre el agua de lluvia, con lo cual este escurre sobre las superficies impermeables, formando ríos artificiales.

El descuido o falta de mantenimiento de los sistemas de desagüe, particularmente después de temporadas largas sin lluvias en las que el polvo, desechos y vegetación han bloqueado el flujo natural del agua, pueden agravar la frecuencia de las inundaciones repentinas.

1.1.4. Vulnerabilidad

En las tierras aluviales las edificaciones hechas de tierra, adobe o de argamasa soluble, los edificios con cimientos poco profundos o que no resisten la fuerza del agua o de las inundaciones corren un gran riesgo de ser dañados.⁷

Los elementos de infraestructura que corren riesgo incluyen a los servicios como sistemas de drenaje, suministro de agua y electricidad, así como maquinaria y aparatos electrónicos necesarios para la industria y las comunicaciones. También son fuente de gran preocupación los cultivos aún no cosechados y el ganado, los animales encerrados, el patrimonio cultural irrecuperable y también las embarcaciones pesqueras y otras industrias marinas.

Entre los factores que afectan la vulnerabilidad se incluye la falta de un número suficiente de refugios adecuados que estén sobre el nivel de la inundación y rutas que permitan el acceso a ellos. La falta de información del público sobre las rutas de escape y otras actividades aumenta la vulnerabilidad de las comunidades.

⁷ REED, Sheila. *Introducción a las amenazas*. p. 87.

1.1.5. Efectos adversos típicos

A continuación, se describen los efectos adversos más comunes que causan las inundaciones.

1.1.5.1. Daños físicos

Las estructuras se dañan:

- Por la fuerza del impacto de las aguas de la inundación contra ellas.
- Cuando son arrastradas por la corriente
- Cuando se inundan
- Al derrumbarse a causa de la erosión
- Debido a daños provocados por los escombros que el agua acarrea

1.1.5.2. Muertes y Salud Pública

Las corrientes de agua ya sean turbulentas o en movimiento, pueden derribar y ahogar personas y animales, aun en aguas relativamente poco profundas. Las inundaciones grandes pueden ocasionar varias muertes por ahogamiento; generalmente ocasionan pocas lesiones severas no fatales que requieran atención hospitalaria. La inundación lenta ocasiona pocas muertes o heridas directas, pero a menudo aumenta la ocurrencia de mordedura de serpiente.

Las enfermedades endémicas continuarán en las áreas inundadas, pero hay poca evidencia de que las inundaciones causen directamente problemas de salud masivos aparte de diarrea, malaria y otros brotes virales después de que han transcurrido entre ocho y diez semanas desde que ocurrieron.⁸

1.1.5.3. Suministro de agua

Los pozos abiertos y otras fuentes de agua subterránea pueden contaminarse temporalmente por los desechos acarreados por la inundación o por el agua salada acarreada por el oleaje de tormenta. Solo estarán contaminados de organismos patogénicos si hay cadáveres de personas o animales en las fuentes o si se contaminan de aguas de alcantarilla. Las fuentes normales de suministro de agua pueden no estar disponibles por varios días.⁹

1.1.5.4. Cosechas y suministro de alimentos

La cosecha entera puede perderse junto con el forraje, lo cual puede desatar una escasez de alimentos de largo plazo. Las reservas alimenticias pueden perderse si las instalaciones en las que se almacenan se han inundado, lo cual provocaría inmediatamente una escasez de alimentos. Los granos se echarán a perder pronto si están saturados de agua, así sea por períodos cortos.

La mayoría de las pérdidas agrícolas son el resultado de la inundación de los cultivos. La sensibilidad ante la inundación depende del tipo de cultivo y de la duración de la inundación.

⁸ REED, Sheila. *Introducción a las amenazas*. p. 88.

⁹ *Ibíd*

Algunos cultivos mueren rápidamente con inundaciones relativamente menores; otros, pueden resistir estar sumergidos, pero se deterioran a la larga si una gran cantidad de agua se queda estancada.¹⁰

Un gran número de animales, incluyendo los que toleran sequías, pueden perderse si no se les lleva a terreno seguro. Esto puede reducir la disponibilidad de leche y otros productos de origen animal y de las labores realizadas con ellos, tales como la preparación de la tierra para el plantío. Estas pérdidas, unidas a la de implementos agrícolas y semillas, pueden impedir los esfuerzos futuros para plantar.

Las inundaciones traen resultados tanto buenos como malos en términos de sus efectos sobre la tierra. En algunos casos, la tierra puede quedar infértil durante varios años después de la inundación, debido a la erosión de las capas superiores de la tierra o porque se ha depositado la sal de una inundación costera. Una gran acumulación de sedimentos puede tener efectos adversos o bien aumentar significativamente la fertilidad del terreno. Los barcos y el equipo pesquero pueden perderse o dañarse en las áreas costeras en las que el pescado es la fuente de proteínas.

Un aspecto positivo es que las inundaciones se llevan los contaminantes de las vías acuáticas. Otra consecuencia positiva incluye la preservación de las tierras pantanosas, el reabastecimiento del agua subterránea, y la preservación de los ecosistemas fluviales al brindar áreas de reproducción, vivienda y alimentación a peces, pájaros y flora y fauna silvestre.¹¹

¹⁰ REED, Sheila. *Introducción a las amenazas*. p. 88.

¹¹ *Ibíd.* p. 89.

1.1.6. Posibles medidas de reducción del riesgo

La mayoría de las muertes y gran parte de la destrucción provocada por inundaciones pueden prevenirse mediante medidas de mitigación y de preparación. El primer paso comprende la identificación de los elementos vulnerables mediante la preparación de un mapa de peligro de inundación y la incorporación de dicha información al plan de preparación y desarrollo. La estrategia puede combinar la regulación del uso de la tierra en las zonas aluviales con medidas de control de la inundación.

Los planificadores deben incorporar las contribuciones de varias disciplinas para la evaluación de riesgo, la determinación de los niveles aceptables del mismo, y la viabilidad de las actividades propuestas. Puede obtenerse información y ayuda de una variedad de fuentes, desde las agencias internacionales hasta el nivel comunitario.¹²

1.1.6.1. Mapa de la tierra de aluvión

Las inundaciones suelen describirse en términos de frecuencia estadística empleando los parámetros de las tierras de aluvión de los 100 años, como referencia para los programas de mitigación de inundaciones. Las tierras que se han inundado en los últimos cien años delimitan áreas susceptibles de sufrir una inundación de cierta magnitud en un año dado con un 1 % de probabilidad. Dependiendo del nivel de riesgo aceptable que se haya seleccionado para la evaluación pueden escogerse otras frecuencias, tales como tierras de aluvión de 5, 20, 50 o 500 años.

¹² REED, Sheila. *Introducción a las amenazas*. p. 89.

El mapa básico se combina con otros mapas y datos para crear un cuadro más completo de la tierra de aluvión. Otras fuentes de información son el análisis de frecuencias, otros mapas relacionados, como los de uso de la tierra, y mapas de vegetación, de densidad poblacional, y de infraestructura. En la figura 1 se presenta un mapa de zonas susceptibles.

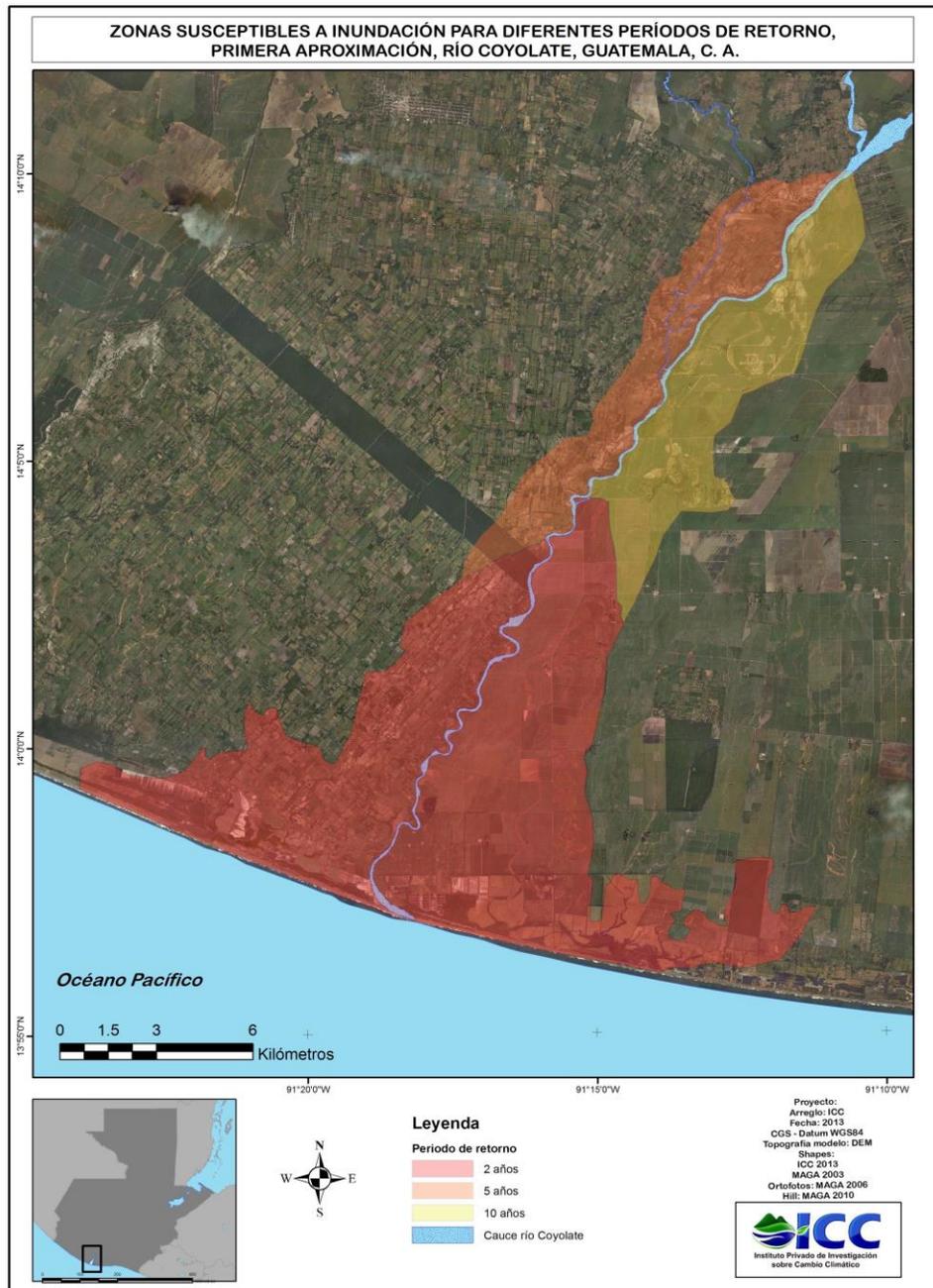
1.1.6.2. Mapa de riesgos múltiples

Las inundaciones a menudo son causa de otros riesgos, o bien ocurren junto con ellos o son consecuencia de ellos. Un mapa de riesgos múltiples sirve para resaltar las áreas expuestas a más de un riesgo. Es una excelente herramienta para diseñar un plan de mitigación y emergencia ante riesgos múltiples. Sin embargo, puede ser inapropiado para la planificación de actividades para un sitio y riesgo específico.

1.1.6.3. Control del uso de la tierra

El propósito de los reglamentos de uso de la tierra es reducir el peligro para la vida, la propiedad y el desarrollo, cuando se inundan las tierras de aluvión o las zonas costeras. Los reglamentos del uso de la tierra garantizan que los riesgos de inundación no se agraven por nuevos usos de la tierra mal planificados. Las regiones de crecimiento urbano son de particular interés.

Figura 1. **Zonas susceptibles a inundación para diferentes periodos de retorno**



Fuente: Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático. *Estudio Hidráulico del río Coyolate para la determinación de zonas susceptibles a inundación*. p. 34.

Los siguientes elementos deben ser tomados en cuenta:

- Reducción de densidades: en áreas susceptibles de inundarse el número de muertes está directamente relacionado con la densidad de la población de la zona en riesgo. Si el área aún está en las etapas de planificación, la regulación de la densidad puede incluirse en el plan. Para áreas ya establecidas, particularmente si se trata de asentamientos irregulares, la regulación de la densidad puede ser una cuestión delicada que tendría que considerar las consecuencias socioeconómicas de una reubicación, como sucede en Guatemala, que tiene zonas altamente vulnerables. Lamentablemente, existen aún muchas situaciones en las que los asentamientos espontáneos se ubican en las tierras de aluvión. Los planificadores deben contemplar medidas para mejorar estos sitios y reducir su vulnerabilidad.
- Prohibición de algunos usos específicos: no debe permitirse desarrollo alguno en áreas que como promedio se inundan cada 10 años, pero en la zona costera de Guatemala existen áreas que se inundan cada 2 o 3 años, por lo que es necesario prohibir el uso de estas áreas.¹³ Las áreas de alto riesgo pueden ser destinadas a funciones con menor potencial de riesgo como reservas naturales, instalaciones deportivas, y parques. Las funciones con alto potencial de daño, como los hospitales, solo deben permitirse en áreas seguras.

¹³ REED, Sheila. *Introducción a las amenazas*. p. 91.

- Reubicación de los elementos que obstruyan el cauce de alivio: además del riesgo obvio que corren de ser arrastrados, las edificaciones que bloquean el cauce de alivio pueden provocar daños al retener aguas que más tarde se desbordarán a áreas que previamente estaban libres de inundaciones.
- Regulación de los materiales de construcción: en algunas zonas deben evitarse las edificaciones de madera y de otros materiales ligeros. En algunos casos, las casas de barro solo deben permitirse si se han adoptado medidas de protección contra inundaciones.
- Provisión de una ruta de escape: cada vecindad debe contar con rutas de escape bien definidas y con áreas de refugio en terreno más elevado.

Otras estrategias preventivas incluyen:

- La adquisición de terrenos aluviales por agencias de desarrollo, posiblemente mediante un intercambio que provea de alternativas para sitios de construcción.
- El establecimiento de incentivos (préstamos o subsidios, condonación de impuestos) para alentar el desarrollo futuro en sitios más seguros con métodos de construcción más seguros.
- La diversificación de la producción agrícola como plantar cultivos resistentes ante inundaciones o el ajuste de la temporada de siembra, establecimiento de reservas de efectivo y alimentos.

- La reforestación, administración y control del pastoreo para aumentar la absorción del suelo.
- La construcción en zonas elevadas o los edificios que serán usados como refugio, si no es posible efectuar una evacuación.

1.1.6.4. Control de la inundación

A pesar de que el control del uso de la tierra será de poca utilidad en tierras de aluvión ya desarrolladas, deben llevarse a cabo cambios para reducir la vulnerabilidad de las comunidades ante los daños provocados por inundaciones.

Para los países en desarrollo con tierras de aluvión intensamente utilizadas, quizá sea necesario combinar una influencia política considerable con la cooperación comunitaria. Algunas acciones que pueden realizarse son:

- Mejorías a los canales existentes: cuando se ensancha y se hace más profundo el lecho del río, se aumenta la capacidad y se reduce la extensión de la tierra inundable.
- Construcción de desviaciones y canales de desagüe: construir nuevos canales puede resultar una alternativa menos costosa que reubicar una comunidad en algunas situaciones. Hay varias opciones para construir canales, como canales abiertos con revestimiento de pasto, concreto, o piedra. Debe tenerse mucho cuidado en el diseño y construcción de los canales de desviación debido a los posibles impactos ambientales y a las características de seguridad requeridas. Puede ser que los costos de estas obras que requieren tanta ingeniería sean prohibitivamente altos.

- Diques y represas: estas instalaciones pueden contener o almacenar el agua de inundación. Se requiere de un cuidadoso diseño de ingeniería para anticipar los niveles máximos de inundación. Si estos se rebasan, el daño puede ser mayor que si no hubiera represa. Las represas y otras formas de retención pueden darle al público una falsa sensación de seguridad si no están bien diseñadas y construidas.
- Resistencia a inundaciones: los propietarios pueden reducir el riesgo de daño reforzando sus edificios para resistir la fuerza del agua y conservar su integridad estructural al estar inundado. Las nuevas construcciones deben tener cimientos que resistan el embate del agua.
- Protección contra erosión: un elemento importante de la defensa contra inundaciones es la protección contra la erosión. Los lechos de arroyos deben estabilizarse mediante mampostería de piedra o con vegetación, sobre todo cerca de puentes.
- Mejoramiento del sitio: la elevación de los sitios puede ser una opción efectiva para residencias individuales o comunes.

1.1.7. Antecedentes en Guatemala

Guatemala es afectada en forma recurrente por una variedad de fenómenos que se traducen en amenazas, y esto es así por una combinación de factores.

Uno de ellos es su ubicación geográfica en el istmo centroamericano, ya que la región por su particular posición de puente entre dos grandes masas continentales, ubicada entre dos océanos, en una faja afectada por la zona de convergencia intertropical, sufre la incidencia de eventos de origen hidrometeorológico como huracanes, lluvias intensas, temporales y su consecuencia en inundaciones y deslizamientos.

Guatemala cuenta con tres vertientes: la más grande e importante en términos de inundaciones es la del Pacífico, la cual recoge la escorrentía de las cuencas que drenan la cadena volcánica y las tierras altas; la del Atlántico, que corresponde a los ríos que drenan hacia el norte y al mar Atlántico (México) y la más pequeña de todas, la del Caribe, que drena hacia dicha área.

El paso de la tormenta tropical Stan en Guatemala afectó áreas susceptibles a fenómenos de inundación por sus condiciones geológicas y usos de la tierra, presentando deslizamientos tanto en áreas boscosas como en suelos de cultivo.

Los daños se caracterizaron por la pérdida de suelos debido a derrumbes, y deslizamientos, cuyos sedimentos se desplazan hacia partes bajas donde originan otros problemas de inundación.

Daños en infraestructura eléctrica fueron los principales problemas en lugares como Santa María de Jesús, Aguacapa, Los Esclavos y en geotérmicas como Zunil I y Santa María. Así también los daños en la infraestructura vial fueron presentados mayormente en los departamentos de Escuintla, Sololá y San Marcos. En regiones como Retalhuleu y Escuintla los daños fueron mayores en los sistemas de agua y saneamiento, así como en los sistemas de drenaje; mientras que en los sistemas de abastecimiento de agua potable fueron más severos en Chimaltenango, San Marcos y Sololá.

Las prácticas incorrectas de construcción de infraestructura y vivienda cerca de los cauces de ríos, planicies de inundación y otros sitios vulnerables, así como obras de protección con diseños inadecuados contribuyeron a los efectos de destrucción. Las pérdidas estimadas de granos básicos oscilaron en un rango del 45 % al 65 % en el occidente, 30 % en el oriente y del 60 % al 90 % en la costa sur. Respecto del cambio del paisaje y la geomorfología, la zona más afectada por la tormenta Stan fue el altiplano guatemalteco. ¹⁴

1.1.8. Vulnerabilidad de Guatemala

En un análisis realizado sobre los puntos de inundación registrados por CONRED durante 1996 al 2000 y con la colaboración de Programa Mundial de Alimentos (PMA)¹⁵, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Existe una consistencia en la ocurrencia de eventos basados en la pendiente del área afectada; un 82,4 % de los eventos ocurrieron en áreas con pendientes menores al 8 %);
- La vertiente del Pacífico presenta la mayor ocurrencia de eventos (60 %), seguida por la vertiente del mar Caribe con un 36 % y el 4 % restante ocurrió en la vertiente del Golfo de México);
- La mayor cantidad de eventos ocurrieron en la segunda mitad del invierno, el 65,6 % entre los meses de agosto y noviembre;

¹⁴ MARN. *Guatemala: compilación y síntesis de los estudios de vulnerabilidad y adaptación al cambio climático*. Guatemala, 2007. p. 31.

¹⁵ MAGA, INSIVUMEH, PMA, *Estimación de amenazas inducidas por fenómenos hidrometeorológicos en la República de Guatemala*. p.29.

- Las cuencas más afectadas fueron las de los ríos María Linda, Motagua, Achiguate y Coyolate.

Un total de 7 cuencas hidrográficas, 5 ubicadas en la vertiente del Pacífico y 2 en la del Caribe, poseen una probabilidad arriba del 49 % de ocurrencia de eventos de inundación; representando un 18 % del total de cuencas del país. De las 7 cuencas mencionadas, 4 presentan más del 85 % de probabilidad de inundación, siendo estas las de los ríos: Motagua, Coyolate, María Linda y Achiguate.

Las zonas inundadas e inundables del país suman un total de 4 470,41 km² de superficie, equivalentes al 4,1 % del total del país. Un total de 31 municipios, se categorizan con una muy alta amenaza de inundación, ocupando una superficie de 2 326,1 km² que es equivalente al 2,13 % de la superficie total del país.

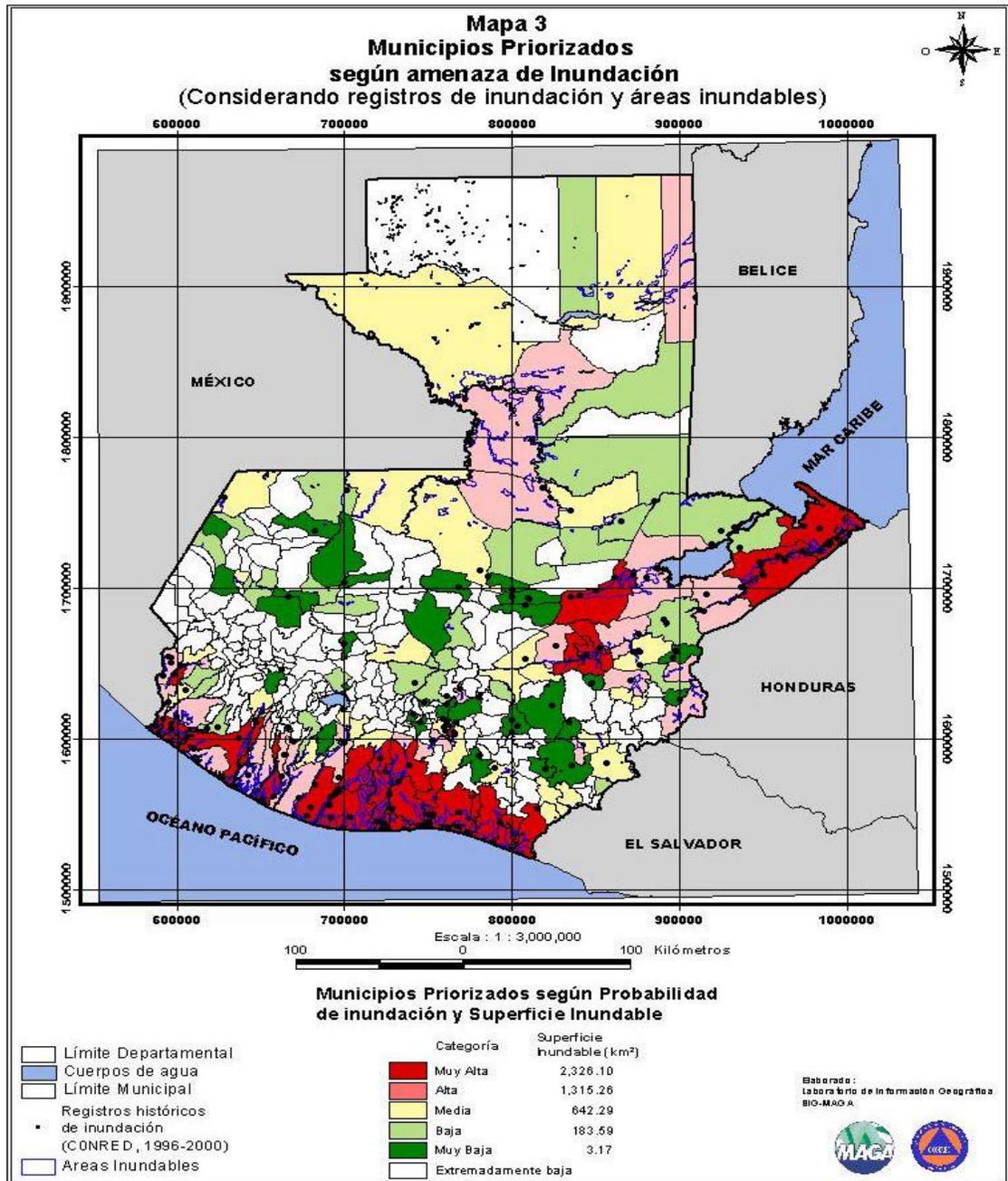
En el documento citado se generó como paso intermedio un mapa de zonas inundables, el cual se muestra en la figura 1; con este mapa intermedio es posible conocer las poblaciones que se encuentran vulnerables a las inundaciones.

Tabla I. **Población vulnerable a las inundaciones (por departamento)**

Departamento	Poblados en el buffer de inundacion	No. Habitantes vulnerables
Escuintla	462	54 684
Zacapa	99	21 585
Santa Rosa	218	15 259
Izabal	124	14 720
San Marcos	65	14 581
Alta Verapaz	95	13 736
Suchitepéquez	120	12 587
Chiquimula	47	10 948
El Progreso	45	8 144
Jutiapa	78	725
Sololá	12	6 859
Retalhuleu	78	6 729
Guatemala	34	6 015
Quiché	31	5 498
Petén	152	4 793
Huehuetenando	40	3 654
Quetzaltenango	13	2 720
Baja Verapaz	5	463
Sacatepéquez	6	221
TOTAL	1 733	210 821

Fuente: Perfil Ambiental de Guatemala. *Amenazas al ambiente y vulnerabilidad social en Guatemala*. p. 14.

Figura 2. Amenaza de inundaciones en Guatemala



Fuente: MAGA, INSIVUMEH, PMA. *Estimación de amenazas inducidas por fenómenos hidrometeorológicos en la República de Guatemala.* p.32.

Los centros poblados que se encuentran vulnerables a las inundaciones suman en total 1 733 poblados con aproximadamente 210 000 personas. En la tabla I se condensan los resultados por departamento.

Por el método utilizado, los datos de población son aproximados, pero muestran una tendencia muy clara respecto de la mayor vulnerabilidad de las poblaciones: las poblaciones de los centros poblados ubicados en la cercanía de los ríos de las cuencas de la vertiente del Pacífico (María Linda, Achiguate y Coyolate, principalmente) y las poblaciones de la cuenca del medio y bajo Motagua (desde Zacapa a Izabal) y poblados de la cuenca del Polochic.

1.2. Obras de mitigación de tipo estructural

Las poblaciones situadas en los márgenes de los ríos son amenazadas por distintos fenómenos naturales, principalmente durante el invierno, tales como inundaciones, deslaves, derrumbes, socavamientos, entre otros; debido a esto es necesario buscar diferentes soluciones, tomando en cuenta el factor económico y ambiental, así como el método constructivo que mejor se aplique a las condiciones del lugar.

Una de las formas más eficiente de controlar el cauce de un río es la construcción de muros o diques revestidos longitudinales a lo largo de la corriente, siguiendo los patrones de curvatura típicos de dicha corriente.

Estos muros o diques pueden construirse dentro del cauce, disminuyendo la sección para facilitar la navegación o separar las corrientes de la orilla o como medidas de protección para mitigar el impacto de crecidas sobre áreas vulnerables.

1.2.1. Definición de dique longitudinal

Los diques longitudinales, comúnmente denominados bordas, son estructuras de confinamiento. Su altura estará sujeta a los niveles de inundación que se establezcan con los caudales de diseño, y son construidos paralelos al río; esto con la finalidad de que cuando el flujo del cauce principal desborde, sea contenido por este tipo de obra; por lo tanto, estos diques deben ser ubicados fuera del cauce principal, inclusive fuera de la llanura de inundación.

También pueden ser utilizados para encajonar la corriente de los ríos a fin de darle un flujo más rápido. Desde el punto de vista hidráulico las estructuras longitudinales ayudan a aumentar la velocidad y disminuir la resistencia, al movimiento y la erosión.

1.2.2. Tipos de diques construidos en la costa sur de Guatemala

En Guatemala, la protección de riberas especialmente en las secciones de las cuencas medias y bajas de ríos se ha realizado mediante la construcción de apilamiento de arena y materiales de grava recogidos del cauce mismo. En muchos lugares no existe diseño, y se usa la experiencia del maquinista, en forma totalmente empírica, produciendo altos costos de mantenimiento.

Otro importante problema es la falta de una regulación adecuada para la intervención de cauces, y en algunos casos, ni se realizan los estudios mínimos. Antes del 2006, la construcción de protecciones de riberas fue empírica y de forma casuística, y se enfocaba a la construcción de bordas y dragados.

La Dirección General de Caminos, en la década de 1980, era la principal ejecutora de bordas, en especial para controlar inundaciones de algunos ríos, por ejemplo, Salamá y Coyolate.

Los principales problemas que se encuentran son:

- Mal manejo de la cuenca.
- Deforestación.
- Varias municipalidades tienen injerencia en una cuenca.
- Falta de coordinación institucional.
- No hay planes de ordenamiento territorial funcionales.
- Desconocimiento sobre buenas prácticas agrícolas.
- Construcción desordenada.
- Pobreza extrema que obliga a fundar caseríos en las cercanías de las riberas de ríos, o en el cauce mismo.
- Desarrolladores de vivienda que no respetan los cauces.
- Crecimiento sin regulación de las zonas urbanas marginales.
- Construcción empírica de protección de riberas.

Por medio del programa de gestión de riesgo del Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC), durante el 2012 se efectuó un diagnóstico sobre las principales técnicas utilizadas. Luego de realizar una serie de entrevistas con las entidades ejecutoras en la región, se logró identificar cuáles eran los diferentes tipos de técnicas usadas para la construcción de diques longitudinales, como obras enfocadas para mitigar el impacto de las inundaciones en comunidades, zonas de cultivo e infraestructura. En otros casos, estas mismas técnicas son utilizadas para evitar la pérdida de terreno a causa de la fuerte erosión. A continuación, se hace una breve descripción de cada una de las técnicas identificadas.

1.2.2.1. Diques de arena

Este tipo de obra es la base para la conformación de cualquier tipo de dique longitudinal. La diferencia de una a otra es el tipo de recubrimiento que se realice y la mezcla por capas de suelo fértil y arena que se aplica en algunos casos. Sin embargo, existen muchos diques conformados únicamente con arena que se encuentra en el lecho del río. Esta técnica es una de las más comunes y consiste en aglomerar un banco de arena para evitar el desbordamiento del río en dicho punto.

Figura 3. **Borda de arena realizada en el municipio de Masagua sobre el río Guacalate**



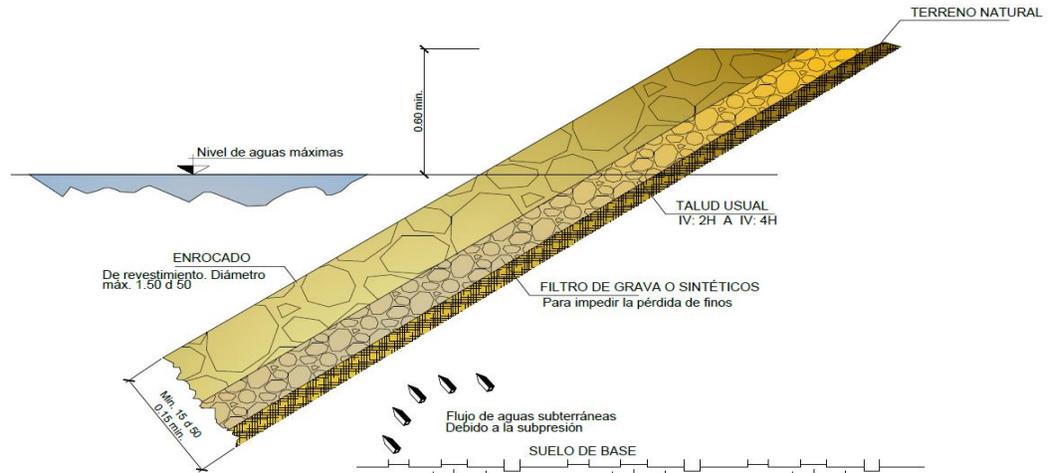
Fuente: Río Guacalate, Masagua, Escuintla. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.

1.2.2.2. Enrocado

Los enrocados son protecciones en piedra o fragmentos de roca que se colocan en los canales en tierra y cauces naturales. Estos se utilizan en canales que deben protegerse de la erosión; así también deben cuidarse las estructuras hidráulicas de la acción erosiva de las aguas. Se usan, además, para conservar la forma de la sección transversal del canal, en especial la de los taludes. Este método también es utilizado en combinación con geotextiles y otras técnicas. Para la utilización de esta técnica se deben considerar los aspectos siguientes:

- Existencia o no de roca en las vecindades.
- Tipo de suelo del canal o cauce natural.
- Características hidráulicas del canal (velocidad del flujo, profundidad del agua y tipo de flujo).
- Ángulo de inclinación del talud.
- Diámetro de la roca con base en la inclinación del talud y la fuerza de la corriente.
- Comparación económica entre el enrocado y otros tipos de protecciones.
- Peligros que se pueden presentar al no colocar enrocado en los puntos en que se requiere, tales como pérdidas de cosechas, destrucción de estructuras, pérdida de vidas humanas, entre otros.

Figura 4. Corte transversal de enrocado



Fuente: elaboración propia, utilizando el programa Sketchup.

Figura 5. Enrocado realizado en Santa Odilia sobre el río Coyolate



Fuente: Río Coyolate. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.

1.2.2.3. Espigones

Los espigones son estructuras alargadas que se colocan con el objetivo de desviar la corriente de agua o bien controlar materiales del fondo que puedan ser arrastrados. La estructura del espigón está construida a un ángulo con la dirección del flujo, anclada en la orilla del canal y con una cabeza para el manejo del flujo en la punta. Al construir espigones se disminuye la sección del río, lo que causa que se incremente la velocidad del agua, y provoque un aumento en la gradiente, formando gran turbulencia.

Los espigones pueden construirse con bloques de roca o de concreto, gaviones, hexápodos, tetrápodos, pilotes de acero, madera, bambú o combinaciones de varios materiales. Los espigones de enrocado tienen generalmente una sección trapezoidal. Los materiales de gran tamaño se acumulan unos sobre otros, formando una estructura alargada. En Guatemala, los espigones se construyen comúnmente con rocas, sacos de arena o jumbos; hay espigones verdes y de gavión.

El objetivo principal al utilizar espigón es desviar la corriente del río alejándola de zonas críticas para prevenir la erosión de la orilla y establecer un canal más estable. Se utilizan también en ríos anchos trenzados para establecer un canal bien definido que no sufra agradación ni degradación y que mantenga su localización de año en año. Los espigones se utilizan también en ríos meándricos, para controlar el flujo en la entrada o salida de la curva.

Los espigones se colocan generalmente a intervalos de dos a cuatro veces la longitud de las secciones individuales. Se recomienda un mínimo de tres espigones para resultados efectivos.

No se recomienda utilizarlos en ríos con pendientes superiores al 2 %, debido a que las corrientes son tan fuertes que es prácticamente imposible garantizar su estabilidad. En ríos de montaña se recomienda construir obras longitudinales, pero no espigones.

Figura 6. **Bordas ejecutadas en finca Las Lagunas sobre el río Samalá**



Fuente: bordas en finca Las Lagunas. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.

1.2.2.4. Gaviones

Los gaviones son obras que se pueden realizar en cualquier ambiente, condición climática y aun en zonas de difícil acceso; representan confiabilidad y economía. Se puede describir un gavión como una estructura confinada por malla hexagonal rellena de roca y emplazada en un conjunto con un fin definido.

El gavión en el río acelera el estado de equilibrio del cauce; evita erosiones, transporte de materiales y derrumbamientos de márgenes; además, el gavión controla las crecientes, protegiendo valles y poblaciones contra las inundaciones.

El gavión está hecho con malla metálica, la cual posee elevada resistencia mecánica; la doble torsión impide que esta se desarme ante el cortado de un alambre, asegurando que en cada cruce se tenga un punto fijo que mantenga la flexibilidad de la malla y evite las deformaciones posibles. La permanencia en el tiempo se asegura a través de la fuerte galvanización de los alambres, y en el caso de condiciones particularmente agresivas para el zinc, se dispone de alambres fuertemente galvanizados revestidos de PVC.

En cuanto a las piedras para el relleno se debe tomar en cuenta un elevado peso específico, no ser friables, poseer un tamaño mínimo superior a la mayor medida de la malla y uno máximo que se encuentre en el orden del doble del mínimo. Las características más destacadas de las obras en gaviones son en resumen las siguientes:

- Elevada resistencia debido al gran peso de la obra, la fricción entre las piedras, su resistencia a la compresión y la elevada tensión de tracción, que es soportada por la malla (con baja deformación).
- Permeabilidad adecuada, que permite el drenaje de las aguas de infiltración, eliminando el empuje hidrostático.
- La puesta en obra es extremadamente sencilla y económica, y no requiere equipos ni mano de obra especiales. Puede utilizarse para el relleno canto rodado o piedra partida.

- El llenado puede ser realizado manualmente o con el auxilio de equipo normal de obra.
- Se integra armónicamente con el paisaje; permite el desarrollo de vegetación, sin que esto traiga inconvenientes, y se asegura por el avance de la naturaleza la estructura construida.
- Debido a que es una construcción monolítica, puede colapsar debido al peso y un mal trabajo desde su base.

Figura 7. **Borda en el cantón El Amatillo sobre el río Coyolate**



Fuente: cantón El Amatillo. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.

1.2.2.5. Colchoneta gavión

Las colchonetas son utilizadas para proteger los bancos de los ríos; constituyen canales para el control de la erosión. Son rellenos con rocas en el lugar del proyecto para formar estructuras flexibles, permeables y monolíticas, para promover el crecimiento rápido de la vegetación natural.

La base de la sección de las colchonetas está dividida en compartimentos, y rellena con piedras en el lugar del proyecto. Es una colchoneta formada de la versión del gavión utilizada principalmente para el control de la erosión cuando las propiedades de contención de las cajas gaviones no son requeridas.

Ventajas que posee su utilización:

- Su fortaleza recae en la malla hexagonal con doble torsión de alambre de acero galvanizado, la cual se refuerza en los lados con un alambre más fuerte.
- La sección de la base está dividida en compartimentos para restringir el movimiento de las piedras y fortalecer la estructura.
- El alambre no se destrenza aun cuando se corte.
- El ensamblado es fácil, requiriendo personal no especializado y utilizando las rocas del lugar.

Desventajas:

- Es poco flexible.
- Si se tiene una mala instalada puede provocar corrimiento y erosión por la precipitación, haciendo que socave desde la parte de atrás.

Figura 8. **Bordas ejecutadas en aldea Canoguitas, sobre el río Coyolate**



Fuente: bordas sobre el río Coyolate. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.

1.2.2.6. Diques de arena y refuerzo de jumbos

Los jumbos proporcionan un método simple y directo que pueden usar las personas para proteger a sus comunidades. Los sacos de arena apilados forman una barrera para detener o redirigir el agua en movimiento.

Se pueden utilizar para reforzar los diques existentes o construir nuevos. Esta técnica se aplica en toda la base del dique; es muy utilizada en meandros; en algunas prácticas se mezcla un saco de cemento por la cantidad de arena que contenga el jumbo.

En muchas ocasiones el refuerzo con jumbos es utilizado como una medida de emergencia, realizándose al momento que el dique principal empieza a colapsar, con alta probabilidad de que se desborde el río.

La aplicación de esta técnica consiste en el apilamiento de jumbos desde el fondo del lecho del río, colocándolos de manera longitudinal y paralela en dirección hacia donde fluye el agua, con las partes superiores plegadas de frente a la corriente hasta llegar a la base del dique; se deben apilar a manera de compensar la ubicación de las juntas para crear una estructura más fuerte al igual como se apilan los ladrillos. De esta manera se refuerza de forma escalonada todo el talud frontal del dique.

Figura 9. **Bordas ejecutadas en Cerro Colorado, sobre el río Coyolate**



Fuente: Cerro Colorado. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático

2. BIOINGENIERÍA

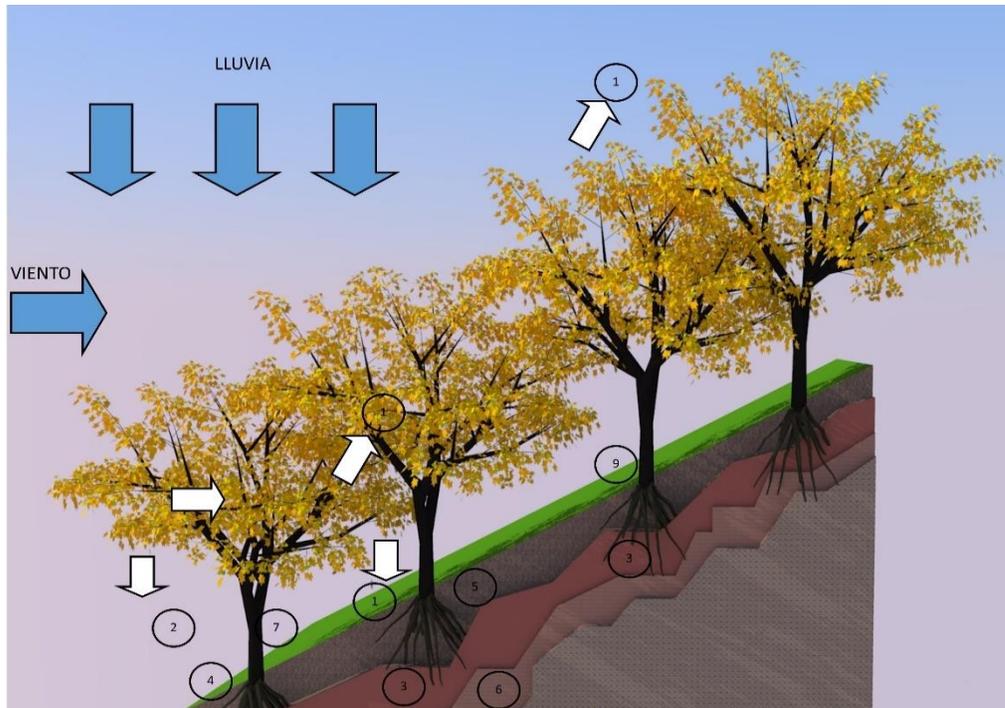
2.1. Vegetación

Para la estabilidad de un talud el tipo de vegetación es un parámetro determinante. La vegetación cumple dos funciones principales: la primera es la tendencia a determinar el contenido de agua en la superficie del talud y la segunda es que brinda consistencia por la acción del entramado mecánico de sus raíces. La vegetación tiene un efecto directo como controlador de infiltraciones sobre el régimen de aguas subterráneas y luego al tomar el agua requerida para su subsistencia actúa como secador del suelo.

A continuación, se presentan los factores que la vegetación tiene sobre la estabilidad de un talud identificados con su correspondiente numeración en la figura 10.

- Intercepta la lluvia (1)
- Aumenta la capacidad de infiltración (2)
- Extrae la humedad del suelo (3)
- Grietas por desecación (4)
- Raíces refuerzan el suelo, aumentando resistencia al cortante (5)
- Anclan el suelo superficial a mantos más profundos (6)
- Aumentan el peso sobre el talud (7)
- Transmiten al suelo fuerza del viento (8)
- Retienen las partículas del suelo disminuyendo susceptibilidad a la erosión (9)

Figura 10. **Efectos de la vegetación sobre la estabilidad de una ladera**



Fuente: elaboración propia, empleando el programa de Sketchup.

La deforestación es un factor que afecta a la estabilidad de un talud, ya que disminuye las tensiones capilares de la humedad superficial, elimina el factor de refuerzo de las raíces y facilita la infiltración masiva de agua. Al igual, la quema de la vegetación ocasiona inestabilidad en los taludes, ya que se elimina el refuerzo de las raíces y expone el suelo a la erosión acelerada.

2.2. Características de las plantas y del suelo fértil

Las diferentes partes de una planta cumplen funciones específicas desde el punto de manejo geotécnico.

Tabla II. **Componente de la planta y sus funciones**

Parte de la planta	Función
Raíz	Anclaje, absorción, conducción y acumulación de líquidos.
Tallo	Soporte, conducción y producción de nuevos tejidos.
Hojas	Fotosíntesis, transpiración.

Fuente: SUÁREZ DÍAZ, Jaime. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. p.279.

Las raíces cumplen una función muy importante de absorción, ya que grandes cantidades de agua son absorbidas por las plantas, junto con minerales y productos que requieren para su alimentación.

Los principales factores que determinan el desarrollo de las raíces son:

- Disponibilidad de nutrientes en el suelo
- Disponibilidad de oxígeno
- Contenido de humedad
- Succión o presión osmótica
- Temperatura del suelo
- Niveles de toxinas y elementos patogénicos
- Sistema de poros

2.3. Efectos hidrológicos de la vegetación

La vegetación afecta las condiciones hidrológicas de un talud de varias formas; estas se describen a continuación.

2.3.1. Intercepción de la lluvia

La lluvia se divide en dos partes: la que cae directamente en el suelo y la que es interceptada por el follaje de la vegetación. Dependiendo de la intensidad de la lluvia, del cubrimiento y del tipo de vegetación en un bosque tropical, puede interceptarse hasta un 60 % del total de la lluvia anual. Parte de la lluvia interceptada es retenida y evaporada, y otra parte alcanza finalmente la tierra, por goteo o por flujo sobre las hojas y troncos. Es importante determinar el tiempo entre la lluvia y el goteo para analizar el efecto hidrológico de cada tipo de vegetación.

$$\text{Lluvia interceptada} = \text{Lluvia} \times \% \text{ \textit{área follaje}}$$

2.3.2. Retención de agua

Este fenómeno disminuye la razón de agua de escorrentía disminuyendo así su poder erosivo, pero puede aumentar la razón de infiltración. La retención de agua en el follaje modifica el ciclo hidrológico en el momento de una lluvia: entre mayor volumen o densidad de follaje haya, el ciclo hidrológico demora más en razón de que retiene por mayor tiempo las gotas de lluvia. Esto también es afectado si la lluvia es muy intensa, ya que la retención será mínima; en cambio en el caso de lluvias moderadas a ligeras, la retención de agua puede ser de un 30 %, dependiendo de las características de la vegetación.

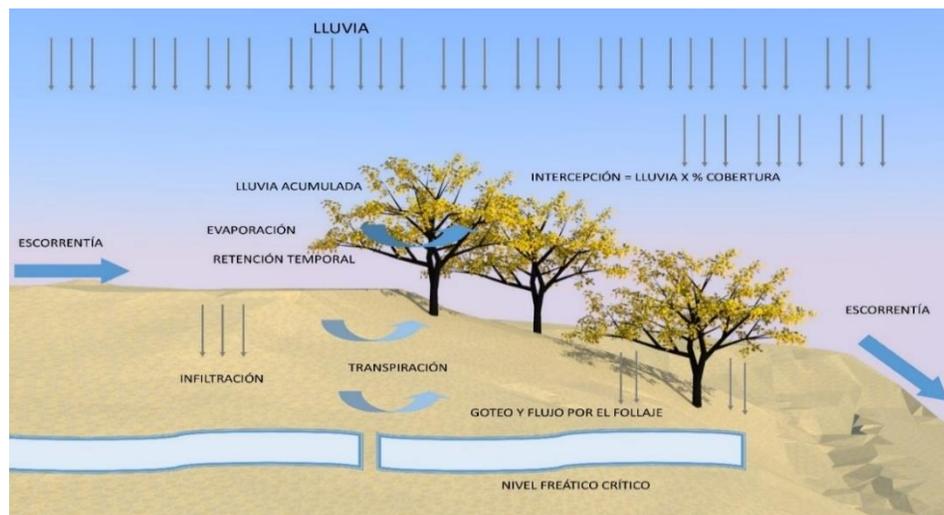
2.3.3. Acumulación de agua

Parte del agua retenida es acumulada en el follaje para luego ser evaporada. Teniendo en cuenta la densidad de área total y el volumen del follaje, es posible determinar el volumen total de agua acumulada en el follaje en algunas especies.

2.3.4. Goteo o flujo por el follaje

El agua que no es acumulada por el follaje retoma a la tierra por goteo o flujo. La rapidez del flujo dependerá de la aspereza de las superficies de las hojas y troncos, así como de los diámetros y ángulos de las hojas con la vertical.

Figura 11. **Esquema del efecto de la vegetación sobre el modelo hidrológico subsuperficial**



Fuente: elaboración propia, empleando el programa Sketchup.

2.3.5. Evapotranspiración

Este es un efecto que combina la evaporación y la transpiración. Consiste en una disminución de humedad en el suelo, y depende de cada tipo de vegetación en un determinado tipo de suelo, el potencial de evapotranspiración que posee.

Generalmente se obtiene un equilibrio de humedad, dependiendo en la disponibilidad de agua de lluvia y el nivel freático. La evapotranspiración puede medirse utilizando la relación entre la evapotranspiración de la superficie cubierta por plantas y la de un cuerpo de agua expuesto (E_t/E_o). A medida que disminuye la humedad del suelo, la evapotranspiración también disminuye.

La evapotranspiración profundiza los niveles de aguas freáticas y al mismo tiempo puede producir asentamientos de suelos arcillosos blandos y agrietamientos por desecación. El área de influencia depende de la extensión y profundidad del sistema radicular. Los árboles espaciados cercanamente y las hierbas extraen más agua que los pastos.

La clave desde el punto de vista de ingeniería es determinar la humedad máxima y el nivel freático crítico para un talud determinado, teniendo en cuenta el efecto de la vegetación. Debe tenerse en cuenta que al saturarse un suelo se disminuyen las fuerzas de succión o presiones negativas de agua de poros, las cuales ayudan a la estabilidad.

En ocasiones, la vegetación produce un efecto de mantener la humedad por debajo del límite de saturación, mejorando la estabilidad de las laderas. El efecto más importante de la vegetación es la protección contra la erosión.

La vegetación que posee mayores densidades de follaje amortiguará más eficientemente la intensidad de la lluvia y disminuirá la erosión. En hierbas y pastos la densidad y volumen del follaje actúan como un colchón protector contra los efectos erosivos del agua de escorrentía.

2.3.6. Sobrecarga y fuerzas del viento

La sobrecarga debida al peso propio de la vegetación, generalmente, no representa una carga importante; pero las fuerzas del viento son significativas.

2.3.7. Otros efectos negativos

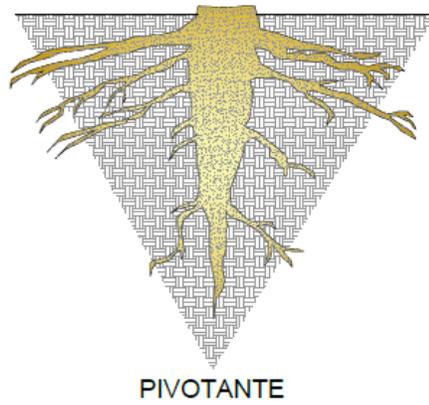
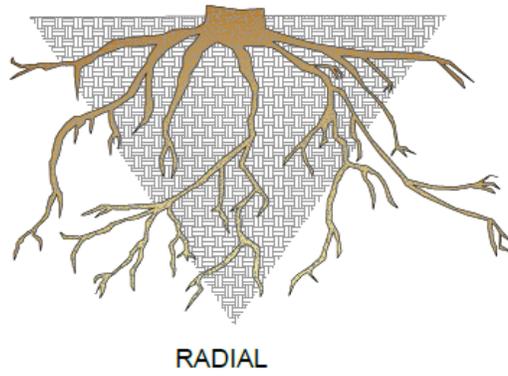
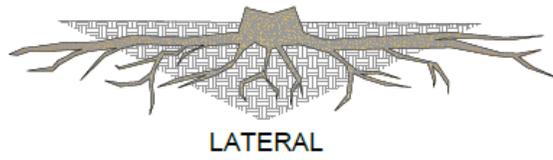
En ocasiones la vegetación puede traer efectos negativos como la apertura de grietas en los macizos rocosos. Debe tenerse en cuenta que cuando las lluvias son muy intensas y de larga duración, el efecto de la vegetación sobre el ciclo hidrológico es mínimo.

2.4. Características de las raíces

Las características de las raíces dependen de la especie vegetal, la edad, las propiedades del perfil de suelo y el medio ambiente. La profundidad de las raíces, generalmente, no supera los cinco metros en árboles grandes, dos metros en los arbustos, treinta centímetros en los pastos y cinco metros como en el caso del pasto vetiver.

La extensión lateral del sistema radicular generalmente es mayor que su profundidad y en algunos casos supera los 50 metros de longitud.

Figura 12. Tipos de raíz



Fuente: elaboración propia, empleando el programa AutoCAD.

La forma de las raíces puede presentar tres esquemas diferentes así:

- De extensión lateral
- De extensión radial
- Raíz pivotante

“Las raíces de diámetro menor a 20 milímetros son las más importantes para la estabilidad de un talud que las raíces de mayor diámetro.”¹⁶

Otro factor que contribuye a la resistencia del sistema suelo - raíces es la densidad de raíces por volumen de suelo. La longitud de las raíces y su profundidad deben evaluarse para determinar su efecto sobre la estabilidad de un talud. Se ha encontrado que la longitud de las raíces es mayor cuando el árbol se encuentra en un suelo granular bien drenado, que cuando se encuentra en un suelo arcilloso. Aparentemente, este efecto se debe a la necesidad que el árbol tiene de buscar agua, en el caso de que el drenaje sea bueno.

Se puede tomar como regla general debido a la poca información sobre las características de las diversas especies, que la raíz se extiende lateralmente 1,5 veces el radio de la corona del follaje; aunque debe tenerse en cuenta que, en algunos casos, las raíces pueden extenderse hasta 22 veces el radio de la corona.

Otro factor muy importante es el número de raíces por unidad de área y su diámetro, el cual puede evaluarse como una relación de área-raíz-suelo en un plano determinado de falla.

¹⁶ LEVENTHAL, Andrew R. MOSTYN, Garry R. *Slope stabilization techniques and their application*. p. 230.

Un sistema de recolección de información consiste en tomar muestras de suelo con raíces y por un sistema de tamizado separar las raíces de suelo y con la comparación de los volúmenes determinar la relación raíz-suelo.

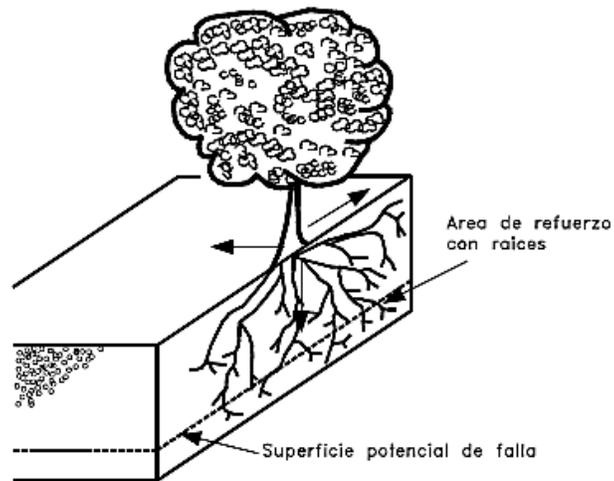
2.4.1. Acción de refuerzo de las raíces

Las raíces refuerzan la estructura del suelo y pueden actuar como anclajes en las discontinuidades. El efecto de las raíces sobre la resistencia del suelo puede describirse en tres formas:

- Unir materiales de los suelos inestables a mantos más estables. Este efecto es más pronunciado donde la superficie crítica de falla se encuentra en la zona de raíces.
- Formar una red densa entrelazada en los primeros 30 a 50 centímetros de suelo; esta forma una membrana lateral que tiende a reforzar la masa de suelo más superficial y sostenerla en el sitio.
- Las raíces individuales actúan como anclajes que estabilizan los arcos de suelo que se extienden a través del talud. Las raíces actúan como pilas de refuerzo.

Figura 13.

Refuerzo de superficie de falla por las raíces de los árboles

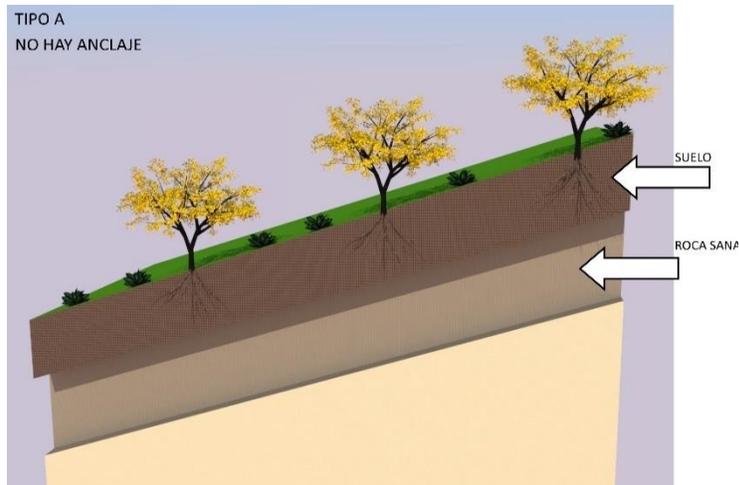


Fuente: SUÁREZ DÍAZ, Jaime. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. p.288.

Dependiendo del refuerzo de los taludes con las raíces de las plantas, se pueden clasificar de esta manera:

- Tipo A: taludes que poseen una capa muy delgada de suelo sobre roca masiva y sin defectos, que permitan puntos de anclaje para las raíces y una superficie de falla potencial entre el suelo y la roca.

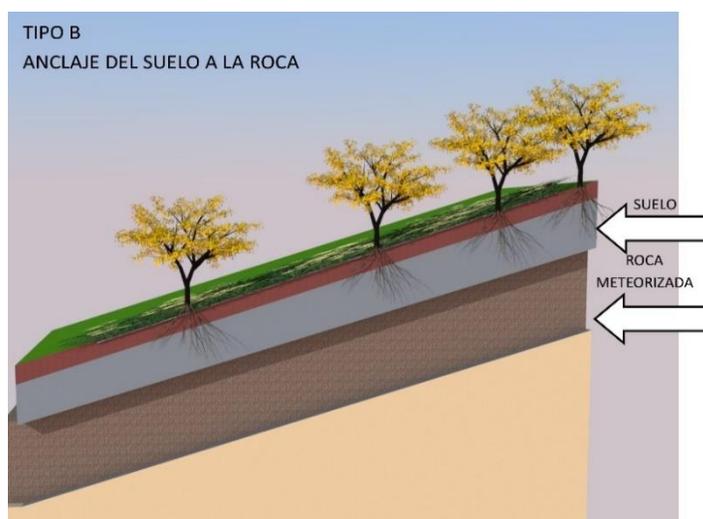
Figura 14. Talud tipo A



Fuente: elaboración propia, empleando Sketchup.

- Tipo B: una capa delgada de suelo sobre una roca con fracturas o defectos que permiten la entrada y anclaje de las raíces.

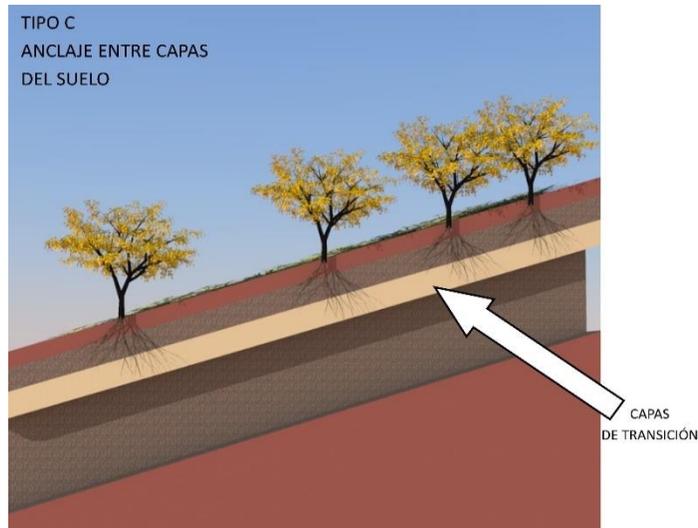
Figura 15. Talud tipo B



Fuente: elaboración propia, empleando Sketchup.

- Tipo C: varias capas de suelo y las raíces penetran normalmente las interfaces, reforzando los contactos entre las diversas capas.

Figura 16. Talud tipo C



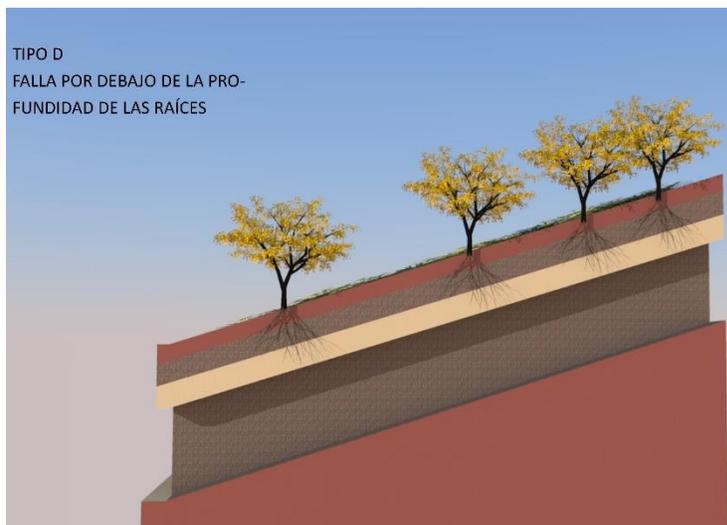
Fuente: elaboración propia, empleando Sketchup.

- Tipo D: taludes con una capa gruesa de suelo y raíces a profundidades superiores a las de superficies potenciales de falla.

La profundidad de las raíces es un factor muy importante. La profundidad de refuerzo de las raíces de los pastos es de 20 a 30 centímetros comúnmente, pero algunas especies tienen profundidades que permiten el anclaje a mantos de roca relativamente profundos.

Un factor importante de la estructura radicular es su efecto de unir los grupos de partículas, impidiendo la ocurrencia de pequeños deslizamientos. Para reducir el riesgo de movimientos, el espaciamiento de los árboles debe ser lo más cercano posible.

Figura 17. **Talud tipo D**



Fuente: elaboración propia, empleando Sketchup.

Un árbol junto a otro puede generar un efecto de arco; sin embargo, no se requiere necesariamente que las raíces se entrelacen y el efecto de arco puede lograrse con separaciones de hasta 3 metros, dependiendo de las características del material del talud.¹⁷ Una separación de 10 metros entre árboles de grandes raíces produce soporte sustancial en la mayoría de los casos.

2.4.2. Efecto de anclaje

Un efecto positivo muy importante es el anclaje de masas de suelo por las raíces. Las características físicas de las raíces determinan el efecto de anclaje o refuerzo del suelo y la densidad del sistema radicular mejora la retención de las partículas o masas de suelo, aumentando la resistencia a la erosión.

¹⁷ GRAY, Donald.H. *Role of woody vegetation in reinforcing soils and stabilizing slopes. Proceedings, Symposium on soil reinforcing and stabilising techniques in engineering practice.* p. 306.

El fenómeno del efecto de refuerzo de las raíces debe estudiarse en una forma global, analizando la superficie de falla al cortante de un talud, pudiéndose observar dos elementos principales:

- La movilización de la resistencia a la tensión de las raíces por efecto de anclaje de las raíces a materiales más resistentes. Este efecto es muy importante en perfiles de poco espesor de suelos residuales, en los cuales las raíces se anclan en la roca o en los materiales menos meteorizados.
- La profundización de la superficie crítica de falla está a profundidades por debajo del volumen de presencia densa de raíces. Este efecto es importante en perfiles de suelo de gran espesor.

2.5. Bioingeniería

“La estabilización de taludes por el uso combinado de vegetación y elementos estructurales adicionales, trabajando de una manera conjunta e integrada, se le conoce como estabilización biotecnológica de taludes. Este concepto de estabilización comprende parámetros ambientales muy importantes y su efectividad ha sido extraordinaria”.¹⁸

Los pastos y plantas diseñadas con el propósito de producir refuerzo del suelo se pueden plantar junto con muros de contención o sistemas estructurales de estructura abierta, en forma de grilla, con espacios para el crecimiento de la vegetación.

¹⁸ GRAY, Donald H. LEISER, Andrew T. *Biotechnical slope protection and erosion control*. p. 267.

Tabla III. **Sistemas de protección utilizando biotecnología**

Categoría	Descripción
Vegetación convencional	Siembra por semillas, estolones o macetas.
Plantas maderables utilizadas como refuerzo	Estacas vivas y colchones de maleza.
Estructuras con vegetación	Gaviones, estructuras de llantas usadas, muros criba, geomallas, revestimientos sintéticos.

Fuente: SUAREZ DÍAZ, Jaime. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. p.294.

2.5.1. Limitaciones de la protección vegetal

El establecimiento exitoso de vegetación en un talud está determinado por muchos factores tales como: época de siembra, pendiente del talud, localización y composición de los materiales del talud.

Las épocas ideales de plantación son las semanas anteriores a la temporada de lluvias; sin embargo, se puede realizar el plante en épocas secas, disponiendo de un programa adecuado de riego.

La pendiente de los taludes tiene un efecto importante en el esfuerzo requerido para establecer la cobertura vegetal. Para taludes de pendiente alta se requiere colocar elementos de anclaje para los pastos y bermas para los árboles. En taludes de pendiente fuerte se aconseja no sembrar árboles sino arbustos, para disminuir las fuerzas del viento sobre ellos. Si los materiales son muy duros se puede requerir la excavación de cajas profundas para la siembra de cada arbusto y utilizarse cantidades importantes de suelo orgánico o fertilizantes.

Con referencia a la localización de taludes, los que reciben la exposición directa del sol de la tarde presentan mayores dificultades para la vegetación que los que reciben el sol de la mañana o poseen condiciones de sombra relativa. Deben analizarse, además, los factores relacionados con la presencia del hombre: pisoteo, quemas, basuras, humo de los vehículos, entre otros.

2.5.2. Selección de especies vegetales

Como no existen especies universales se debe acudir a los expertos forestales para escoger la especie de pasto, hierba, arbusto o árbol que se debe utilizar para cada caso específico, teniendo muy en cuenta la experiencia local y las diferencias de tolerancias y hábitos de las diferentes especies.

El tipo de vegetación que cubre la superficie del talud tiene efecto sobre la estabilidad. Debe seleccionarse la especie vegetal que sea compatible con las condiciones del suelo y el sitio, incluyendo disponibilidad de agua, nutrientes, pH, clima, regulaciones gubernamentales, entre otras.

Ciertos tipos de planta son intrínsecamente mejores que otros para objetivos de estabilización específicos. La vegetación maderable posee raíces más profundas y resistentes que las plantas herbáceas y pastos, y provee un mejor refuerzo y efecto de arco.

Tabla IV. **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; 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 y bajo mantenimiento.	Algunas veces son difíciles de establecer.
Árboles	Raíces profundas, no requieren mantenimiento.	Su establecimiento es demorado y generalmente son más costosos

Fuente: SUÀREZ DÍAZ, Jaime. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*.
p. 296.

2.5.3. Siembra y establecimiento

Los árboles son las especies más difíciles de establecer y deben localizarse en el talud en tal forma, que la humedad sea lo más permanente posible. Es conveniente la construcción de terrazas o sistemas de concentración de aguas en las áreas de siembra de los árboles.

Ciertos tipos de pastos requieren riego permanente y no es recomendable utilizarlos en taludes en los cuales se puedan producir épocas de sequía. La poda de los árboles es una práctica muy útil para generar un crecimiento armónico. Existen épocas del año más propicias que otras para la poda de los árboles y debe tenerse cuidado de no malograr su crecimiento por poda en un periodo no propicio.

La forma como se localizan los árboles en el talud puede afectar su comportamiento. Los arreglos pueden ser longitudinales, transversales, diagonales, cruzados o radiales.

2.5.3.1. Estacas vivas

Son longitudes de tallo de árboles y arbustos que se entierran en el suelo con el objeto de que broten árboles. El procedimiento es simple, rápido y económico.

Las estacas vivas pueden utilizarse como un tratamiento primario en el cual las mismas cumplen un objetivo de anclar otros elementos como trinchos o mantos vegetales, que posteriormente se convertirían en árboles o arbustos.

Las estacas deben ser generalmente de uno a tres centímetros de diámetro y de 60 centímetros a un metro de longitud. La parte superior de la estaca debe cortarse normal al eje y la parte inferior en forma de punta para facilitar su inserción. Se presenta un listado de árboles que se reproducen por estaca y que son utilizados para estabilización de taludes.

Tabla V. **Árboles utilizados para cercas vivas y estabilización de taludes**

Nombre común	Nombre científico	Distancia de plantación
Aliso	<i>Alnus jorullensis</i>	2 a 3 m.
Anaco	<i>Erythrina poeppigiana</i>	2 a 3 m.
Aro	<i>Trinchantera gigante</i>	1,5 a 3 m.
Arrayán	<i>Myrcia popayanensis</i>	1,5 a 3 m.
Balso	<i>Ochroma pyramidale</i>	2 a 3 m.
Búcaro	<i>Erythrina fusca</i>	2 a 3 m.
Casuarina	<i>Casuarina equisetifolia</i>	2 a 3 m.
Chachafruto	<i>Erythrina edulis</i>	1,5 a 3 m.
Ciprés	<i>Cupressus lusitanica</i>	2 a 3 m.
Eucalipto globulus	<i>Eucalyptus globulus</i>	2 a 3 m.
Eucalipto grandis	<i>Eucalyptus grandis</i>	2 a 3 m.
Guacimo	<i>Guazuma ulmifolia</i>	2 a 3 m.
Gualanday	<i>Jacaranda caucana</i>	2 a 3 m.
Guamo macheto	<i>Inga densiflora</i>	1,5 a 3 m.
Leucaena	<i>Leucaena leucocephala</i>	1,5 a 3 m.
Matarratón	<i>Gliricidia sepium</i>	1,5 a 3 m.
Melina	<i>Gmelina arborea</i>	2 a 3 m.
Nauno	<i>Pseudosamanea fuachapele</i>	2 a 3 m.
Pino oocarpa	<i>Pinus oocarpa</i>	2 a 3 m.
Pino pátula	<i>Pinus patula</i>	2 a 3 m.
Roble	<i>Quercus humboldtii</i>	2 a 3 m.
Sauce	<i>Salix humboldtiana</i>	2 a 3 m.
Urapán	<i>Fraxinus chinensis</i>	2 a 3 m.

Fuente: SUÁREZ DÍAZ, Jaime. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*.

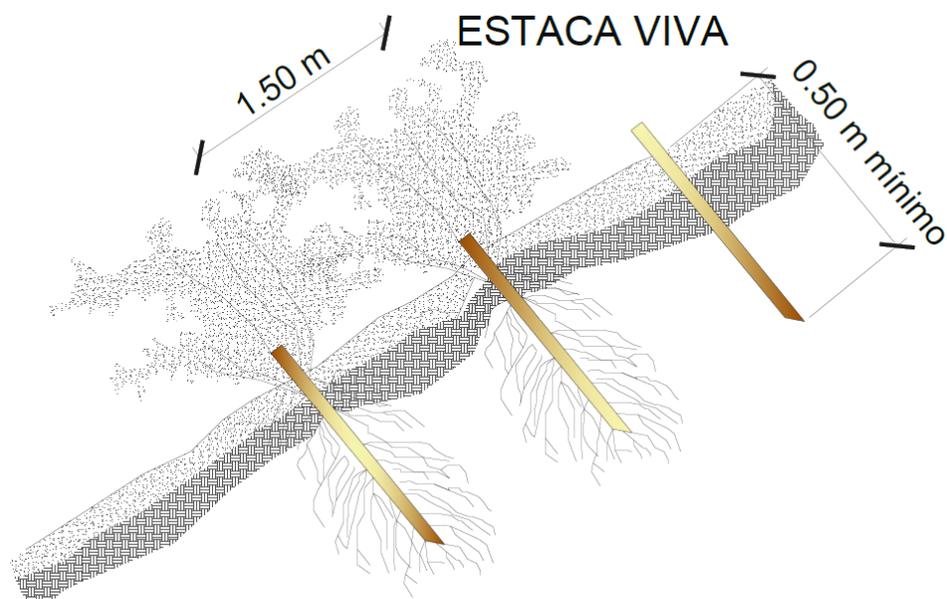
p. 298.

Se recomienda seguir las siguientes instrucciones de instalación:

- Clavar la estaca normal a la superficie del talud, utilizando martillos de caucho.

- La densidad de instalación debe ser de tres a cuatro estacas por metro cuadrado, para garantizar un cubrimiento adecuado en corto tiempo.
- Las dos terceras partes de la estaca deben estar enterradas dentro de la tierra.

Figura 18. **Estacas vivas**



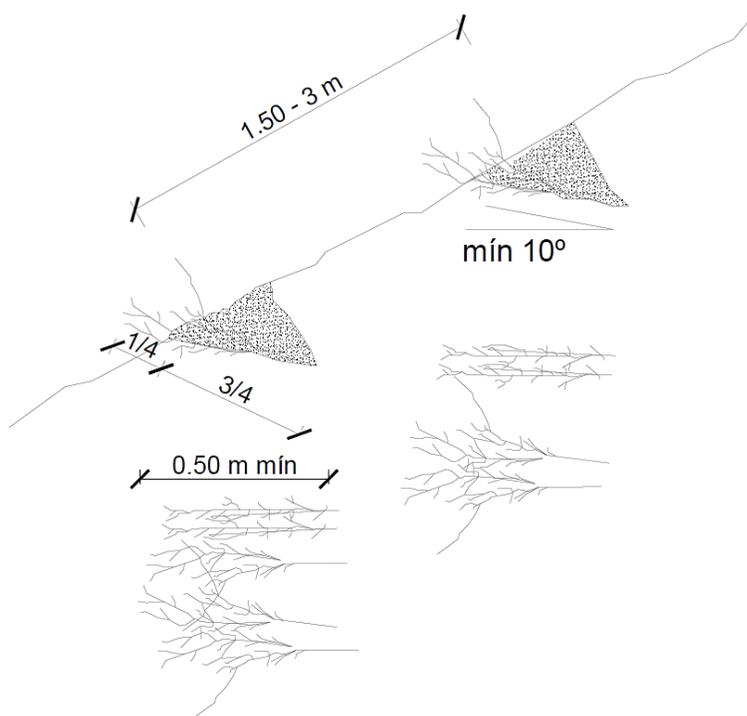
Fuente: elaboración propia, empleando el programa AutoCAD.

2.5.3.2. **Fajinas vivas**

Las fajinas son manojos de ramas que se entierran en zanjas poco profundas para que germinen en forma similar a como lo hacen las estacas vivas. Las zanjas generalmente son excavadas a mano y forman un contorno a lo largo de las líneas de nivel del talud. En taludes muy húmedos también se pueden colocar siguiendo la pendiente para facilitar el drenaje.

Después de colocar las fajinas, las zanjas se rellenan con suelo, de tal forma que parte de las fajinas queda enterrada y parte expuesta. La longitud de los ramos de fajina varía de 0,50 a 1,0 metro.

Figura 19. **Fajinas vivas**



Fuente: elaboración propia, empleando el programa AutoCAD.

El principal uso de las fajinas es el control de erosión, especialmente en zonas de cárcavas. Las fajinas a su vez forman unas líneas decorativas muy agradables al paisaje; generalmente se hacen con hierbas y juncos adaptados a las condiciones climáticas del sitio. En ocasiones se requiere colocar estacas para ayudar a la conformación de las fajinas vivas. El espaciamiento entre fajinas varía de acuerdo con la inclinación del talud como se muestra en la tabla VI.

Tabla VI. **Espaciamiento recomendado para fajinas vivas**

Ángulo del talud H:V	Espaciamiento en líneas de igual nivel (metros)	Espaciamiento en ángulo (metros)
1,1 – 1,5:1	1 - 1,2	0,6 -1,0
1,5:1 - 2:1	1,2 – 1,5	1,0 – 1,2
2:1 – 2,5:1	1,5 – 1,8	1,0 – 1,2
2,5:1 - 3:1	1,8 – 2,4	1,2 – 1,5
3:5 - 4:1	2,4 – 2,7	1,5 – 2,1
4,5:1 - 5:1	2,7 – 3,0	1,8 – 2,4

Fuente: SUÁREZ DÍAZ, Jaime. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*.
p. 299.

2.5.3.3. Estructuras y revestimientos artificiales con vegetación

La utilización de estructuras integradas con vegetación permite una gran variedad de esquemas, incluyendo muros, criba, gaviones, llantas usadas, tierra reforzada, bloques de concreto y recubrimientos con diversos materiales sintéticos. La vegetación actúa como refuerzo del suelo, protección contra la erosión y fijador del recubrimiento. La protección contra la erosión utilizando mantos vegetales con semillas es muy popular y existen varios tipos de mantos producidos comercialmente.

2.6. Bioingeniería en el ámbito fluvial

Las riberas de los ríos son áreas muy degradadas, especialmente por su utilización para agricultura y vías de comunicación, debido a que son zonas de menor pendiente; también son utilizadas para la urbanización, así como para la explotación de materiales, rectificación de cauces, entre otros.

La vegetación en las riberas genera una resistencia importante a la erosión, los cauces que poseen abundante vegetación presentan generalmente menor problema de erosión, esto es debido a dos efectos complementarios:

- Reducción de la velocidad de flujo adyacente a la superficie del suelo.
- Refuerzo o sostenimiento de las partículas en su sitio por acción de las raíces.

Para el correcto diseño de la protección vegetal de una orilla debe analizarse el efecto de la vegetación sobre las condiciones de flujo, ya que puede generar corrientes secundarias, el efecto de resistencia de la vegetación al movimiento del agua, valores y distribución de velocidades, entre otros.

Los árboles y la maleza alta pueden reducir la velocidad promedio, así como los caudales, dependiendo de su posición, distribución, dimensiones, arreglo de las ramas y otros factores. Las raíces protegen el suelo de la erosión, pero a su vez la presencia de los árboles puede aumentar la velocidad del flujo y la erosión junto a ellos.

Al plantar árboles debe tenerse cuidado de no producir demasiada sombra porque esto destruiría la vegetación debajo de ellos. La mejor aproximación de reducción de luz es la del 50 %; cuando se utilizan reducciones de luz superiores al 70 % se causa grave daño a la vegetación.

La eficiencia del refuerzo de la orilla de un río con vegetación depende de la profundidad de las raíces. Debe tenerse en cuenta que los árboles no empiezan a trabajar en forma eficiente hasta cuatro o siete años después de sembrados.

2.7. Sistemas de vegetalización de orillas

Para el correcto diseño de la protección vegetal de una orilla debe analizarse el efecto de la vegetación sobre las condiciones de flujo, resistencia de la misma al movimiento del agua, valores y distribución de velocidades, entre otros. A continuación, se presentan los sistemas utilizados para la vegetalización de las orillas más comunes.

2.7.1. Cordones de vegetación

Es una práctica muy común la colocación de cordones de vegetación a lo largo de la orilla junto a la corriente, generalmente, estos cordones tienen un ancho de mínimo 10 metros. Dentro de esta zona deben tenerse en cuenta tres o cuatro subzonas con diferentes condiciones y donde la vegetación cumple funciones diferentes:

- Zona más baja: esta zona entre el fondo del cauce y el nivel medio de aguas bajas generalmente no se revegetaliza debido a que el talud permanece sumergido. En ocasiones crecen plantas en forma espontánea que generan cierto grado de protección a la erosión y a la vez contribuyen a controlar la fuerza de las olas; sin embargo, teniendo en cuenta la dificultad de garantizar la vegetación en esta zona, se recomienda protegerla con elementos no vegetales como piedra, gaviones, entre otros.
- Zona entre el nivel medio de aguas bajas y el nivel medio de aguas anuales: esta zona se revegetaliza con plantas de margen acuático, como cañas, bambú y juncos de agua.

Dichas plantas tienen como función principal reducir la velocidad del agua en la orilla y generar un refuerzo de raíces que impidan la erosión. Estos cordones de juncos y bambú con solo dos metros de ancho pueden disipar los 2/3 de la energía de las olas de las embarcaciones. Para ayudarle a la vegetación se recomienda entremezclar la solución viva con soluciones muertas, por ejemplo, enrocado con bambú o gaviones con juncos. En esta forma se pueden resistir velocidades de más de un metro por segundo con relativa eficiencia.

- Zona entre el nivel medio anual de agua y el nivel de aguas máximas: se pueden utilizar refuerzos con pastos, hierbas, bambú, juncos y árboles.
- Zona por encima del nivel de aguas máximas: requiere protección con árboles para mejorar la estabilidad de los taludes y con hierbas y pastos para el control de la erosión superficial en surcos y cárcavas.

2.7.2. Estacas vivas de arbustos nativos

“Las estacas vivas de árboles y arbustos nativos propios de las orillas de un río o corriente han sido utilizadas con éxito, especialmente en ríos de cuencas pequeñas o medianas”.¹⁹

Generalmente se utilizan tres hileras de estacas con troncos de arbustos y árboles de mínimo de pulgadas de diámetro superior y longitudes aproximadas de tres metros. Estos troncos se entierran en la orilla con espaciamientos entre 1,0 y 1,5 metros.

¹⁹ KINNEY, John W. GULSO, Alan W. *The Illinois experience with low-cost streambank protection*. p. 9.

La profundidad de las estacas debe estar por debajo de la esperada socavación de la corriente. La primera hilera debe sembrarse bien dentro del agua. Esta no va a sobrevivir, pero ayuda a proteger a las hileras restantes de los ataques del agua. Debe tenerse en cuenta que estas estacas necesitan luz del sol para germinar y no deben colocarse en zonas totalmente cubiertas por sombra.

Adicionalmente, debe observarse que este sistema es más efectivo en suelos arenosos donde la presencia de oxígeno facilita el establecimiento de las estacas. Los suelos arcillosos no permiten el crecimiento de especies por estaca profunda.

2.7.3. Barreras longitudinales de ramas vivas

Este sistema intenta generar una barrera longitudinalmente a la corriente entre los niveles de aguas mínimas y máximas para alejar las corrientes de la orilla y si es posible producir sedimentación. Generalmente se construye una zanja longitudinal de profundidad de más de 50 centímetros en forma de V y en ella se colocan las ramas vivas protegidas por bloques de roca o cilindros de productos vegetales como fajinas, o rollos de fibra de coco o paja.

2.7.4. Trinchos vivos

Los trinchos son barreras o vertederos contruidos generalmente con materiales vegetales con el objetivo primario de reducir la erosión en una corriente no permanente. Estas barreras restringen el paso del flujo reduciendo su velocidad y de esta forma su capacidad de erosión. La magnitud de la restricción al flujo es un factor muy importante en el diseño de barreras.

Estos trinchos pueden ser contruidos totalmente con materiales vegetales o utilizando materiales vivos e inertes. Los trinchos retardan el flujo, reducen la erosión y ayudan a la revegetalización del fondo de la corriente. Una vez la vegetación densa es establecida dentro de la corriente, esta ejerce una fuerza hidráulica adicional, reduciendo aún más las velocidades.

Es importante que las especies vegetales que se escojan tengan una raíz profunda, de tal forma que se ancle de manera eficiente al suelo. No es conveniente que el follaje sea demasiado denso para que la restricción a flujo de agua tampoco lo sea. Sin embargo, no existen formas matemáticas para este diseño.

2.7.5. Diques contra inundación

En este caso se utiliza una mezcla de plantas, algunas de ellas de ambiente acuático, árboles y arbustos y ocasionalmente, se construyen protecciones laterales artificiales en los sitios de mayor criticidad a la erosión.

2.7.6. Revestimiento de canales con vegetación

La vegetación puede utilizarse como un recubrimiento protector entre el flujo de agua y la superficie de canales de flujo no permanente, bajo los mismos principios de la protección contra la erosión de taludes.

La vegetación en la protección de canales contra la erosión no requiere una densidad de follaje demasiado grande porque esta dificulta la función del drenaje. Deben seleccionarse especies de poca altura y de tallos no muy rígidos, de tal forma que se pueda mantener un flujo expedito de agua en el canal.

Las especies escogidas deben tener capacidad de resistir sumergidos durante periodos relativamente largos y la habilidad de regenerarse después de los periodos de inundación. Hewlett y otros (1987) demostraron que un pasto bien establecido, en la mayoría de los casos puede resistir una velocidad de 2 metros/segundo durante diez horas. Cuando la velocidad se aumenta a 3 o 4 metros/segundo, se empiezan a presentar fallas o pérdida de la cobertura vegetal, y finalmente, si la velocidad alcanza valores de 5 metros/segundo, la cobertura vegetal no resiste más de dos horas.

“La velocidad límite para diseño es de aproximadamente 1,0 metros/segundo, como norma general”; sin embargo, se recomienda utilizar la tabla VII de velocidades permisible para canales revestidos con vegetación.²⁰

2.7.7. Espigones de vegetación

En las corrientes de caudales y velocidades pequeñas se pueden construir espigones cortos utilizando estacas y ramas vivas, así como otros productos vegetales. Estos espigones permiten alejar las corrientes de la orilla y facilitar la sedimentación.

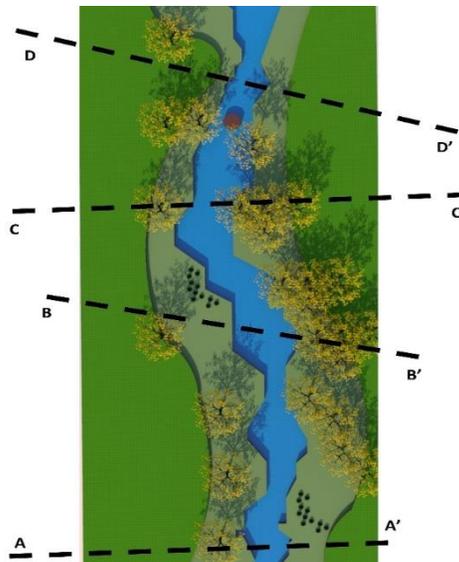
²⁰ GREGORY, James M. MCCARTY, Thomas R. *Maximum allowable velocity prediction for vegetated waterways*. p. 55.

Tabla VII. **Velocidades máximas permisibles en canales revestidos con vegetación**

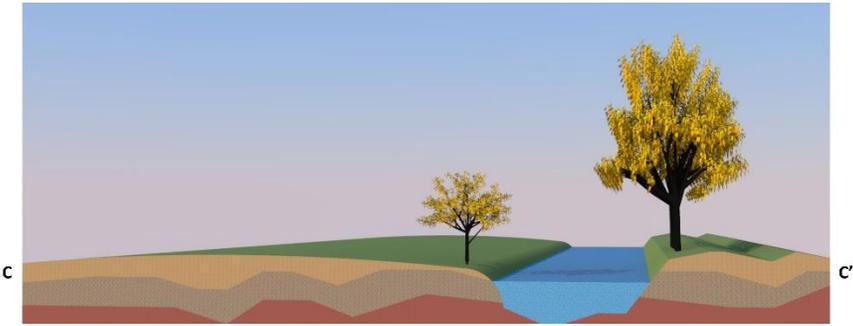
Erosionabilidad de los suelos	% de cobertura vegetal de la superficie	Pendiente del canal		
		0 a 5 %	5 a 10 %	> 10 %
		Velocidades permisibles (m/seg)		
Suelos fácilmente erosionables, arenas y limos	Muy buena 100 %	1,8	1,5	1,2
	Buena 88 %	1,5	1,2	0,9
	Regular 29 %	0,8	No recomendable	No recomendable
Suelos resistentes a la erosión	Muy buena 100 %	2,4	2,1	1,8
	Buena 88 %	2,1	1,8	1,5
	Regular 29 %	1,1	No recomendable	No recomendable

Fuente: SUÁREZ DÍAZ, Jaime. *Control de erosión en zonas tropicales*. p. 337.

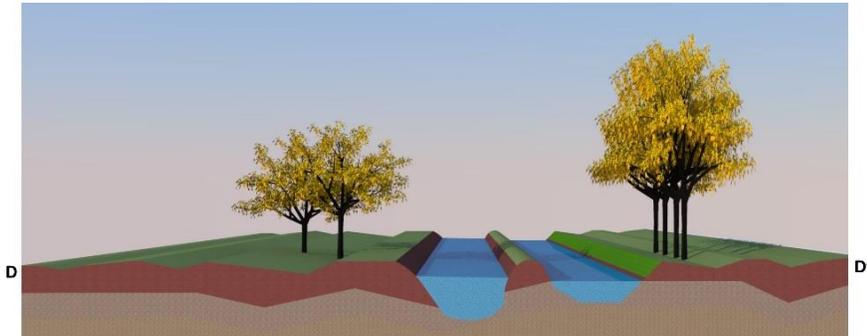
Figura 20. **Refuerzo con vegetación de los puntos críticos de un río**



Continuación de la figura 20.



Continuación de la figura 20.

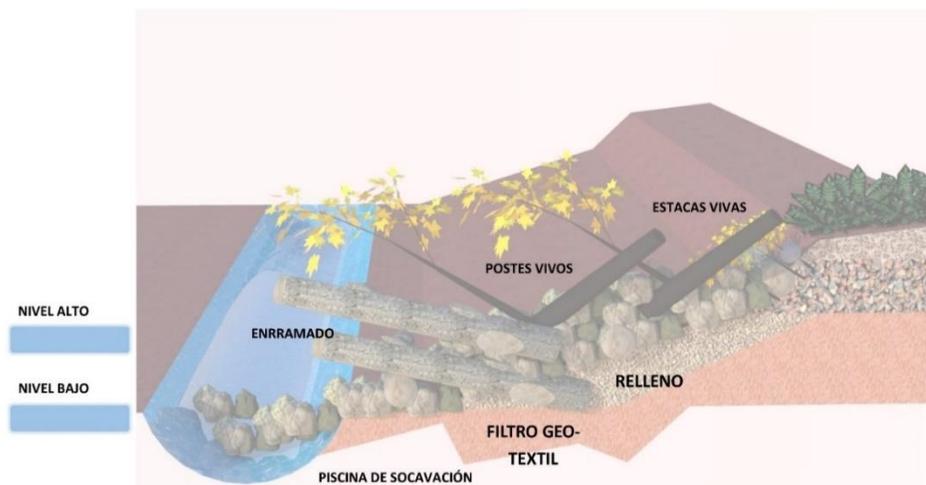


Fuente: elaboración propia, empleando el programa Sketchup.

2.7.8. Vegetalización de orillas de lagos

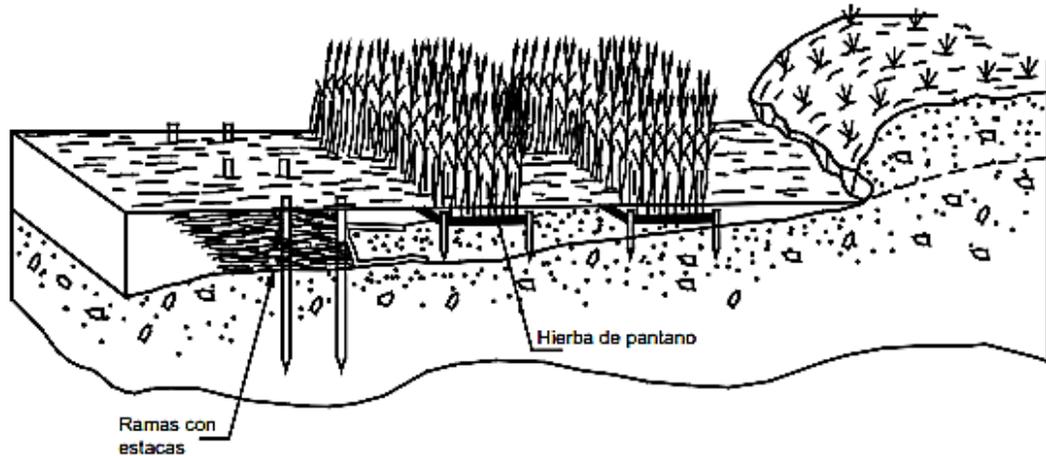
La cobertura vegetal en las orillas de lagos y represas está destinada principalmente a controlar la erosión producto del oleaje, y generalmente se diseñan barreras que disipen la energía de las olas.

Figura 21. **Espigones de troncos y ramas vivas**



Fuente: elaboración propia, utilizando el programa de AutoCAD

Figura 22. **Protección de la ribera de un lago utilizando vegetación**



Fuente: SUÁREZ DÍAZ, Jaime. *Control de erosión en zonas tropicales*. p. 343.

2.8. Guía para el diseño de obras de bioingeniería para estabilizar riberas de corrientes

Para la planeación, diseño y construcción de obras de bioingeniería de estabilización de riberas, se sugiere tener en cuenta, entre otros, los siguientes lineamientos.²¹

2.8.1. Caracterización de la hidrología

Se requiere realizar un análisis del régimen hidrológico caracterizando las crecientes máximas que se deben esperar, así como las condiciones medias y mínimas. Esta caracterización se inicia estimando la magnitud de los flujos máximos para frecuencias de 50 y 100 años, utilizando métodos estadísticos.

²¹ MILLER, Dale. *Design guidelines for bioengineered river bank stabilization*. p. 159.

La creciente de los 100 años es la más utilizada para el diseño porque tiene una probabilidad relativamente baja de ocurrencia, la cual se puede considerar de riesgo aceptable.

En todos los casos es importante definir un caudal máximo de diseño. El objetivo principal es garantizar que el caudal del proyecto circule por la sección proyectada objeto de intervención. Un factor muy importante para el diseño de obras de control de erosión es la duración de la creciente. Las curvas, caudal, frecuencia y duración de las inundaciones permiten definir las diferentes zonas de revegetación de los bancos e identificar los periodos de bajo riesgo para la construcción.

2.8.2. Determinación de las condiciones hidráulicas

Uno de los criterios de diseño hidráulico más importante que se debe determinar es la fuerza tractiva de la corriente sobre las riberas y sobre el fondo del canal.

Como se ha visto, el río transporta, además de agua y sedimentos, materia orgánica y energía. Energía que establece su dinámica fluvial, de erosión, transporte y sedimentación. Asimismo, se sabe que en la dimensión longitudinal se produce un gradiente de pendiente y cantidad de agua que va a determinar un gradiente de energía o capacidad de dinámica fluvial y que de manera muy simplificada se puede resumir en dos parámetros o indicadores esenciales: la velocidad del agua y la tensión tangencial o de arrastre. Estos se utilizan para especificar los revestimientos adecuados para la protección de la vegetación, los métodos de instalación y los detalles de diseño para el desarrollo de tratamientos vegetativos.

La velocidad es dependiente del caudal o cantidad del agua, de la sección o geometría del cauce mojado, de su pendiente y de un parámetro, la rugosidad, que de alguna manera incorpora la resistencia al paso del agua. Se mide en m/s.

La segunda, la tensión de arrastre o tangencial, es la fuerza que el agua ejerce sobre la superficie del lecho y de las márgenes y que es función del peso específico del agua, de la pendiente y de la geometría del cauce mojado. De alguna manera indica la fuerza que ejerce el agua, cuya consecuencia es la erosión; el arrastre del material se mide en N/m².

Tabla VIII. **Parámetros hidráulicos para la selección de las técnicas**

Técnica de bioingeniería para el margen fluvial	Velocidad del río	Tensión o resistencia al corte vegetación no desarrollada	Tensión o resistencia al corte vegetación desarrollada
Siembra	< 3 m/s	0	150 N/m ²
Manta orgánica	< 3 m/s	< 100 N/m ²	150 N/m ²
Estaquillado	< 3 m/s	100 N/m ²	150 N/m ²
Plantación de árboles y arbustos	< 3 m/s	< 100 N/m ²	100 N/m ²
Fajina de ribera	< 3 m/s	100 N/m ²	150 - 200 N/m ²
Trenzado de ribera	3 - 6 m/s	100 N/m ²	150 - 200 N/m ²
Lechos de ramaje	3 - 6 m/s	100 N/m ²	150 - 200 N/m ²
Cepillo vivo	3 - 6 m/s	100 N/m ²	100 - 150 N/m ²

Continuación de la tabla VIII.

Estrato vivo	3-6 m/s	100 N/m ²	100-150 N/m ²
Estera de ramaje	< 3 m/s	150 N/m ²	>200 N/m ²
Enrejado	3 - 6 m/s	200 N/m ²	300 N/m ²
Entramados	3 - 6 m/s	200 N/m ²	300 N/m ²
Empalizada viva	< 6 m/s	200 N/m ²	300 N/m ²

SANGALLI, Paola. *Bioingeniería fluvial. Manual técnico para el ámbito cantábrico - proyecto H₂O Gurea*. p. 56.

Otro criterio importante para el diseño es la profundidad de socavación. Se requiere conocer para determinar la profundidad de las cimentaciones de las obras y la extensión de los elementos de protección. En el cuadro siguiente se muestra la relación entre las distintas técnicas y las tensiones y velocidades que soportan, recomendándose que se respeten estos límites en el diseño de las intervenciones de bioingeniería.

2.8.3. Análisis de los procesos geomorfológicos

El objeto de las evaluaciones de la geomorfología fluvial es identificar la dinámica histórica de la corriente y predecir la inestabilidad del cauce hacia el futuro.

Es común que ocurran grandes fracasos de las obras en las orillas de los ríos debido a que no se han investigado los procesos geomorfológicos y las causas reales de la inestabilidad de las orillas. ²²

Comúnmente la inestabilidad de los ríos es el resultado de cambios geomorfológicos como la alteración de régimen de sedimentos por agradación, modificación del hidrograma (máximos mayores en las inundaciones debidas al uso de la tierra), degradación de la vegetación de la orilla, alteración de los canales, construcción de puentes, entre otros.

En la investigación geomorfológica se deben analizar tres elementos principales:

- Estabilidad de la corriente en planta.
- Movimientos del *thalweg* (línea que marca la parte más honda de un valle, y es el camino por el que discurren las aguas de las corrientes naturales).
- Detalles del fondo del cauce.

Los criterios para la redacción de proyectos de obras en estructuras rígidas y semirrígidas se basan en los usuales cálculos, asumiendo en general el esquema de muro de gravedad. Lo mismo ocurre para las estructuras de gaviones cuando funcionan como obras de contención. Se debe prestar particular atención en la determinación de la cota de cimentación, ya que se tiene que considerar la dinámica del cauce.

La redacción de proyectos de obra con materiales sueltos consiste en el correcto dimensionamiento del tamaño del canto, que se debe situar en la orilla,

²² National Research Council. *Restoration of aquatic ecosystems*. p. 552.

de modo que garantice la estabilidad. En tal caso, se debe tener en consideración, además de los efectos de gravedad, la acción hidrodinámica producida por la corriente: la tracción, los movimientos secundarios, entre otros.

Se considera solo la tracción, expresada mediante la tensión tangencial; la acción hidrodinámica tiene el mismo sentido de la corriente y con una intensidad variable a lo largo del perímetro mojado. Se ha observado la notable influencia de la granulometría en los valores de tensión tangencial:

- En cauces con sedimentos finos, típicamente cauces de llanura, la coexistencia de débil pendiente y baja velocidad, junto con bajos valores de la relación de forma B/Y (ancho del fondo del río/tirante), parece que limitan el incremento de la tensión al crecer el caudal;
- En cauces con sedimentos de tamaño grueso, caracterizados por pendientes y velocidades mayores, la acción tangencial parece ser considerablemente más elevada y creciente conforme sube el caudal.

“La acción tangencial producida por la corriente se contrapone a la resistencia de arrastre de las obras de defensa, que puede variar notablemente en función de la tipología, de los criterios constructivos y de las condiciones generales de estabilidad de la orilla”.²³

2.8.4. Análisis geotécnico

Una vez se hayan evaluado los factores hidrológicos, hidráulicos y geomorfológicos, se requiere realizar un análisis de los posibles mecanismos de

²³ PALMERI, Fabio. *Manual de técnicas de ingeniería naturalística en ámbito fluvial*. p. 79

falla de las orillas, para asegurarse que las obras de estabilización que se propongan sean estables. Se deben analizar las posibilidades y ocurrencia de fallas profundas y someras, utilizando modelos de estabilidad de taludes.

2.8.5. Aspectos de la vegetación

La estabilidad a largo plazo de las obras de bioingeniería depende del establecimiento de una cobertura vegetal densa y permanente que una el suelo por medio de un sistema de raíces y proporcione resistencia contra las fuerzas erosivas. Debido al papel determinante de la vegetación es esencial que en el programa de revegetalización se incluyan especies de plantas apropiadas y que se les proporcione condiciones favorables para su crecimiento.

La mejor forma de lograr una cobertura vegetal con especies apropiadas es la utilización de especies nativas de las comunidades vegetales en la zona del proyecto. Estas comunidades generalmente consisten de una biodiversidad que incluye plantas herbáceas, pastos, arbustos y árboles.

La siembra de una biodiversidad de especies es más resistente a las enfermedades y se adapta más fácilmente a las condiciones del sitio. Es común en las obras de ingeniería la revegetalización utilizando una sola especie, quedando el terreno expuesto por falta de elementos de protección.

Las plantas herbáceas nativas son extremadamente importantes porque ellas proveen un sistema de densidad radicular continua y profunda y se establecen en un periodo relativamente corto de tiempo.

Los matorrales o rastrojos son muy útiles porque sus raíces se profundizan más que las hierbas y su sistema radicular es más grueso al igual que su follaje. Finalmente, los arbustos y árboles tienen raíces y ramas mucho más fuertes y rígidas. Para la selección de las especies vegetales se deben analizar factores tales como la acidez del suelo, el clima y las condiciones hidrológicas.

Una vez se han escogido las especies de plantas que se van a utilizar, se requiere diseñar el sistema de consecución y reproducción de las especies. Es posible que se requiera el establecimiento de viveros o sitios de recolección y preparación del material para la siembra.

Algunas especies se reproducen por semilla, pero otras requieren de la utilización de estolones o rizomas. Se debe seleccionar el mejor sistema para el establecimiento tanto de los pastos como de las hierbas y árboles.

2.8.6. Requerimientos para la preservación de la fauna acuática y terrestre

Uno de los beneficios de la bioingeniería es la habilidad para proveer un hábitat para los peces y la vida silvestre, minimizando los impactos ambientales. Por lo tanto, los diseños deben incluir coberturas que favorezcan el ambiente de los peces, aves y otros animales. También se debe evitar la intervención de humedales y áreas sensitivas que pueda causar daño a las especies.

2.8.7. Viabilidad de la construcción

Que el proyecto pueda ser construido es una consideración básica de diseño. Deben analizarse factores tales como facilidades de acceso, disponibilidad de materiales, secuencia de construcción, métodos constructivos y medidas que se requiere tomar durante la construcción.

Debe tenerse en cuenta que no es fácil trabajar en las riberas de los ríos y que en estos sitios fácilmente se pueden causar daños irreparables al medio ambiente. Se debe proveer sitios de trabajo estables con capacidades de soporte suficiente para sostener los equipos que se requieran. Es muy importante además definir previamente las rutas de acceso para equipos, materiales y personal.

3. PASTO VETIVER (*Vetiveria zizanioides* L.)

El *Chrysopogon zizanioides*, conocido en el mundo como pasto vetiver, es una planta gramínea, perenne y sin tallo; como no tiene rizoma radicular o haces enraizados, la planta crece en grandes matas o macollos a partir de una masa radicular muy ramificada, esponjosa y densa, que engordan y crecen sin ser invasivas con otras hierbas; cuenta con una vida útil de más de cien años, es de rápido crecimiento y muy resistente a la propagación de plagas, a la contaminación y a la salinidad. No tiene ni desarrolla rizomas o estolones.

Es una especie vegetal que cuando se siembra correctamente, forma una sólida cobertura que puede prevenir la erosión, formar terrazas naturales, incrementar el almacenamiento de la humedad del suelo y proteger cultivos vecinos que no compiten con este.

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

Las raíces únicas de esta planta pueden absorber excesos de nitratos y fosfatos y tolerar niveles altos de elementos tóxicos como arsénico, mercurio, aluminio, níquel, hierro, cromo y manganeso, y contener su propagación.

Crece en un rango amplio de suelos y con diferentes niveles de fertilidad; puede resistir temperaturas desde -15° a más de 44 °C, desde alturas que oscilan desde el nivel del mar hasta los 2 500 m.s.n.m. “Para obtener buen desarrollo es preferible que se encuentre directamente en contacto con la luz del sol, pero soporta hasta un 30 % de sombra”.²⁴

Las raíces del vetiver son una de sus mayores virtudes; generalmente crecen verticalmente y no compiten con los cultivos adyacentes. En buenas condiciones de suelos, las raíces de la planta, en doce meses, pueden crecer hasta una profundidad de 4,00 m, y bajo la superficie del suelo se forma una barrera de suelo reforzado, resistente a la erosión.

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

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

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

²⁴ ALEGRE ORIHUELA, Julio. Manual sobre el uso y manejo del pasto vetiver. p. 37.

- Es efectiva para el control de la erosión de los suelos, al tener una alta capacidad de retención del suelo y absorción de agua contenida en el mismo.
- Tiene excelentes características biológicas para la reducción de la contaminación de las aguas residuales y mitigación de la polución, por su capacidad de absorber y tolerar altos niveles de minerales pesados. La absorción de altos niveles de contaminantes o metales pesados es un proceso en que la planta los almacena.
- Puede reducir las altas cargas de nutrientes presentes en los cuerpos de aguas que son tóxicas para los cultivos y pueden usarse para irrigación una vez sean tratadas con esta planta.

3.1. Características morfológicas

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

- Tallos firmes y erguidos que pueden soportar flujos de agua relativamente profundos.
- Muy resistente a plagas, enfermedades y al fuego.
- Forma una barrera densa cuando es plantada a corta distancia, actuando como un filtro muy efectivo de los sedimentos y como un dispersor del agua de escorrentía.

- Nuevos brotes se forman desde la corona subterránea haciendo al vetiver resistente al fuego, heladas, tráfico y alta presión de pastoreo.
- Cuando es enterrada por los sedimentos atrapados, crecen nuevas raíces desde los nudos. El vetiver continuará creciendo hacia arriba con los sedimentos depositados, formando eventualmente terrazas si el sedimento atrapado no es removido.

Tabla IX. **Clasificación científica del pasto vetiver**

Clasificación científica	
Reino	<i>Plantae</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Liliopsida</i>
Subclase	<i>Liliidae</i>
Orden	<i>Poales</i>
Familia	<i>Poaceae</i>
Subfamilia	<i>Panicoideae</i>
Tribu	<i>Andropogoneae</i>
Subtribu	<i>Andropogoninae</i>
Género	<i>Vetiveria</i>
Especie	<i>Chrysopogon zizanioides</i>
Nombre binomial	<i>Chrysopogon zizanioides</i>

Fuente: HERRERA PASSOS, Jessika. *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*. p. 26.

3.2. Características fisiológicas

- Tolerancia a variaciones climáticas extremas como sequía prolongada, inundaciones, sumersión y temperaturas extremas de -15 °C a +55 °C.

- Habilidad para rebrotar rápidamente después de haber sido afectado por sequías, heladas, salinidad y otras condiciones adversas al mejorar las condiciones del tiempo o añadir correctivos al suelo.
- Tolerancia a un amplio rango de pH desde 3,3 a 12,5, sin enmiendas del suelo.
- Alto nivel de tolerancia a herbicidas y plaguicidas.
- Alta eficiencia en la absorción de nutrientes tales como N y P y metales pesados en aguas contaminadas.
- Muy tolerante a medios de crecimiento altos en acidez, alcalinidad, salinidad, o ricos en sodio y magnesio.
- Alta tolerancia al, Mn y metales pesados tales como As, Cd, Cr, Ni, Pb, Hg, Se y Zn en los suelos.

3.3. Características ecológicas

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

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

3.4. Tolerancia de la planta de vetiver al frío

Aunque el vetiver es una planta que soporta las altas temperatura del sol, puede sobrevivir y desarrollarse en condiciones de frío extremo. Bajo condiciones de escarcha o helada su parte aérea muere o entra en latencia y se torna color púrpura, pero sus puntos de crecimiento subterráneo sobreviven.

En Australia, el vetiver no se afectó por una severa helada a $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ y sobrevivió por un corto período a $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el norte de China. En Georgia (EEUU), el vetiver sobrevivió a una temperatura del suelo de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ pero no resistió a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Recientes estudios demuestran que el crecimiento óptimo de raíces se presenta a temperaturas del suelo de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero las raíces continúan creciendo hasta $13\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Aunque un crecimiento muy pequeño ocurre a temperaturas del suelo en el rango entre $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (día) y $13\text{ }^{\circ}\text{C}$, el crecimiento de la raíz continúa a una velocidad de $12,6\text{ cm/día}$, indicando que dicho pasto no entra en latencia a esta temperatura y por extrapolación se estima que la latencia ocurre a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.5. Características mecánicas de las raíces del vetiver

El vetiver tiene un masivo y finamente estructurado sistema de raíces. La raíz tiene una característica que lo diferencia de otras raíces de pastos y árboles, siendo el poder de penetración. La fuerza innata y vigor de la raíz le permite penetrar a través de suelos difíciles o capas de rocas con fracturas; incluso capas asfálticas. Sin rizomas o estolones, las raíces de la planta crecen rectas hacia abajo con una masa tan densa como la cantidad de hojas que produce por encima del suelo. Estas raíces penetran de 3 a 4 metros en el sustrato antes del adelgazamiento.

Tabla X. **Resistencia a la tensión de algunas plantas**

Nombre botánico	Nombre común	Resistencia a la tensión (Mpa)
Salix sp.	Sauce	9 – 36
Populus sp.	Álamos	5 – 38
Alnus sp.	Alisos	4 – 74
Pseudotsuga sp.	Abeto de Douglas	19 – 71
Hacer sacharinum	Arce plateado	15 – 30
Tsuga heterophylla	Cicuta del oeste	27
Vaccinum sp.	Gaylussacia	16
Hordeum vulgare	Cebada	15 – 31
****	Zacate, hierbas	2 – 20
****	Musgo	0,002 – 0,007
Vetiveria zizanioides	Pasto vetiver	40 – 120

Fuente: PÉREZ, Carlos y LIZCANO, Jorge. *Uso del pasto vetiver como una propuesta de Bioingeniería en la estabilización de taludes*. p. 69.

3.6. Usos del pasto vetiver

El pasto vetiver ha sido utilizado por más de 3 000 años como fuente de fragancias y medicinas, para controlar la erosión y conservar los suelos y el agua. Actualmente, la bioingeniería ha dado a conocer el uso de este pasto para la estabilización de taludes en diferentes partes del mundo. Entre los usos más relevantes que se le dan a este pueden describirse los siguientes:

3.6.1. Control de la erosión

Existen diversos tipos de erosión, el más perjudicial para todos los terrenos es el tipo laminar que es provocado por las precipitaciones y es el responsable de la pérdida de millones de toneladas de suelo desnudo cada año. A medida que las gotas de agua de lluvia golpean el suelo, este se desprende en partículas que luego son arrastradas con la escorrentía, es así como el terreno pierde cobertura vegetal y se crean surcos y cárcavas.

En zonas donde no es posible cubrir el terreno forestalmente se opta por barreras vegetales para detener la pérdida del suelo; una de las opciones más utilizadas son las barreras vivas con pasto vetiver, las cuales crean un sistema natural de protección del suelo que a su vez conserva la humedad y evita las pérdidas por erosión. El sistema masivo de raíces del pasto vetiver hace que el agua escurrida pierda fuerza y deposite los sedimentos de arrastre, generalmente muy fértiles; en las barreras vivas las hierbas retoñan en los sedimentos y se crean terrazas naturales.

El pasto vetiver, al tener la particularidad de emitir raíces de los nódulos de los tallos, sigue rebrotando, aunque se encuentre en parte cubierto de sedimentos; por lo tanto, mientras más alta sea la capa de sedimentos atrapados, más altas serán también las barreras del vetiver.

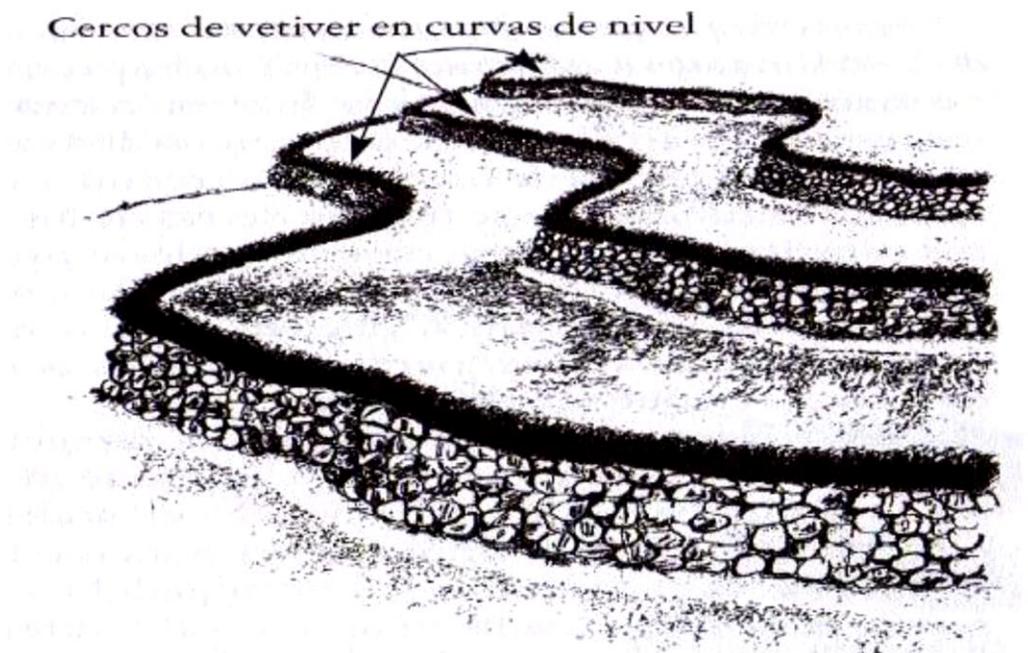
3.6.2. Usos

El sistema del pasto vetiver aparte de ser usado para estabilizar taludes y controlar la erosión, se utiliza en los siguientes casos:

3.6.2.1. Protección de las terrazas de mampostería o barreras de rocas

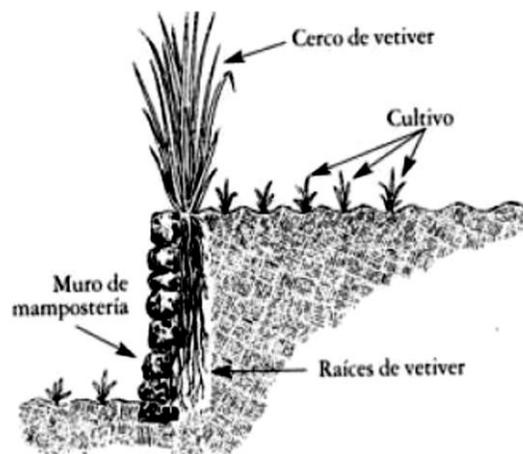
Se puede observar en la siguiente figura cómo pueden protegerse las terrazas con mampostería o barreras de rocas.

Figura 23. Protección de terrazas



Fuente: ALEGRE, Julio. *Manual sobre el uso y manejo del pasto vetiver*. p. 29.

Figura 24. **Funcionamiento del vetiver**

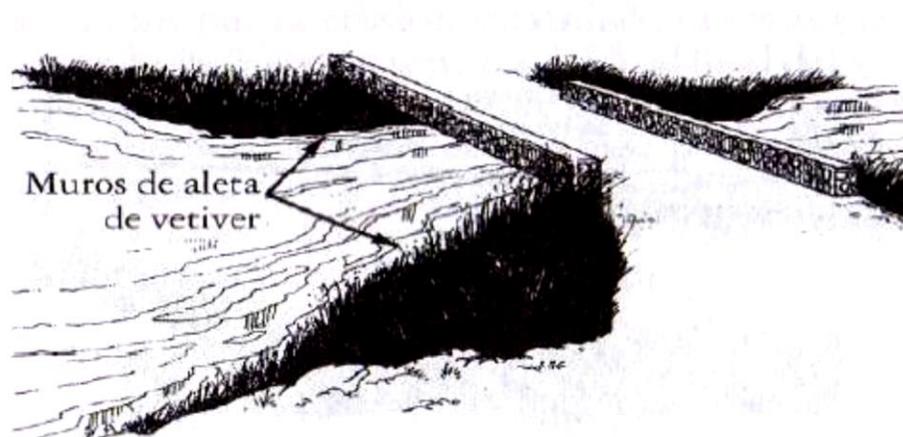


Fuente: ALEGRE, Julio. *Manual sobre el uso y manejo del pasto vetiver*. p. 30.

3.6.2.2. **Protección de puentes**

En la siguiente figura puede apreciarse el uso del vetiver para la protección de puentes.

Figura 25. **Colocación del vetiver para protección**

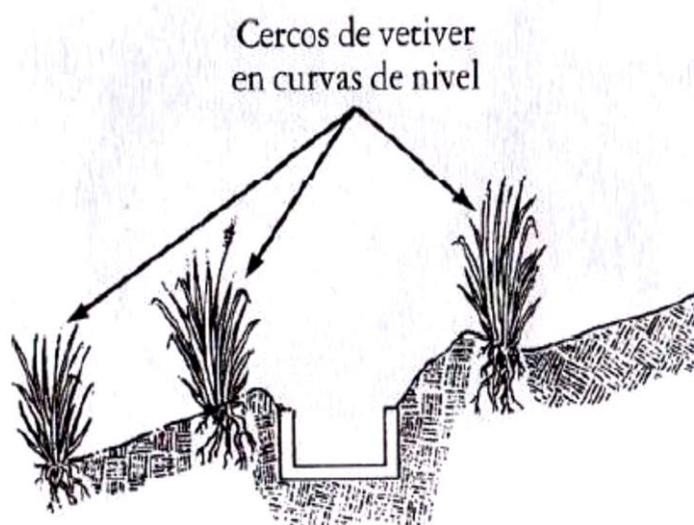


Fuente: ALEGRE, Julio. *Manual sobre el uso y manejo del pasto vetiver*. p. 31.

3.6.2.3. Protección de acueductos

A continuación, se ilustra gráficamente cómo puede protegerse un canal con el uso de cercos de vetiver en curvas de nivel.

Figura 26. Protección de canal de concreto



Fuente: ALEGRE, Julio. *Manual sobre el uso y manejo del pasto vetiver*. p. 32.

3.6.2.4. Utilización de vetiver en techos para construcciones rurales

En algunos lugares de África se utiliza este tipo de planta para la elaboración de techos de algunas viviendas, especialmente en el área rural.

Figura 27. **Techos en casas rurales**



Fuente: ALEGRE, Julio. *Manual sobre el uso y manejo del pasto vetiver*. p. 34.

3.6.3. Otros usos

- Para realizar artesanías con los tallos de floración: se fabrican diversos objetos como sombreros, platos y escobas.
- Para realizar abono orgánico.
- Para biorremediación: se utiliza como biofiltro de aguas residuales, para limpieza de aguas contaminadas en piscinas de oxidación y como repelente de insectos.
- Conservación de diques de defensa de ríos: impide que la erosión devuelva el cauce a los campos.

3.7. Pasto vetiver y la climatología guatemalteca

La República de Guatemala tiene una superficie geográfica de 108 889 km², la cual presenta un relieve diverso y complejo, en donde hay desde altas montañas, pies de montes, hasta planicies coluvio-aluviales.

El clima es el producto de la influencia de los factores astronómicos, geográficos, topográficos y meteorológicos. Guatemala se caracteriza por tener 6 regiones climáticas, caracterizadas por el sistema de Thorntwaite.

3.7.1. El pasto vetiver en la región con condiciones más secas de Guatemala

La región con condiciones más secas de Guatemala comprende un porcentaje muy pequeño del área del país; está esencialmente en el centro del valle del río Motagua, en los departamentos de Zacapa y El Progreso, donde los vientos cargados de humedad que soplan del Caribe son interceptados por la Sierra de las Minas y las montañas vecinas.

Esta región se caracteriza porque en algunas partes las lluvias no alcanzan los 500 mm al año y su temperatura varía entre 22 °C a 30 °C. Se llega a alcanzar hasta los 42 °C.

El pasto vetiver, por ser xerófita al mismo tiempo que hidrófita, es capaz de soportar sequías extremas; se ha observado que soporta vivir en lugares con niveles de precipitación media anual de 200 mm, por lo que llega a tener una muy buena adaptación en la región más seca de Guatemala, en la cual se tiene un mínimo aproximado de 500 mm de precipitación media anual.

3.7.2. El pasto vetiver en la región con condiciones más lluviosas de Guatemala

En las regiones de la boca costa y la franja transversal del norte se presentan los niveles más altos de lluvias de todo el país, en donde las elevaciones varían entre los 300 a 1 400 m.s.n.m. Los niveles de temperatura en estas regiones descienden conforme aumenta la elevación, variando entre los 18 °C a 30 °C.

Al ser un pasto hidrófito, el vetiver es capaz de vivir en climas con niveles de precipitación muy altos; también en zonas de inundación, humedales, lagunas y pantanos se ha observado que se adapta correctamente en lugares con una precipitación media anual hasta de 6 000 milímetros. Como prueba de ello está su utilización en cajas flotantes como cultivo hidropónico para reducir las recargas altas de nutrientes que son tóxicas para los cultivos y limpieza de aguas residuales.

En Guatemala se tiene registrada la precipitación media anual en las regiones de la boca costa y la franja transversal del norte, la cual ha alcanzado hasta 5 000 mm, lo que indica que se tiene una alta adaptabilidad para el pasto vetiver en estas regiones del país.

3.8. Desarrollo experimental

En “Análisis para la reducción de riesgos utilizando el pasto vetiver en el talud ubicado en el parque ecológico Las Ardillas” se muestra los esfuerzos a tensión con vetiver de la costa sur de Guatemala, a través de los ensayos realizados en la Universidad de San Carlos de Guatemala que se muestran a continuación.²⁵

3.8.1. Descripción del ensayo a tensión

El ensayo de tensión en un material consiste en someter una probeta a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce su rotura. Este ensayo sirve para encontrar el esfuerzo de tensión que puede llegar a resistir un material, instantes antes de que falle.

En esta investigación se realizó el ensayo de tensión en 11 probetas hechas de raíces del pasto vetiver, las cuales provienen de plantas de dos años, extraídas de la plantación del Ingenio Magdalena, localizado en el municipio La Democracia, Escuintla. Este ensayo se realizó con el fin de encontrar el valor medio del esfuerzo de tensión que resisten estas raíces; las probetas se utilizaron uniendo varias raíces, de manera que quedara una muestra trenzada, variando al mismo tiempo la cantidad de filamentos por cada una.

²⁵ WELLMANN CASTELLANOS, Heike. *Análisis para la reducción de riesgos utilizando el pasto vetiver en el talud ubicado en el parque ecológico Las Ardillas*. p. 105.

Figura 28. **Plantación del pasto en ingenio Magdalena**



WELLMANN CASTELLANOS, Heike. *Análisis para la reducción de riesgos utilizando el pasto vetiver en el talud ubicado en el parque ecológico Las Ardillas*. p. 106.

La siguiente fotografía muestra el trenzado de las raíces de varias plantas del pasto vetiver para lograr una probeta que se pudiera adaptar a las máquinas de ensayos de tensión del área de metales y productos manufacturados del Centro de Investigaciones de Ingeniería; también, para que todas las probetas usadas tuvieran una longitud similar.

Figura 29. **Trenzado de raíces para la formación de una probeta**



WELLMANN CASTELLANOS, Heike. *Análisis para la reducción de riesgos utilizando el pasto vetiver en el talud ubicado en el parque ecológico Las Ardillas*. p. 108.

En la siguiente tabla se describe el número de plantas por muestra y el diámetro de cada una.

Tabla XI. Descripción de número de plantas por muestra

Número de muestra	Diámetro (cm)	Número de plantas
1	2,3	3
2	1,7	2
3	2	2
4	2	2
5	1,7	4
6	2,5	4
7	1,6	3
8	1,7	4
9	1,8	2
10	1,7	2
11	2	5

WELLMANN CASTELLANOS, Heike. *Análisis para la reducción de riesgos utilizando el pasto vetiver en el talud ubicado en el parque ecológico Las Ardillas*. p. 106.

Para obtener un promedio de los esfuerzos de tensión que resisten las raíces del pasto vetiver en las condiciones ya descritas, se realizaron 11 ensayos de laboratorio para los cuales se usaron probetas como las de la fotografía de la figura 28.

La siguiente tabla muestra el esfuerzo máximo de tensión que resistieron las 11 probetas ensayadas, con su respectiva carga máxima, área, esfuerzos y la máquina en la que se realizó el ensayo.

Tabla XII. **Resultados obtenidos con el ensayo de tensión**

Núm. de ensayo	Equipo utilizado	Núm. de muestra	Carga (Kg)	Área (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
1	Máquina electrónica	3	20	3,14	6,37	0,62
2	Máquina electrónica	4	20	3,14	6,37	0,62
3	Máquina electrónica	6	25	4,91	5,09	0,50
4	Máquina electrónica	1	<15	4,15	Sin lectura de carga	Sin lectura de carga
5	Máquina universal	7	17	2,01	8,46	0,83
6	Máquina universal	10	34	2,27	14,98	1,47
7	Máquina universal	11	18	3,14	5,73	0,56
8	Máquina universal	9	17	2,54	6,69	0,66
9	Máquina universal	8	21	2,27	9,25	0,91
10	Máquina universal	5	30	2,27	13,22	1,30
11	Máquina universal	2	32	2,27	14,1	1,38

WELLMANN CASTELLANOS, Heike. *Análisis para la reducción de riesgos utilizando el pasto vetiver en el talud ubicado en el parque ecológico Las Ardillas*. p. 116.

Carlos Pérez y Jorge Lizcano (2012) en su trabajo de graduación: Uso del pasto vetiver como una propuesta de bioingeniería en la estabilización de taludes, realizado en la Universidad Industrial de Santander, en Colombia, exponen que el valor de esfuerzo de tensión de raíces del pasto vetiver varía entre 40 a 120 MPa (ver tabla X).

Aunque es una visión general del comportamiento mecánico de las raíces, no se especifican en el documento las condiciones ni las características de las probetas o el equipo utilizado para realizar los ensayos.

Como se puede observar con base en los resultados de esfuerzo a tensión máximo soportado por las raíces del pasto, no existe una relación directamente proporcional entre el esfuerzo y el área de la probeta, sino que dicho esfuerzo está más ligado a la uniformidad y densidad que tenía el sistema radicular trenzado en las probetas.

El esfuerzo de tensión máximo obtenido fue de 14,98 kg/cm², el cual corresponde a la muestra número 10; esta tenía un área transversal de 2,27 cm² en su parte más gruesa y estaba conformada por la unión de los sistemas radiculares de 2 plantas. El esfuerzo de tensión mínimo obtenido fue de 5,09 kg/cm², que corresponde a la muestra número 6; la misma tenía un área transversal de 4,91 cm² en su parte más gruesa y estaba conformada por la unión de los sistemas radiculares de 4 plantas.

Por lo tanto, se deduce que el esfuerzo de tensión que pueden soportar las raíces del pasto vetiver, utilizando una metodología similar a la empleada en este ensayo, depende de la densidad de cada uno de los sistemas radiculares de las plantas utilizadas para la realización de la probeta y de su uniformidad a lo largo de toda su longitud efectiva, no así del número de plantas que se seleccionaron para formar la muestra.

Al mismo tiempo los resultados están influenciados por el tipo de máquina utilizada y la carga mínima que registra, ya que la que se empleó en este trabajo no registraba lecturas menores a 15 kg, a diferencia de la máquina universal.

Tabla XIII. Comparación usando máquina electrónica

Núm. de ensayo	Equipo utilizado	Núm. de muestra	Carga (Kg)	Área (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
1	Máquina electrónica	3	20	3,14	6,37	0,62
2	Máquina electrónica	4	20	3,14	6,37	0,62
3	Máquina electrónica	6	25	4,91	5,09	0,50
4	Máquina electrónica	1	<15	4,15	Sin lectura de carga	Sin lectura de carga
Promedio de carga (kg)					21,67	
Promedio de área (cm²)					3,84	
Promedio de esfuerzo					5,94	0,58
Desviación típica					0,74	0,07
Coefficiente de variación (%)					12,43	12,43

WELLMANN CASTELLANOS, Heike. *Análisis para la reducción de riesgos utilizando el pasto vetiver en el talud ubicado en el parque ecológico las ardillas*. p. 120.

En el anterior cuadro puede verse que utilizando la máquina electrónica se obtiene un coeficiente de variación entre resultados igual a 12,43 %.

Al utilizar la máquina universal se obtiene un coeficiente de variación de 36 % entre los resultados, como se ve en la siguiente tabla.

Tabla XIV. **Comparación usando máquina universal**

Núm. de ensayo	Equipo utilizado	Núm. de muestra	Carga (Kg)	Área (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (mPa)
5	Máquina universal	7	17	2,01	8,46	0,83
6	Máquina universal	10	34	2,27	14,98	1,47
7	Máquina universal	11	18	3,14	5,73	0,56
8	Máquina universal	9	17	2,54	6,69	0,66
9	Máquina universal	8	21	2,27	9,25	0,91
10	Máquina universal	5	30	2,27	13,22	1,30
11	Máquina universal	2	32	2,27	14,1	1,38
Promedio de carga (kg)					24,14	
Promedio de área (cm²)					2,40	
Promedio de esfuerzo					10,35	1,01
Desviación típica					3,73	0,37
Coefficiente de variación (%)					36,00	36,00

WELLMANN CASTELLANOS, Heike. *Análisis para la reducción de riesgos utilizando el pasto vetiver en el talud ubicado en el parque ecológico las ardillas.* p. 120.

3.9. **Diseño de la siembra en talud utilizando el pasto vetiver**

Para el apropiado diseño de la siembra en un talud se deben considerar los aspectos que a continuación se describen.

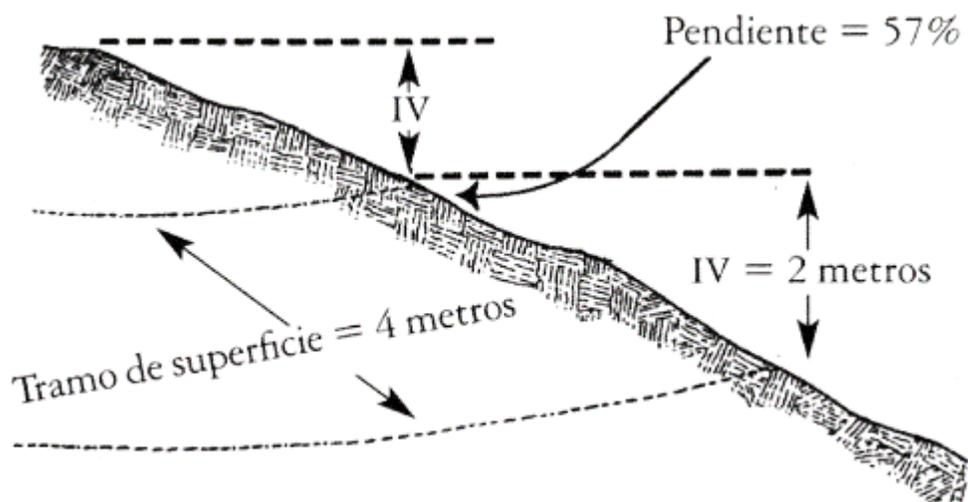
3.9.1. Calidad del material para la plantación

El pasto vetiver crece tanto en suelos áridos como húmedos, ya que es una especie xerófila e hidrófila.

3.9.2. Distancias de siembra

Para que un sistema ofrezca la máxima protección, los cercos de vetiver deben estar espaciados con un intervalo vertical adecuado. La distancia proyectada sobre el terreno o tramo de superficie es medida entre los cercos y depende de la inclinación de la pendiente; en la siguiente figura el intervalo vertical se representa como IV.

Figura 30. Distanciamientos de cercos de vetiver



Fuente: ALEGRE, Julio. *Manual sobre el uso y manejo del pasto vetiver*. p. 25.

El diseñador de la siembra debe tener en cuenta algunas variables: cohesión del suelo, ángulo de fricción, cargas propias del talud, cargas externas y niveles freáticos; también, conceptos de Biología y Agrología para determinar las distancias de espaciamiento vertical y horizontal que permitan garantizar la estabilidad del talud.

En la siguiente tabla se pueden ver las relaciones entre la pendiente, el tramo de superficie y el intervalo vertical, comúnmente utilizadas al momento de diseñar los cercos de protección de taludes; estas proporcionan una idea general para el diseño; en casos especiales se recomienda que se haga un diseño específico, coadyuvándose con personas que tengan conocimientos de agronomía.

Tabla XV. **Distancias de siembra**

Pendiente		Gradiente	Tramo de superficie (m)
Grado	%		
1	1,7	1 en 57,3	57,3
2	3,5	1 en 28,6	28,6
3	5,3	1 en 19,5	19,5
4	7,0	1 en 14,3	14,3
5	8,8	1 en 11,4	11,4
10	17,6	1 en 5,7	5,8
15	27,0	1 en 3,7	4,0
20	36,4	1 en 2,8	3,0
25	46,1	1 en 2,1	2,4
30	57,7	1 en 1,7	2,0
35	70,0	1 en 1,4	1,6
40	84,0	1 en 1,2	1,4
45	100,0	1 en 1,0	1,4

Fuente: ALEGRE, Julio. *Manual sobre el uso y manejo del pasto vetiver*. p. 26.

3.9.3. Preparación del terreno

La cantidad y calidad de materia orgánica incide sobre los diversos procesos bioquímicos y químicos en el sistema edáfico y representa la base de la fertilidad de los suelos. Regularmente, los taludes presentan condiciones inadecuadas para el desarrollo de vegetación; estas son producto de la pobreza edáfica y la compactación de sus materiales.

Para establecer la vegetación es necesario corregir las deficiencias mencionadas, creando buenas condiciones topográficas, de drenaje y calidad del sustrato. Existen 2 tipos de medidas para la preparación del terreno en taludes:

- Remodelado y control de drenaje: comúnmente la cabecera, pie y bordes laterales del talud presentan perfiles de alta pendiente, lo que ofrece condiciones adversas a la revegetación y mayor exposición de la estructura a los efectos de la erosión provocada por la escorrentía superficial. Por esta razón, los perfiles deben ser redondeados, facilitando de esta forma el enraizamiento de la vegetación y disminuir o eliminar los efectos de la erosión.
- Mejoras edáficas: comúnmente los taludes no presentan buenas condiciones físicas, químicas ni biológicas para el establecimiento de vegetación. Los problemas frecuentes están relacionados con la ausencia de materias orgánicas y nutrientes.

Existen diversas técnicas destinadas a mejorar las características del sustrato, como las enmiendas orgánicas, que son realizadas para incrementar los niveles de fertilidad del sustrato y mejorar las propiedades físicas.

El uso de las enmiendas orgánicas se hace aplicando estiércol u otros abonos orgánicos resultantes del compostaje de residuos sólidos urbanos o lodos de plantas de tratamiento de aguas, que proporcionan mejores rendimientos y que resultan más baratos.

3.9.4. Preparación mecánica del sustrato

Esta fase forma parte de la preparación del terreno para la siembra; la preparación mecánica del suelo implica el uso de maquinaria con el propósito fundamental de descompactar los suelos, lo que proporciona los efectos de reducción del volumen de escorrentía por efecto de la creación de caminos de drenaje, incremento de la velocidad de infiltración y el aumento de la capacidad de almacenamiento de agua, por ende, de la profundidad potencial de enraizamiento debido a la reducción de la densidad del suelo.

Para el caso del vetiver, los taludes pueden manejar ciertas irregularidades, ya que la siembra se realiza siguiendo curvas de nivel y con intervalos verticales.

A menudo es difícil cortar la ladera hasta dejar una superficie pareja y recta. Muchos taludes que deben considerarse para la bioingeniería serán los que han presentado fallas después del corte original; sin embargo, es importante asegurarse de que se ha retirado todo el material suelto y que su base está protegida de socavaciones.

3.9.5. Plantación de esquejes

La siembra de esquejes, en bolsa o raíz desnuda, es la más utilizada para la estabilización de taludes. Para la siembra de esquejes de vetiver se debe preparar el material días previos y se utiliza la técnica de siembra en hoyo.

3.9.6. Preparación de esquejes

Tres días antes de llevarlo al campo, se reduce la aplicación de agua y se cortan las hojas a los 30 centímetros para reducir la transpiración y estimular la rápida emergencia de raíces y hojas.

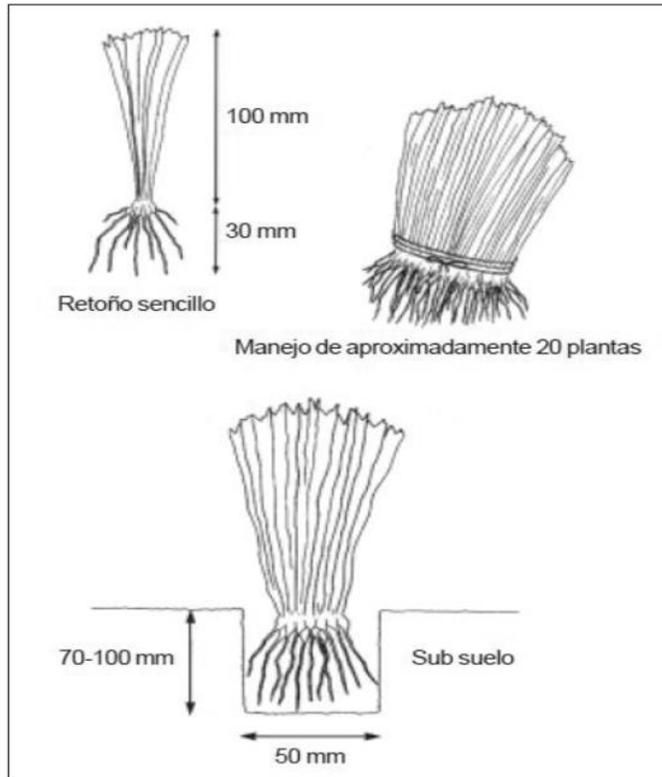
Antes de llevar al campo, se recomienda poner en remojo los esquejes; en el caso de esquejes a raíz desnuda, con el propósito de inducir nuevas raicillas, se empacan en manojos apretados. Es importante no dejar los retoños expuestos a la luz del sol pues pueden secarse. Es recomendable efectuar análisis químicos del suelo cuando se plante el vetiver en lugares nuevos, para determinar los requerimientos de fertilización o enmienda del suelo antes de sembrarlo.

3.9.7. Siembra

La siembra en hoyo es una técnica de siembra manual en que las plántulas son introducidas en un hoyo previamente dispuesto para este efecto. Los hoyos se construyen de 5 a 10 centímetros de diámetro y 7 a 10 centímetros de profundidad; en ese agujero se colocan los esquejes a unos 5 centímetros de profundidad, tratando de que las raíces estén rectas y sin doblarse; se le tapa y afirma con la tierra mediante presión con los dedos.

El hoyado y siembra se realiza desde la parte superior del talud, siguiendo pendiente abajo.

Figura 31. Especificaciones para la siembra



Fuente: PEREZ, Carlos; LIZCANO y Jorge. *Uso del pasto vetiver como una propuesta de bioingeniería en la estabilización de taludes*. p. 57.

3.9.8. Cuidados posteriores a la plantación

Se debe realizar una serie de cuidados posteriores a la plantación del pasto vetiver para que pueda automantenerse.

- Riego: las especies vegetales deben ser plantadas durante la época de lluvia. En todos los casos se requiere riego por lo menos durante el primer mes, con el objeto de garantizar el enraizamiento de las especies vegetales.

- Fertilización: en el caso del pasto vetiver no es imprescindible, teniendo en cuenta que se adapta a diferentes condiciones de suelo, pero es aconsejable. Se puede emplear cualquier tipo de abono o fertilizante, natural o químico. El empleo de abonos incrementa el desarrollo y velocidad de crecimiento en barreras recién establecidas.
- Resiembra: en caso de que se presente mortalidad o el prendimiento no sea homogéneo, se debe proceder a la resiembra de las superficies con nuevos esquejes.
- Aclareo y eliminación de malezas: una vez logrado el arraigo de las barreras de vegetación y que la densidad de las plántulas sea mayor que la deseada para cubrir los objetivos de estabilización o protección, será apropiado efectuar labores de aclareo con el objeto de obtener la densidad adecuada. Una o dos veces durante la estación de crecimiento en el primer año es necesario eliminar manualmente la vegetación que crece en forma silvestre en las proximidades del sistema radicular del pasto vetiver, para eliminar la competencia por los nutrientes y humedad.
- Siegas o podas de hojas: la principal característica del vetiver es su sistema radicular profundo y abundante. Se recomienda realizar siegas o podas de las hojas, con el propósito de inducir mayor enraizamiento. Estas podas se pueden hacer cada 6 meses.
- Limitaciones: la principal limitación del vetiver es la sombra; la tolera muy poco. En condiciones de sombra crece más despacio, se establece con dificultad y es más sensible a factores adversos.

4. BIOINGENIERÍA EN OBRAS DE MITIGACIÓN DE TIPO ESTRUCTURAL EN GUATEMALA

4.1. Antecedentes

La aplicación de la bioingeniería en Guatemala aún es un tema que constituye frecuentemente la búsqueda y experimentación para la creación de diseños adaptables a sus contextos; así como la reinterpretación de métodos tradicionales que resulten convenientes de manera funcional, económica, ambiental y con una buena aceptación social.

4.2. Análisis de bordas

A continuación, se presenta la experiencia, descripción y análisis de los casos observados en la costa sur.

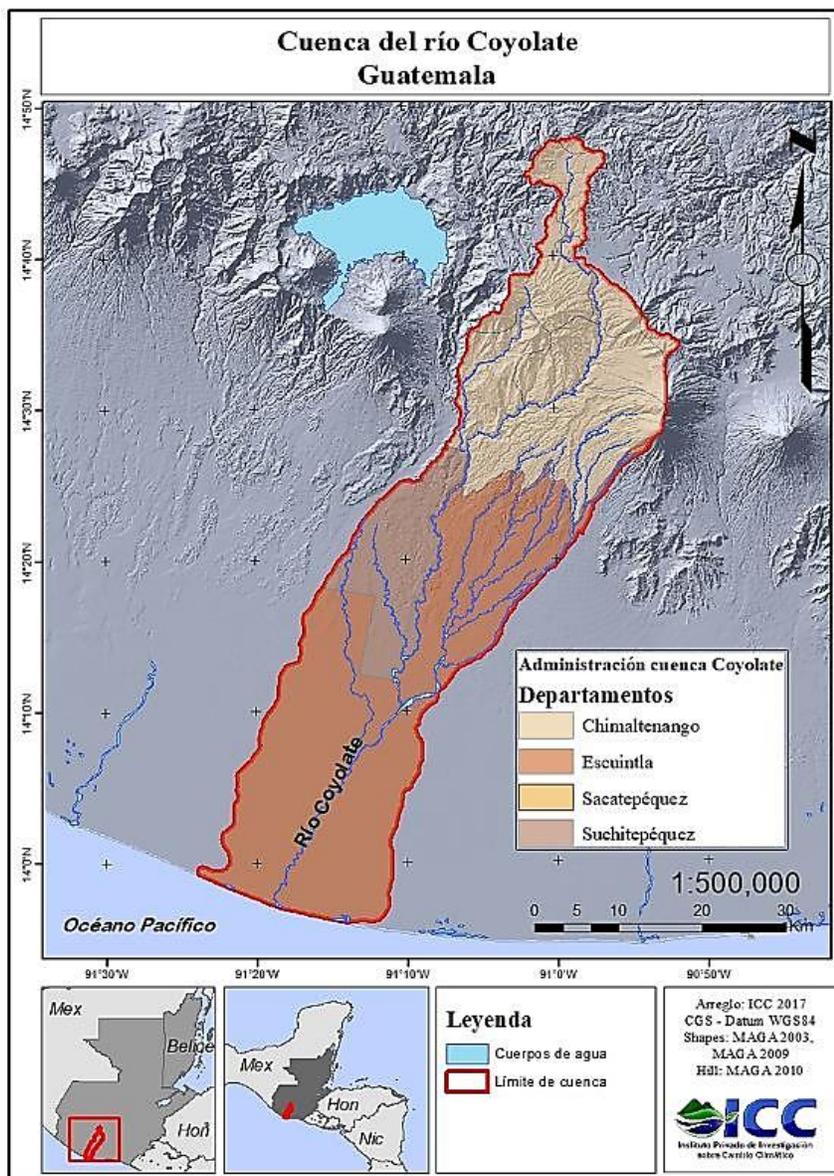
4.2.1. Santa Odilia, río Coyolate

El área de la cuenca del río Coyolate es de las más caudalosas del sur de Guatemala, en la cuenca alta recibe el nombre de río La Vega; más adelante se le conoce como río Xayá, y cercano a la latitud 14° 25' 00" se llama río Coyolate. Tiene dos afluentes más de los ríos Cristóbal y Pantaleón. Desemboca en el Océano Pacífico y su recorrido es de 141,9 kilómetros.

La cuenca se encuentra localizada en el centro geográfico de la vertiente del Pacífico, entre los paralelos 13° 55' y 14° 49' de latitud norte y los meridianos 90° 51' y 91° 22', de longitud oeste.

Colinda al norte con la cuenca del río Motagua, al noreste con la cuenca del río Achiguate, al sureste con la cuenca del río Acomé, al oeste con la cuenca del río Madre Vieja y al sur con el Océano Pacífico.

Figura 32. Cuenca del río Coyolate



Fuente: Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.

La mayoría de las bordas de la cuenca baja del río Coyolate, específicamente en la comunidad de Santa Odilia, presentan largos tramos en donde hay ausencia de vegetación (bordas solo levantadas de arena) y la poca vegetación existente está constituida por especies herbáceas y arbustivas de porte pequeño, que normalmente se dañan por el pastoreo con el paso de ganado, crecimiento de la frontera agrícola, azolvamiento de arena del volcán de Fuego (cuenca alta) y altas precipitaciones que ponen al descubierto las riberas del río, provocando erosiones que presentan diferentes niveles de transformación y por consiguiente fuertes daños en las secciones frágiles de las bordas establecidas.

Algunos puntos críticos de la ribera del río Coyolate han sido sujetos a intervenciones de obra civil donde aparentemente ninguna de las obras de infraestructura ha logrado detener el proceso erosivo; en el mejor de los casos han disminuido la velocidad del cauce del río desplazando en espacio y en tiempo el problema. Debido a la vulnerabilidad de la zona ACH (Acción Contra el Hambre) se realizó el diagnóstico y se seleccionó como alternativa el área de la aldea Santa Odilia para implementar la borda con bioingeniería, siendo esta la primera de su tipo para el plan DIPECHO VI.

Esta se construyó en un meandro muy complicado, teniendo en agua arriba una borda tradicional de arena sin protección adicional de una finca productora de palma y corriente abajo una borda tradicional con refuerzo de jumbos.

Figura 33. **Área seleccionada para la implementación de la parcela demostrativa en el plan DIPECHO VI, en la comunidad de Santa Odilia**



Fuente: Acción Contra el Hambre. *Obras de mitigación con aplicación de técnicas de ingeniería naturalística en la protección de bordas del río Coyolate Nueva Concepción - Escuintla, Guatemala.* p. 7.

La borda fue realizada en dos fases: la primera de ellas de aproximadamente 500 metros, está ubicada directamente en un meandro del río; esta sección se encuentra consolidada y las variedades de vegetación en la borda son Camalote, Pumpo y Sauce. La segunda fase de aproximadamente 500 metros muestra erosión, a diferencia de la primera no hubo un grado de sobrevivencia ideal de la vegetación en esta sección, debido a que los pobladores llevaron el ganado a pastorear a esta área, en tiempo de verano.

Figura 34. **Ubicación del proyecto en las coordenadas 14° 02' 05.9" N,
91° 16' 35.7" W**

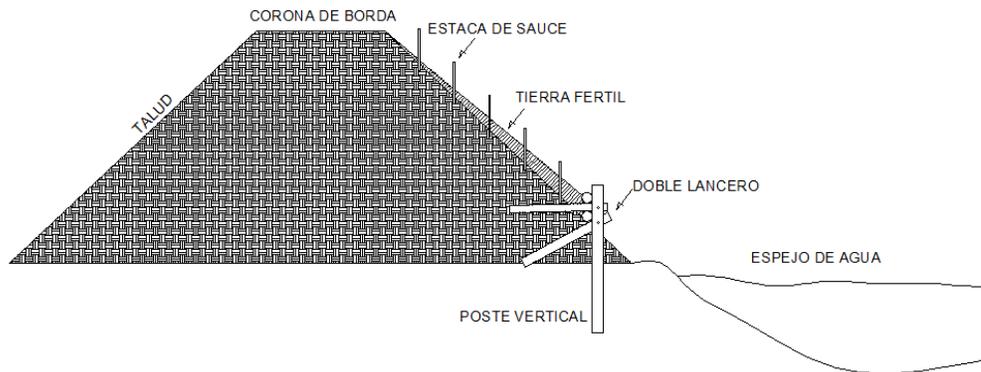


Fuente: elaboración propia, empleando Google Earth.

El diseño propuesto fue el denominado recubrimiento total; este es utilizado comúnmente en donde las riberas de los ríos están sujetas a fuertes erosiones, crecidas y desbordamientos de los ríos.

Debido a la facilidad de ejecución y a la utilización de especies y materiales vivos, sin elementos artificiales, cumple con las características que favorecen a las necesidades de estas comunidades. En la figura 32 se muestra el tipo de estructura de la borda utilizada.

Figura 35. **Borda de bioingeniería con doble lancero, cubierta de tierra negra y estacas de sauce**



Fuente: Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.

4.2.1.1. **Fases que se utilizaron en la construcción**

- Fase 1. Limpieza, remoción de piedras, reperfilado de bordas y preparación del área para implementar el diseño de entramado total.
- Fase 2. Construcción de la estructura de postes de especies de la zona como el sauce, pumpo melina o matiliguete en la base de la borda, colocándolos de manera vertical y oblicua. Posteriormente se procede a la colocación horizontal de postes con medidas de 2, 3 y 5 metros de largo y un diámetro aproximado de 20 centímetros que serán clavados entre sí.
- Fase 3: se fijan los postes y estacas en la base de la borda y al sustrato de tierra que se aplica a través de amarre a los postes verticales vivos con pines de hierro y alambre galvanizado. Este es el único material inerte que se utiliza en este tipo de obras.

Figura 36. **Perfil de la colocación de los postes en la base de las bordas**



Fuente: ACH. *Obras de mitigación con aplicación de técnicas de ingeniería naturalística en la protección de bordas del río Coyolate Nueva Concepción - Escuintla, Guatemala.* p. 12.

- Fase 4: colocación vertical a lo largo de la borda en hileras paralelas y sobrepuestas de estacas vivas de especies vegetales de 1,5 metros de largo y un diámetro aproximado de 5 a 7 centímetros, con capacidad de reproducirse vegetativamente.
- Fase 5: colocación de estacas vivas con medidas de 5 metros de largo y diámetro de 5 a 7 centímetros de diferentes especies con capacidad de reproducirse vegetativamente, pegadas una a la otra y perpendicularmente a la base de la ribera del río. Estas estacas forman una estructura natural de recubrimiento al perfil frontal de la borda, estabilizándola al pasar el tiempo.

Figura 37. **Colocación de estacas vivas con medidas de 5 metros**



Fuente: ACH. *Obras de mitigación con aplicación de técnicas de ingeniería naturalística en la protección de bordas del río Coyolate Nueva Concepción - Escuintla, Guatemala.* p. 14.

- Fase 6: colocación de material vegetativo para la estabilización del perfil frontal de la borda para alcanzar el rebrote de la vegetación necesaria. Se siembran estacas de especies regenerativas como el Napier, Zacatón, Pangola, entre otros.
- Fase 7: aplicación de un sustrato de tierra fértil encima de las estacas sembradas vertical y perpendicularmente en toda la borda protegida. Esto se realiza cuando el material es demasiado arenoso y constituye el acabado de la estructura de la base y perfil frontal de la borda.

Figura 38. **Siembra de estacas o esquejes de especies pastizales con capacidad de rebrote para fines de estabilización del primer sustrato de suelo de la borda**



Fuente: ACH. *Obras de mitigación con aplicación de técnicas de ingeniería naturalística en la protección de bordas del río Coyolate Nueva Concepción - Escuintla, Guatemala.* p. 15.

- Fase 8: al lado y al pie de la borda se construyen gaviones de costales en una hilera, con el objetivo de desviar el cauce del río hacia el centro de este, lo cual permite reducir la velocidad de las crecidas medias. El otro fin de los gaviones es obtener una mejor consolidación y limitar eventual acumulación de agua. Esta estructura de gaviones se realiza en áreas de curvas pronunciadas de los ríos. El tamaño y distancia entre cada gavión depende de la dinámica del río, y el número a colocar dependerá del diseño y tamaño de la obra.

Figura 39. **Recuperación de la biodiversidad y consolidación de la borda, meses después de terminada la obra**



Fuente: Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.

- Fase 9: mantenimiento de las obras en el manejo del material vegetativo que rebrota y se reproduce en la borda para estabilizarla y establecer su sostenibilidad.

Los brotes vegetativos deben tener una altura promedio de 3 metros para no tener una masa forestal pesada y menos resistente a las crecidas. Se debe promover la reforestación paralela a la borda con un ancho mínimo de 20 metros, utilizando especies de árboles de la zona, lo cual permitirá la recuperación del ecosistema en la ribera del río.

Figura 40. **Consolidación de la borda años después de terminada la obra**



Fuente: Santa Odilia, río Coyolate. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.

4.2.1.2. Evaluación de borda en Santa Odilia

La borda está en muy buenas condiciones, hay presencia de abundante vegetación a lo largo, en ambos sentidos; los sauces han alcanzado gran altura, el camalote y el pumpo se han propagado haciendo un área muy tupida de esta cobertura natural. La borda ha soportado la fuerza de la corriente; prueba de sus características mecánicas es que, desde su construcción en el 2010 hasta la fecha, no se ha debilitado y ni cedido frente a los inviernos copiosos que se han presentado.

4.2.2. Comunidad Los Naranjos, río Paz

La cuenca del río Paz tiene un área total de 2,647 km², distribuida en 925 km², que corresponde a un 34 % perteneciente a El Salvador y 1,722 km² (66 %) que pertenece a Guatemala. La cuenca del río Paz está situada en tres diferentes posiciones fisiográficas, donde la parte alta presenta el mayor potencial erosivo, mientras que en la parte media la susceptibilidad a la erosión es moderada.

Todo el material de las partes altas que se erosiona, se deposita en las zonas bajas de la cuenca, obstruyendo los cursos de los ríos. Este fenómeno ocasiona no solo la pérdida de suelo en las partes altas, sino también la de nutrientes; la baja retención de agua debido a la pérdida de los niveles de infiltración y el aumento de la escorrentía superficial, reduce significativamente el rendimiento agrícola e incrementa los costos de producción, al necesitar mayores niveles de fertilización para mantener la productividad.

La cuenca presenta dos estaciones bien definidas: la estación lluviosa de mayo a octubre, en la que cae el 94 % de la lluvia anual, y la estación seca, de noviembre a abril, en que cae el 6 % de la precipitación anual.

La elevada precipitación durante la estación lluviosa implica una fuerte problemática de erosión de los suelos e inundaciones. Por otra parte, la despreciable precipitación de la estación seca implica severos problemas de sequía. El sector de Guatemala es más seco, con una lámina de precipitación media anual de 1 400 mm. ²⁶

Figura 41. Perfil de la colocación de los postes en la base de la borda sobre el río Paz



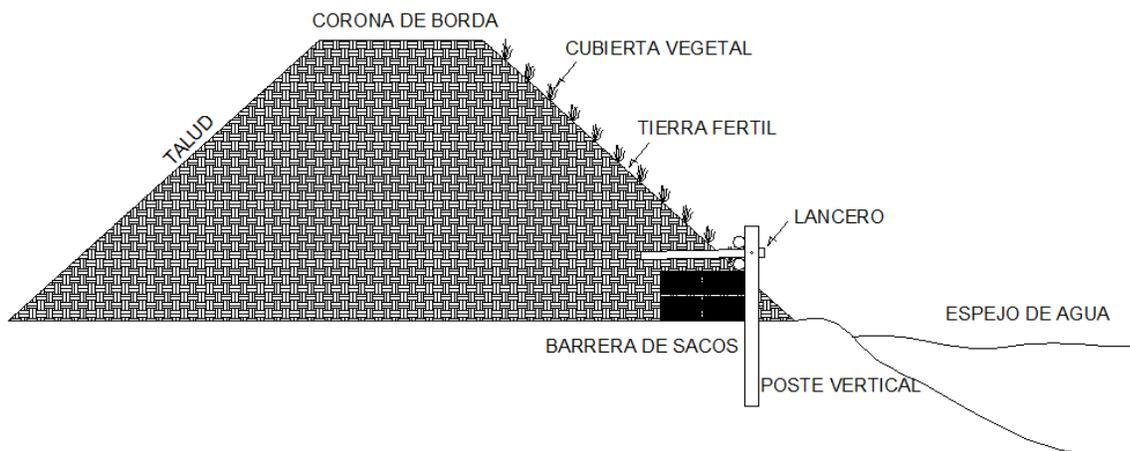
Fuente: Comunidad Los Naranjos, río Paz. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.

²⁶ Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. *Investigación preliminar de cuatro cuencas compartidas para su inclusión en el programa regional de medio ambiente de Danida*. p. 13.

El río Paz presenta inundaciones en el sector final de la cuenca, a lo largo de 8 km. Se estima que los daños anuales representan del 22 al 75 % de los ingresos netos y del 10 al 39 % del valor bruto de la producción agrícola, dependiendo de la magnitud de la inundación.²⁷

Con el conocimiento observado en campo y en respuesta a la problemática, se efectuó una réplica del modelo realizado en Santa Odilia, con la estructura de la figura 42. La cual se realizó en la cuenca alta del río Paz en la comunidad de Los Naranjos, donde se efectuó un diseño de entramado total, con utilización de materiales vegetativos de reproducción asexual; esta fue semidestruida para luego ser mejorada.

Figura 42. **Borda de bioingeniería con un solo lancero, refuerzo del posteo vertical con sacos llenos de arena**



Fuente: Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.

²⁷ Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. *Investigación preliminar de cuatro cuencas compartidas para su inclusión en el programa regional de medio ambiente de Danida*. p. 16.

Figura 43. **Posteado y colocación de la barrera de protección con sacos de la borda sobre el río Paz**



Fuente: Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.

4.2.2.1. Evaluación de borda sobre río Paz

La borda está en muy buenas condiciones, como se puede observar en la figura 43. El posteado y la barrera aún permanecen en buenas condiciones y la vegetación es abundante a lo largo de la borda. Esta ha soportado la fuerza de la corriente, no se ha debilitado y no ha cedido frente a los inviernos copiosos que se han presentado.

Figura 44. **Consolidación de la borda años después de terminada la obra sobre río Paz**



Fuente: Comunidad Los Naranjos, río Paz. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.

4.2.3. Las Pozas, río Los Esclavos

El río Los Esclavos se ubica en la vertiente del Pacífico, en el suroeste de Guatemala. A diferencia de otras cuencas de esta región, la cuenca de Los Esclavos no recibe el aporte de sedimento directo al no existir volcanes activos dentro de la cuenca. En la parte alta de la cuenca se originan numerosos afluentes: Las Cañas, Los Achiotos, San Antonio y Los Vados, entre otros.

Todas estas corrientes se unen al cauce principal del río Los Esclavos, que recibe un importante aporte de otro afluente, Las Margaritas, en el tramo final. El cauce principal tiene una longitud de 135,6 kilómetros, salvando un desnivel de 2 238 metros. La cuenca hidrológica abarca una extensión de 2 019 kilómetros cuadrados, formando parte de los departamentos de Santa Rosa, Guatemala, Jalapa y Jutiapa.

Debido a la magnitud de los episodios de inundación, los ríos de Guatemala, especialmente en la vertiente sur, han experimentado una serie de cambios tanto en su morfología como en el comportamiento hidráulico.²⁸ En el río Los Esclavos estos cambios se han producido como resultado de variaciones en los patrones climáticos, erosión de los suelos, falta de una cobertura vegetal apropiada y modificaciones en el lecho del río.²⁹

La organización Acción Contra el Hambre (ACH) a través del proyecto “Reducción de la vulnerabilidad de las poblaciones que viven en zonas propensas a inundaciones de la cuenca Los Esclavos y María Linda, Guatemala a través de la preparación, mitigación y respuesta”, hizo la propuesta para ejecutar una borda de bioingeniería para la comunidad de Las Pozas, Chiquimulilla, ya que esta es una de las áreas más afectadas por el desbordamiento del río Los Esclavos en la parte baja de la cuenca.

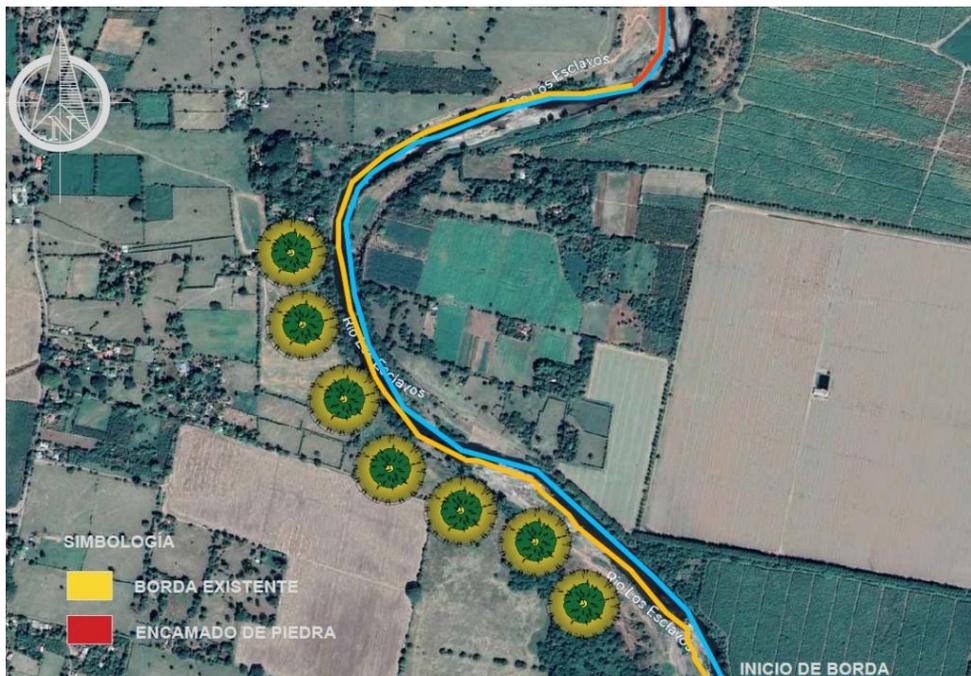
La obra se realizó de septiembre a noviembre del 2013, en la parte baja de la cuenca en la ubicación que muestra la figura 42. Esta se realizó en dos fases, una de 1200 metros y la segunda de 340 metros.

²⁸ Dirección General de Caminos. Ministerio de Comunicaciones, infraestructura y vivienda. *Estudio de la cuenca del Coyolate. Unidad de Manejo de Ríos y Canales*. Guatemala. p. 5.

²⁹ Dirección General de Caminos. Ministerio de Comunicaciones, infraestructura y vivienda. *Estudio y diseño de las obras para mitigar el impacto del río Achiguate sobre la infraestructura vial de la ruta CA-02 occidente (puente Achiguate), ruta RD-38-ESC (puente La Barrita), CA-09-SUR y poblaciones aledañas al cauce*. Unidad de manejo de ríos y canales. Guatemala. p. 100.

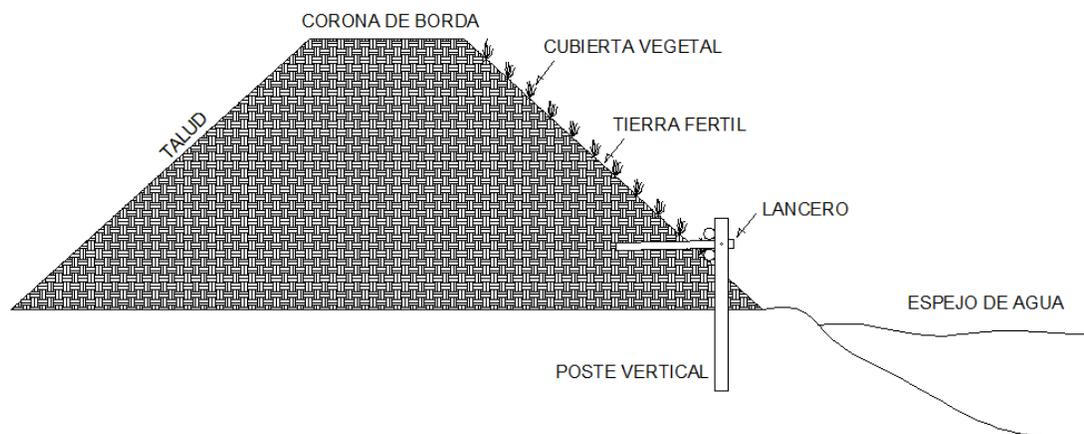
La borda se hizo con un solo lancero, cubierto de tierra negra y vetiver, como se muestra en la figura 43. El programa de Gestión de Riesgo ICC se encargó de tramitar el apoyo del vetiver con Ingenio Magdalena, y a través del vivero del programa MIC, ICC se apoyó con 215 pilones de sauce y 340 de matiliguete.

Figura 45. **Ubicación del proyecto en las coordenadas 13° 54'1 5.52" N, 90° 16' 24.49" O**



Fuente: elaboración propia, empleando el programa de AutoCAD.

Figura 46. **Borda de bioingeniería con un solo lancero, cubierta de tierra negra y vetiver o camalote**



Fuente: Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.

4.2.4. Evaluación de la borda sobre el río Los Esclavos

La borda está en muy buenas condiciones, hay presencia de abundante vegetación a lo largo de ella; los sauces han alcanzado gran altura y el matilisguate se ha propagado haciendo un área muy tupida de esta cobertura natural.

La borda ha soportado la fuerza de la corriente, prueba de sus características mecánicas es que, desde su construcción hasta la fecha, no se ha debilitado y ni cedido frente a los inviernos copiosos que se han presentado.

Figura 47. **Consolidación de la borda años después de terminada la obra sobre el río Los Esclavos**



Fuente: Comunidad Las Pozas, río Los Esclavos. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.

4.3. Comparación de la bioingeniería con los métodos tradicionales

Con la experiencia realizada se plantean a continuación las ventajas y desventajas del método para comparar con los métodos tradicionales.

4.3.1. Ventajas

- Obras con costos reducidos en comparación con las obras tradicionales en la zona de intervención, como levantamiento de bordas con arena sin ninguna protección, enrocados y colocación de gaviones de piedra, entre otros.
- Uso relevante de mano de obra local, que constituye un punto principal de gasto con los importantes beneficios económicos para la población interesada.
- Preferentemente utilización de materiales de origen natural que se consiguen a nivel local, con lo cual se reducen los costos, dan impulso a la economía local, aseguran una inserción paisajística perfecta, la recuperación de la biodiversidad y protección de riberas de los ríos.
- Participación de profesionales de distintas especializaciones (equipo multidisciplinario).
- Genera una acción estabilizadora y dinámica que aumenta al pasar del tiempo por el crecimiento vegetativo de las plantas, caso contrario a lo que sucede en las obras tradicionales que ven bajar su eficacia con el transcurso de los años.

- Efectos más prolongados en resistencia de crecidas, debido a la proliferación de especies vegetales y crecimiento de raíces para hacer más resistentes y estables las bordas.
- Se utilizan especies de la zona (sauce: *Salix sp*, pumpo: *Tachira acuática*, melina: *Gmelina arbórea*, pastos de diferentes especies y variedades, coco: *Cocos nucífera*, vetiver: *Vetiveria zizanioides*, eucalipto: *Eucalyptus sp*, entre otros).
- Existen diseños adaptables al contexto y con factibilidad de experimentar otros.
- Disponibilidad de recursos biogénéticos.
- Diseños de fácil aplicación, lo que permite la réplica de la experiencia.
- Amigable con el medio ambiente.

4.3.2. Desventajas

- Necesidad de un mantenimiento regular y podas de las plantas que hayan crecido demasiado.
- Límite del espesor de suelo que es posible consolidar debido a la profundidad alcanzable por las raíces de las plantas.
- Los resultados a veces no son inmediatos y para este caso, en situaciones donde las amenazas son permanentes, hay que evaluar con mucho cuidado la factibilidad de estas obras.

- Proceso a mediano plazo (6 meses). Es decir, si en los primeros meses de implementación de las obras hay crecidas fuertes, estas no soportarían por la poca estabilización adquirida de la obra.
- Degradación de la borda por actividad humana o pastoreo de ganado.

Tabla XVI. **Ventajas y desventajas de los métodos tradicionales utilizados en Guatemala**

OBRA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Diques de arena	Fácil construcción.	Alta erosión eólica y pluvial, a causa de la precipitación. Esto a consecuencia de carecer de algún tipo de recubrimiento.
	Bajo costo comparado con otras técnicas.	Se tiene una alta socavación en la base, lo que provoca un fácil volteo del dique.
	No se invierte en traslado de materiales.	Es una solución a corto plazo.
	Se utiliza el material del lecho del río.	Es degradado por actividades humanas o de ganado.
	Se puede reducir el costo por utilización de maquinaria.	En un invierno se puede llegar a ejecutar el mismo dique como mínimo 2 veces, por no soportar las crecidas del río, convirtiéndose en doble inversión.
	Dependiendo de las características del río y los trabajos que se realicen con espigones y recubrimiento puede llegar a ser un adecuado sistema.	
Espigones	Facilidad de construcción	Debido a que constituye elementos extraños dentro de la corriente, causa diversas formas de erosión y sedimentación
	Bajo costo	La socavación que se produce en los alrededores de la punta de cada espigón como consecuencia de los vórtices y corrientes secundarias.
	Facilidad de reparación	En algunos casos tiene como desventaja la disminución del área hidráulica del cauce.
	Posibilidad de usar diversidad de materiales	Aumentan la rugosidad de la orilla.
	Posibilidad de introducir mejoras	No se puede utilizar en curvas donde el radio es muy reducido.
	Uso de la experiencia y la mano de obra locales	Mantenimiento continuo
	Construcción por etapas	
	No se necesita mano de obra calificada	

Continuación de la tabla XVI.

<p>Diques de arena y cajas gavión</p>	<p>Elevada resistencia a la compresión y elevada tensión de tracción. Permite el crecimiento de vegetación. Soporta niveles de carga elevados de la corriente del río. Fácil adaptación al terreno. Permeabilidad adecuada; permite el drenaje de las aguas de infiltración, eliminando el empuje hidrostático. La puesta en obra es sencilla y el relleno puede ser colocado manualmente. Fácil diseño.</p>	<p>Costos elevados por el traslado de piedra. Tiempo de ejecución mayor en relación con otro tipo de diques. Dependiendo de las características del río, la velocidad y capacidad de arrastre de sedimentos de diferentes diámetros, los gaviones pueden sufrir rupturas, llegando a colapsar el sistema. Si no se trabaja una correcta cimentación se puede tener una alta socavación en su base, lo que provoca un fácil volteo del dique. Se incrementa el número de trabajadores y operadores de maquinaria y transporte. Deben ser inspeccionados periódicamente para asegurar su integridad. Deterioro con el tiempo, dependiendo del tipo de alambre. Poca flexibilidad.</p>
<p>Diques de arena y refuerzo de jumbos</p>	<p>Fácil construcción.</p>	<p>Costo elevado de construcción.</p>
	<p>Se reducen los tiempos de construcción.</p>	<p>Los sacos no son biodegradables por lo cual no son amigables con el ambiente.</p>
	<p>Dependiendo de las características del río y los trabajos que se realicen con espigones y recubrimiento puede llegar a ser un adecuado sistema.</p>	<p>En la mayoría de casos se realizan trabajos de refuerzo denominados "Parchado", dejando expuestas otras secciones de borda.</p>
	<p>Se puede construir durante una emergencia.</p>	<p>Se tiene una alta erosión en la base, lo que provoca una socavación y fácil volteo de los jumbos.</p>
	<p>Brinda un refuerzo adicional a la base de la borda.</p>	<p>Retrasos en tiempo y problemas relacionados con el elevado esfuerzo de material y mano de obra.</p>
	<p>Fácil refuerzo en puntos vulnerables.</p>	<p>Los jumbos sufren un rápido desgaste.</p>
<p>Enrocado</p>	<p>Construcción sencilla</p>	<p>Se debe contar con cierto diámetro de rocas.</p>
	<p>Corto tiempo</p>	<p>En algunos casos se necesita transportar material (piedra) al área.</p>
	<p>Económico</p>	
	<p>Flexible</p>	<p>Se necesita maquinaria pesada.</p>
	<p>Mantenimiento sencillo</p>	<p>Se requiere una adecuada distribución del tamaño de las rocas.</p>
	<p>Mayor eficiencia Material disponible en las cuentas Amigable con el ambiente.</p>	<p>Debe colocársele un filtro adecuado de grava o sintético para evitar la pérdida de finos.</p>

Continuación de la tabla XVI.

Diques con recubrimiento de geotextil y colchoneta gavión	Brinda mayor capacidad en todos los esfuerzos de compresión, tensión y torsión.	Costo elevado en su construcción.
	Dependiendo de las características del río y los trabajos que se realicen con espigones, es un adecuado sistema de protección.	Si el diámetro de la piedra y el ángulo del talud no son los adecuados, el mismo peso puede provocar un asentamiento del encamado; al estar todo unido llega hacer un elemento poco flexible, lo que puede provocar desestabilización del dique.
	Al utilizar los diámetros adecuados de rocas se ofrece un mayor grado de resistencia y permeabilidad en toda la estructura.	Se debe contar con cierto diámetro de rocas. Tiempo de ejecución mayor en relación con otro tipo de diques. En algunos casos se necesita transportar material (piedra) al área.
Diques con recubrimiento de geotextil y enrocado	Construcción sencilla. Corto tiempo de ejecución.	Se debe contar con cierto diámetro de rocas. En algunos casos se necesita transportar material (piedra) al área.
	Flexible	Se necesita maquinaria pesada
	Brinda mayor capacidad en todos los esfuerzos de compresión, tensión y torsión.	Se requiere una adecuada distribución del tamaño de las rocas.
	Resistencia a agentes químicos, físicos y orgánicos	Si el geotextil se expone prolongadamente al sol pueden verse afectado por estar compuesto de polipropileno.
	En caso de una falla en el geotextil puede ser reparada.	En áreas reducidas resulta muy costoso el uso del geotextil.
	Mayor grado de permeabilidad	Puede requerir de otras variedades de geosintéticos que le proporcionen mayor resistencia mecánica.
	Mantenimiento sencillo	Costo muy elevado en comparación con otros métodos.
	No requiere de mano especializada	
	No es biodegradable.	

Continuación de la tabla XVI.

Bioingeniería	Acción antierosiva	Para maximizar sus características mecánicas la borda debe de tener un tiempo de fortalecimiento y crecimiento de la vegetación.
	Acción estabilizadora "dinámica"	Escasez de materiales a utilizarse (troncos).
	Costos relativamente bajos en comparación con otras técnicas.	Se deben de realizar prácticas adecuadas de siembra para el fortalecimiento del suelo, y disminuir la creación de cárcavas.
	Permiten la creación de hábitat para la fauna	Degradación de la borda por actividad humana y/o pastoreo de ganado.
	Favorecen la depuración del agua	Necesitan un mantenimiento regular
	Aumentan la biodiversidad Conservan y mejoran el paisaje. Fácil construcción Bajo costo comparado con otras técnicas. Se utiliza el material local. Se puede reducir el costo por utilización de maquinaria. Fácil adaptación al terreno y disminuye el impacto ambiental. No requiere mano de obra calificada. Se adapta fácilmente con otros sistemas de protección como los espigones.	Los resultados a veces no son inmediatos

Fuente: elaboración propia, con base en el documento de *Diagnóstico sobre bordas en cuencas prioritarias* del programa de Gestión de Riesgo -ICC-.

4.4. Integración de costos de borda con bioingeniería

Se debe hacer por metros cúbicos, medidos como se indica en el numeral 701,11 (g) de las especificaciones 2019 de COVIAL. Si el volumen de protección de bordas es menor a 500 metros cúbicos y con topografía muy variable, podrá pagarse como trabajos por administración.

Para la integración de este renglón se tomarán en cuenta los siguientes criterios:

- La integración de este renglón se realizará por rendimiento según criterios de campo, por lo que se tomarán en cuenta 30 metros cúbicos por hora.
- Los costos por hora de pick up, excavadora y tractor oruga incluyen: IVA, operador, combustible y lubricantes, según especificaciones 2019 de COVIAL.
- La distancia del acarreo será no mayor de 10 kilómetros.

A continuación, se presentan las integraciones de los métodos de bioingeniería utilizados en las bordas de la costa sur, para ampliar el conocimiento de los renglones ejecutados y compararlos con los métodos tradicionales.

Tabla XVII. Integración de borda con bioingeniería utilizando vetiver

INTEGRACIÓN DE PRECIOS DE BIOINGENIERÍA					
Rendimiento por día máquina:		20 ml/día			
El costo de maquinaria, incluye combustible, lubricantes y operador					
MAQUINARIA Y EQUIPO					
	Descripción	Cantidad	Horas de trabajo	Costo unitario	Subtotal
1	Pick up	1	8	Q96,00	Q768,00
2	Excavadora 320	1	8	Q550,00	Q4 400,00
3	Tractor de banda	1	8	Q310,00	Q2 480,00
4	Camión	2	8	Q280,00	Q4 480,00
TOTAL					Q12 128,00
MANO DE OBRA					
	Descripción	Cantidad	Horas de trabajo	Costo unitario	Subtotal
5	Encargado/Agrónomo	1	8	Q33,33	Q266,67
6	Albañiles	1	8	Q25,00	Q200,00
7	Ayudantes	2	8	Q12,25	Q196,00
8	Limpiado manual orgánicos 300 ml	1	8	Q12,25	Q98,00
9	sembrado de esquejes 100 ml	1	8	Q12,25	Q98,00
10	mantenimiento	1	30	Q12,25	Q367,50
TOTAL					Q1 226,17
HERRAMIENTAS 10 % DE MANO DE OBRA					TOTAL Q122,62
MATERIALES					
	Descripción	Cantidad	Horas de trabajo	Costo unitario	Subtotal
11	Esquejes	ml	20,00	Q6,00	Q120,00
TOTAL					Q120,00
Total costo directo					Q1 468,78
Costo indirectos 25 %					Q367,20
Equipo					Q12 128,00
Total parcial					Q13 963,98
IVA					Q1 675,68
Total con IVA					Q15 639,66
Costo por ml					Q781,98
Costo por km					Q781 982,83

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. Integración de borda con bioingeniería utilizando vetiver, postes y estacas

INTEGRACIÓN DE PRECIOS DE BIOINGENIERÍA CON ESTACAS Y POSTES					
Rendimiento por día máquina:		20 ml/día			
El costo de maquinaria, incluye combustible, lubricantes y operador					
MAQUINARIA Y EQUIPO					
	Descripción	Cantidad	Horas de trabajo	Costo unitario	Subtotal
1	Pick up	1	8	Q96,00	Q768,00
2	Excavadora 320	1	8	Q550,00	Q4 400,00
3	Tractor de banda	1	8	Q310,00	Q2 480,00
4	Camión	2	8	Q280,00	Q4 480,00
TOTAL					Q12 128,00
MANO DE OBRA					
	Descripción	Cantidad	Horas de trabajo	Costo unitario	Subtotal
5	Encargado/Agrónomo	1	8	Q33,33	Q266,67
6	Albañiles	1	8	Q25,00	Q200,00
7	Ayudantes	2	8	Q12,25	Q196,00
8	Limpieza manual orgánicos 300 ml	1	8	Q12,25	Q98,00
9	Sembrado de esquejes 100 ml/hora	1	8	Q12,25	Q98,00
10	Sembrado de estacas vivas 50 ml/hora	1	8	Q12,25	Q98,00
11	Colocado de postes 100 ml/hora	1	8	Q12,25	Q98,00
12	mantenimiento	1	30	Q12,25	Q367,50
TOTAL					Q1 422,17
HERRAMIENTAS 10 % DE MANO DE OBRA				TOTAL	Q142,22
MATERIALES					
	Descripción	Cantidad	Horas de trabajo	Costo unitario	Subtotal
13	Esquejes	1	20,00	Q6,00	Q120,00
14	Estacas Vivas	1	0,50	Q28,00	Q14,00
15	Postes	1	1,00	Q15,00	Q15,00
TOTAL					Q149,00
Total costo directo					Q1 713,38
Costo indirectos 25 %					Q428,35
Equipo					Q12 128,00
Total parcial					Q14 269,73
IVA					Q1 712,37
Total con IVA					Q15 982,10
Costo por ml					Q799,10
Costo por km					Q799 104,83

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. Integración de borda con bioingeniería utilizando vetiver, postes, estacas y jumbos

INTEGRACIÓN DE PRECIOS DE BIOINGENIERÍA CON ESTACAS, POSTES y JUMBOS					
Rendimiento por día máquina:		20 ml/día			
El costo de maquinaria, incluye combustible, lubricantes y operador					
MAQUINARIA Y EQUIPO					
	Descripción	Cantidad	Horas de trabajo	Costo unitario	Subtotal
1	Pick up	1	8	Q96,00	Q768,00
2	Excavadora 320	1	8	Q550,00	Q4 400,00
3	Tractor de Banda	1	8	Q310,00	Q2 480,00
4	Camión	2	8	Q280,00	Q4 480,00
TOTAL					Q12 128,00
MANO DE OBRA					
	Descripción	Cantidad	Horas de trabajo	Costo unitario	Subtotal
3	Encargado/Agrónomo	1	8	Q33,33	Q266,67
4	Albañiles	1	8	Q25,00	Q200,00
5	Ayudantes	2	8	Q12,25	Q196,00
6	Limpieza manual orgánicos 300 ml	1	8	Q12,25	Q98,00
7	Sembrado de esquejes 100 ml/hora	2	8	Q12,25	Q196,00
8	Sembrado de estacas vivas 50 ml/hora	4	8	Q12,25	Q392,00
9	Colocado de postes 200 ml/hora	1	8	Q12,25	Q98,00
10	Llenado de Jumbos	2	8	Q12,25	Q196,00
11	mantenimiento	1	30	Q12,25	Q367,50
TOTAL					Q2 010,17
HERRAMIENTAS 10 % DE MANO DE OBRA				TOTAL	Q201,02
MATERIALES					
	Descripción	Cantidad	Horas de trabajo	Costo unitario	Subtotal
12	Esquejes	1	20,00	Q6,00	Q120,00
13	Estacas vivas	1	0,50	Q28,00	Q14,00
14	Postes	1	1,00	Q15,00	Q15,00
15	Jumbos	1	1,00	Q90,00	Q90,00
TOTAL					Q239,00
Total costo directo					Q2 450,18
Costo indirectos 25 %					Q612,55
Equipo					Q12 128,00
Total parcial					Q15 190,73
IVA					Q1 822,89
Total con IVA					Q17 013,62
Costo por ml					Q850,68
Costo por km					Q850 680,83

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. Comparativa entre los métodos utilizados en Guatemala

Actividades/material	Diques de arena	Enrocado	Espigón verde	Cajas de gavión	Colchoneta gavión	Refuerzo con jumbos	Geotextil con enrocado	Bioingeniería
Facilidad de construcción	Facilidad de construcción	Construcción sencilla.	Facilidad de construcción	Complejo	Complejo	Facilidad de construcción	Facilidad de construcción	Facilidad de construcción
Tipo de mano de obra	Puede ser local y no calificada	Operador de maquinaria calificado	Puede ser local y no calificada	Puede ser local y no calificada	Puede ser local y no calificada	Puede ser local y no calificada	Operador y mano de obra calificada	Puede ser local y no calificada
Eficiencia	Baja durabilidad	Muy eficiente	Eficiente	Elevada resistencia a la compresión y elevada tensión de tracción.	Elevada resistencia a la compresión y elevada tensión de tracción.	Baja durabilidad	Elevada resistencia a la compresión y elevada tensión de tracción. Debido al geotextil no pierde el material fino.	Disponibilidad de recursos; amigable con el ambiente, es eficiente, económico en comparación y sostenible.
Accesibilidad a los materiales	Material del lecho del río.	Material local, en ocasiones se necesita transportarlo de otros lugares lo que representa un gasto mayor.	Dependiendo de la accesibilidad del material será la elección de espigón a realizar.	Disponible pero los precios son altos	Disponible pero los precios son altos	Disponible pero los precios son altos	Material local, en ocasiones se necesita transportarlo de otros lugares lo que representa un gasto mayor. El precio del geotextil es elevado.	Material local.
Elegibilidad	Economía y facilidad de construcción.	Puntos de cauce menor donde no se puede hacer espigón. Áreas donde el flujo de agua golpea directamente. Áreas donde la velocidad del caudal es mayor a 2.5 m/s	Para restitución de bermas. Áreas donde la velocidad del caudal es de 1.5 m/s aprox.	Alta resistencia y permeabilidad.	Alta resistencia y permeabilidad.	Emergencias o cuando es necesario una intervención rápida.	En casos donde se necesita alta resistencia y ningún otro método a sido sostenible. En curvas principalmente.	Economía, es una solución sostenible y ambiental. Bajas velocidades.
Tipo de maquinaria	Excavadora	Excavadora, retroexcavadora y camiones	Retroexcavadora y camión de volteo	Retroexcavadora y camiones	Retroexcavadora y camiones	Retroexcavadora	Excavadora, Retroexcavadora y camiones	Excavadora
Percepción visual	Natural	Natural	Natural e integrador al paisaje dependiendo la técnica	se considera estetico pero no se integra al paisaje.	se considera estetico pero no se integra al paisaje.	Nada esteticos	se considera estetico pero no se integra al paisaje.	Mejora el Paisaje

Continuación de la tabla XX.

Actividades/material	Diques de arena	Enrocado	Espigón verde	Cajas de gavión	Colchoneta gavión	Refuerzo con jumbos	Geotextil con enrocado	Bioingeniería
Tiempo de funcionamiento	En un invierno se puede llegar a ejecutar el mismo dique como mínimo 2 veces por no soportar las crecidas del río, convirtiéndose en doble inversión.	Indefinido, depende del mantenimiento y eventos hidrometeorológicos extremos.	Indefinido, depende del mantenimiento y eventos hidrometeorológicos extremos.	Indefinido, depende del mantenimiento y eventos hidrometeorológicos extremos.	Indefinido, depende del mantenimiento y eventos hidrometeorológicos extremos.	1 año	Indefinido, depende del mantenimiento y eventos hidrometeorológicos extremos.	Luego de la estabilización del talud dependerá de el mantenimiento, así como de eventos extremos.
Mantenimiento	Debido a su mal funcionamiento se necesita una reconstrucción.	1 vez al año.	Continuo, fácil reparación	1 vez al año para ver su integridad.	1 vez al año para ver su integridad.	Continuo, debe realizarse en cada crecida.	1 vez al año.	Se le debe dar mantenimiento periódico a la vegetación.
Integración al ambiente	No afecta el ambiente.	No afecta el ambiente.	Causa diversas formas de erosión y sedimentación.	Se adapta al terreno y favorece el grado de permeabilidad	Se adapta al terreno y favorece el grado de permeabilidad	Debido al material del que están hecho los jumbos no se considera amigable con el ambiente ya que no son biodegradables.	Se adapta al terreno y favorece el grado de permeabilidad	Aumento de la biodiversidad.
Problemas frecuentes	Alta erosión eólica y pluvial, a causa de la precipitación.	Robo de rocas pequeñas.	Socavación en la punta.	Deterioro dependiendo del alambre. Socavación en la base.	El peso puede provocar un asentamiento del encamado, poco flexible lo que puede provocar desestabilización del dique.	Los jumbos no son resistentes. Deterioro por actividades humanas.	Robo de los materiales. Si el geotextil es arrastrado puede llegar a provocar una erosión interna que genera cárcavas en su interior.	Arrancan las plantas. Deterioro por actividades humanas o pastoreo.
Replicabilidad	Si, en cualquier área.	Si, es replicable.	Si, en condiciones similares.	Si, en condiciones similares.	Si, en condiciones similares.	Si, en cualquier área.	Si, en condiciones similares.	Si
Precio aproximado	Q47,00 / m³	Q163,00 / m³	Q1 200,00 / ml	Q1 500,00 / m³	Q1 500,00 / m³	Q136,00 / m³	Q1 400,00 / m³	Q810,00 / ml

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Los métodos tradicionales que se utilizan con frecuencia en la costa sur para mitigar las inundaciones son los diques de arena, el enrocado, espigones verdes, los gaviones, la colchoneta gavión, los refuerzos con jumbos y el geotextil con enrocado. Los diques de arena y el enrocado son los más elegidos por su facilidad de construcción y economía.
2. El diseño realizado en las intervenciones analizadas en la costa sur de Guatemala es denominado Recubrimiento total, tiene una relativa facilidad de ejecución, así como la utilización de especies y materiales vivos sin elementos estructurales artificiales. Se utilizaron postes para el entramado, tierra negra y estacas de diferentes especies como sauce y matiliguaté; además, la aplicación de vetiver como cubierta vegetal. Los resultados demostraron la recuperación de las riberas y bordas erosionadas en las que se aplicó, las cuales presentaron abundante vegetación a lo largo de ellas, dado a su capacidad portante a la fuerza de las corrientes no se han debilitado ni cedido a los inviernos que se han presentado y además el indudable valor paisajístico ha favorecido al área.
3. Las intervenciones con bioingeniería no sustituyen la ingeniería tradicional, pero con su aplicación se muestran costos reducidos en comparación con las obras tradicionales como gaviones, colchonetas o espigones. Hace uso relevante de mano de obra local y da preferencia por la utilización de materiales locales y de origen natural que aseguran una inserción paisajística y ecológica.

4. Debido a la participación multidisciplinaria en la bioingeniería se puede intervenir de manera hidrológica, hidráulica, morfológica y ecológicamente adecuada para un buen funcionamiento en el área.
5. Además de los costos iniciales bajos, presentan costos de mantenimiento más económicos que los tradicionales, ya que luego de establecida con una manutención regular, la consolidación y protección aumenta con el tiempo, presentando buenos resultados en el control de inundaciones a largo plazo.
6. El vetiver, por sus características resulta ser un cultivo ecológico y rentable para la conservación del suelo, ya que aumenta la cohesión de este debido a que las raíces presentes se alinean sobre la superficie de corte y con el crecimiento de estas, es sometida a esfuerzos de tracción, permitiendo mayores deformaciones de la falla sin que colapse la borda.

RECOMENDACIONES

1. Desarrollar los proyectos de mitigación mediante grupos interdisciplinarios que integren análisis de tipo geológico, geomorfológico, geotécnica, hidrológico, hidráulico, de vegetación y faunístico, referidos a un ámbito territorial adecuado al entorno del área de interés.
2. Antes de hacer la intervención con bioingeniería se debe examinar el caudal, la dinámica del transporte sólido y la pendiente del curso fluvial en el tramo establecido, con la finalidad de verificar si es factible la intervención e incluir posibles alteraciones negativas.
3. Los trabajos de bioingeniería deben ser realizados en la época del año en la cual el material vegetal y el estado vegetativo son adecuados para la estación y las características climáticas locales favorezcan el éxito de la vegetación.
4. Debido a que la bioingeniería no es de efecto inmediato se recomienda un proceso de control, verificación y de mantenimiento durante los periodos posteriores a la siembra que incluyan podas, resiembras, abonos o sustitución de plantas.
5. En situaciones donde la amenaza es permanente es necesario evaluar la factibilidad de los métodos de bioingeniería debido a que se necesita tiempo para consolidar la borda.

BIBLIOGRAFÍA

1. Acción Contra el Hambre. *Obras de mitigación con aplicación de técnicas de ingeniería naturalística en la protección de bordas del río Coyolate Nueva Concepción – Escuintla, Guatemala*. Guatemala: ACH, 2012. 7 p.
2. ALEGRE, Julio. *Manual sobre el uso y manejo del pasto vetiver*. Perú: Organización Panamericana de la Salud, 2007. 37 p.
3. CENTENO PULIDO, Francisco Antonio. *Ingeniería biotecnia y bioingeniería. Nuevas tendencias de la geotecnia para las obras de tierra, la estabilización de taludes y el control de la erosión*. Venezuela: 2002. 4 p.
4. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. *Investigación preliminar de cuatro cuencas compartidas para su inclusión en el programa regional de medio ambiente de Danida*. Turrialba, Costa Rica: CATIE, 2001. 16 p.
5. CROCETTI, Cesare; FERRARI, Roberto; PETRONE, Alessandro & AIPIN. *Estimación de Vulnerabilidades y Reducción del Riesgo de Desastres a Nivel Municipal en el Ecuador*. Ecuador: 2012. 4 p.
6. DEBROISE, Anne; SEINANDRE, Érick. *Fenómenos naturales: un planeta activo*. Barcelona: Vox, 2003. 127 p.

7. Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente, Dirección de Aguas. *Manual de técnicas de ingeniería naturalística en ámbito fluvial*. Vasco: 2002. 25 p.
8. GRAY, Donald. H. *Role of woody vegetation in reinforcing soils and stabilizing slopes. Proceedings, Symposium on Soil Reinforcing and Stabilising Techniques in Engineering Practice*. NSW Institute of Technology, Sydney, Australia: 1978. 306 p.
9. GRAY, Donald H. LEISER, Andrew T. *Biotechnical Slope Protection and Erosión Control*. Van Nostrand Reinhold, New York: 1982. 267 p.
10. _____SOTIR, Robbin B. *Biotechnical and soil Bioengineering Slope stabilization*. John Wiley & Sons, Inc. 1996. 378 p.
11. GREGORY, James M. MCCARTY, Thomas R. *Maximum allowable velocity prediction for vegetated waterways*. Straelen, Alemania: 1986. 55 p.
12. HEWLETT, H.W.M. BOORMAN, Laurence A.; BRAMLEY, M.E. *Guide to the design of reinforced grass waterways*. Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), London: the United Kingdom, 1987. 116 p.
13. HERRERA PASSOS, Jessika. *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*. Bogotá: 2015. 26 p.

14. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático. *Diagnóstico sobre bordas en cuencas prioritarias*. Guatemala: 2012. 12 p.
15. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático. *Estudio Hidráulico del río Coyolate para la determinación de zonas susceptibles a inundación*. Guatemala: 2013. 34p
16. KINNEY, John W. GULSO, Alan W. *The Illinois experience with low-cost streambank protection*. IECA soil stabilization series: vol. 1 Methods and techniques for stabilizing channels and streambanks. Illinois, 1998. 9 p.
17. LEVENTHAL, Andrew R. MOSTYN, Garry R. *Slope stabilization techniques and their application*. In Slope instability and stabilization. Balkema, Rotterdam. 1987. 230 p.
18. MAGA, INSIVUMEH, PMA, *Estimación de amenazas inducidas por fenómenos hidrometeorológicos en la República de Guatemala*. Guatemala: 2002. 32 p.
19. Ministerio de ambiente y recursos naturales. *Guatemala: compilación y síntesis de los estudios de vulnerabilidad y adaptación al cambio climático*. Guatemala: MARN, 2007. 31 p.
20. Ministerio de comunicaciones, infraestructura y vivienda. *Estudio de la cuenca del Coyolate. Unidad de Manejo de Ríos y Canales*. Guatemala: 2007. 5 P.

21. _____. Estudio y diseño de las obras para mitigar el impacto del río Achiguate sobre la infraestructura vial de la ruta CA-02 occidente (puente Achiguate), ruta RD-38-ESC (puente La Barrita), CA-09-SUR y poblaciones aledañas al cauce. Dirección General de Caminos. Unidad de manejo de ríos y canales. Guatemala: 2009. 100 p.
22. MILLER, Dale. *Design guidelines for bioengineered river bank stabilization*. IECA Conference 27, Seattle, Washington: 1996. 168 p.
23. National Research Council. *Restoration of aquatic ecosystem*. National Academy Press, Washington: 1992. 552 p.
24. PALMERI, Fabio. *Manual de técnicas de ingeniería naturalística en ámbito fluvial*. Vasco: 2002. 79 p.
25. PEREZ, Carlos; LIZCANO, Jorge. *Uso del pasto vetiver como una propuesta de bioingeniería en la estabilización de taludes*. Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2012. 65 p.
26. REED, Sheila. *Introducción a las amenazas*. Wisconsin: InterWorks. 1995. 88 p.
27. SANGALLI, Paola. *Bioingeniería fluvial. Manual técnico para el ámbito cantábrico - proyecto H₂O Gurea*. Navarra, 2019. 56 p.
28. SUÁREZ, Jaime. *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: 2001. 337 p.

29. _____ Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales.
Colombia: Universidad Industrial de Santander, 1998. 132 p.

30. WELLMANN CASTELLANOS, Heike. *Análisis para la reducción de riesgos utilizando el pasto vetiver en el talud ubicado en el parque ecológico Las Ardillas*. Guatemala: 2017. 106 p.

