

**EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE BIOINGENIERÍA PARA LA RESTAURACIÓN  
ECOLÓGICA DE ÁREAS DEGRADADAS POR EXCAVACIONES A CIELO  
ABIERTO**

**LINA MARCELA LÓPEZ MARÍN  
LINA VANESSA BARBOSA RODRÍGUEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2014**

**EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE BIOINGENIERÍA PARA LA RESTAURACIÓN  
ECOLÓGICA DE ÁREAS DEGRADADAS POR EXCAVACIONES A CIELO  
ABIERTO**

**LINA MARCELA LÓPEZ MARÍN  
LINA VANESSA BARBOSA RODRÍGUEZ**

**Monografía presentada como requisito para optar al título  
de Especialista en Ingeniería Ambiental**

**Director:  
Wilfredo del Toro Rodríguez**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2014**

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. RESTAURACIÓN ECOLÓGICA GENERALIDADES	18
1.1 RESTAURACIÓN ECOLÓGICA, REHABILITACIÓN, RECLAMACIÓN Y REVEGETALIZACIÓN	18
1.1.1 Restauración Ecológica	18
1.1.2 Rehabilitación	19
1.1.3 Reclamación o Reemplazo	20
1.1.4 Revegetalización	20
1.2 ELEMENTOS DE LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA A ESCALA FORESTAL	20
1.3 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR UN PROYECTO DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA	22
1.3.1 Pasos seguir dentro de un proceso de restauración	22
2. BIOINGENIERÍA APLICADA A EXCAVACIONES A CIELO ABIERTO	25
2.1 GENERALIDADES	25
2.2 PRINCIPIOS DE APLICACIÓN	26
2.3 PARÁMETROS DE ESTUDIO	27
2.4 MATERIALES EMPLEADOS EN BIOINGENIERÍA	28
2.4.1 Materiales vegetales vivos	28
2.4.2 Materiales inertes	28
2.5 RECONSTITUCIÓN DEL SUELO	29
3. TÉCNICAS DE BIOINGENIERÍA	31
3.1 TÉCNICAS DE REVESTIMIENTO	31
3.2 TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN	33
3.3 TÉCNICAS MIXTAS DE ESTABILIZACIÓN	36

3.4	TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS	40
4.	CASOS EXITOSOS	42
4.1	TRATAMIENTOS BIOINGENIERILES EN LA VÍA A LA VEREDA VILLARROSA EN ARGELIA, VALLE DEL CAUCA	42
4.1.1	Sitio de la intervención	42
4.1.2	Antecedentes	42
4.1.3	Entidades encargadas de la intervención	43
4.1.4	Descripción de las medidas adoptadas	43
4.2	RESTAURACIÓN DE TALUD EL TABLAZO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE ACUEDUCTO DE POPAYÁN	45
4.2.1	Sitio de la intervención	45
4.2.2	Antecedentes	45
4.2.3	Entidades encargadas de la intervención	45
4.2.4	Descripción de las medidas adoptadas	45
5.	ESTUDIO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE BIOINGENIERÍA DISPONIBLES PARA EL CONTROL DE MECANISMOS DESESTABILIZANTES DEL TERRENO	46
6.	CASO DE ESTUDIO: CUENCO DE DISIPACIÓN DEL VERTEDERO DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO DEL RÍO SOGAMOSO	49
6.1	CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA	49
6.1.1	Localización	49
6.1.2	Topografía	51
6.1.3	Geología	51
6.1.4	Geomorfología	53
6.1.5	Tipos de suelo	53
6.1.6	Parámetros climatológicos	53
6.1.7	Cobertura vegetal	54
6.1.8	Excavación y protección del talud	54

6.2	RECUPERACIÓN DEL ECOSISTEMA	57
6.3	SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE BIOINGENIERÍA	58
6.3.1	Manejo de aguas	58
6.3.2	Construcción de filtro vivo con guadua sostenido con trinchos vivos	59
6.3.3	Protección contra la erosión	61
6.4	SELECCIÓN DE ESPECIES VEGETALES Y MÉTODOS DE SIEMBRA	62
6.4.1	Substrato edáfico	62
6.4.2	Siembra de especies gramíneas, plantación de árboles y arbustos	64
6.4.3	Geoceldas verdes	67
7.	CONCLUSIONES	70
8.	RECOMENDACIONES	72
	BIBLIOGRAFÍA	73
	ANEXOS	76

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema general de un proceso de restauración ecológica	24
Figura 2. Lechos de ramaje	35
Figura 3. Fajinas vivas	35
Figura 4. Emparrillado vivo – Vista lateral	36
Figura 5. Trinchos vivos - Vista lateral	37
Figura 6. Algunos tipos de entramados vivos	37
Figura 7. Tierra reforzada vegetalizada	38
Figura 8. Muro criba y muro de gaviones	39
Figura 9. Muro de piedra vegetalizado	40
Figura 10. Cortacorrientes	41
Figura 11. Localización general proyecto Hidrosogamoso	50
Figura 12. Localización del cuenco de disipación	50
Figura 13. Sección del talud del cuenco de disipación	51
Figura 14. Protección de talud del cuenco de disipación en diseño original	56
Figura 15 . Esquema de la plantación.	65
Figura 16 . Geoceldas sintéticas de polietileno	69

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Procedimientos tradicionales de ingeniería vs. Técnicas de bioingeniería	46
Tabla 2. Pendiente del talud vs. Técnicas de bioingeniería	47
Tabla 3. Clasificación de técnicas según la función de los materiales	48
Tabla 4. Rumbo y buzamiento de los sistemas de diaclasas del cuenco	52
Tabla 5. Características de los sistemas de diaclasas de la zona del cuenco	52
Tabla 6 . Listado de especies nativas que pueden ser consideradas dentro de los procedimientos de siembra y plantación en el numeral 6.4.2	67

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1. Filtros vivos de guadua	41
Fotografía 2. Trinchos vivos	43
Fotografía 3. Terrazas escalonadas en tierra y filtro de guadua	44
Fotografía 4. Tratamientos bioingenieriles Talud El Tablazo, Popayán	45
Fotografía 5 . Trabajos iniciales de excavación y protección del talud	55
Fotografía 6. Izquierda: Imagen tomada durante evento de lluvia. Derecha: Empradizado dañado por desprendimiento de material del talud	56
Fotografía 7. Estado actual del talud	57
Fotografía 8. Trincho con vertedero sobre filtro principal	60
Fotografía 9. Detalle de drenajes en la parte superior del cuenco	61
Fotografía 10. Agromanto instalado en Río Negro, Antioquia sobre lodo fértil en la Variante Aeropuerto	63
Fotografía 11 . Distribución de especies nativas y de <i>Brachiaria decumbens</i> dentro del proceso de rehabilitación del talud.	66

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Definiciones	76
ANEXO B. Marco normativo	77

## RESÚMEN

**TÍTULO: EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE BIOINGENIERÍA PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE ÁREAS DEGRADADAS POR EXCAVACIONES A CIELO ABIERTO\***

**AUTOR:** LINA MARCELA LÓPEZ MARÍN, LINA VANESSA BARBOSA RODRÍGUEZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Bioingeniería, Restauración Ecológica, Rehabilitación, Reclamación, Reemplazo, Revegetalización, Excavaciones a Cielo Abierto.

### RESUMEN:

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar las técnicas de bioingeniería para la restauración ecológica de áreas degradadas por excavaciones a cielo abierto. La ejecución de obras de ingeniería requiere la realización de excavaciones a cielo abierto, que implican la modificación geomorfológica del terreno, trayendo consigo consecuencias en los diferentes niveles del paisaje, aumentando su vulnerabilidad ante procesos erosivos y provocando cambios del equilibrio hídrico y las condiciones de estabilidad de los taludes. La bioingeniería, es una disciplina técnica basada en la utilización de plantas vivas de especies nativas en combinación con materiales inertes, que permite establecer mecanismos de protección contra la erosión superficial, estabilización y consolidación de terrenos, así como la creación de redes de drenaje adaptadas a las nuevas condiciones morfológicas, y de vertientes geomorfológicamente estables dotadas de un sustrato de crecimiento para las plantas.

Se realizó una identificación de las variables de la rehabilitación ecológica y la bioingeniería, considerando un estudio comparativo de las diferentes técnicas de acuerdo con su aplicabilidad según las condiciones dadas. Se tomó un caso de estudio para el cual, después de analizar tanto el inventario de aprovechamiento forestal como los aspectos topográficos, hidroclimáticos, geológicos y edafológicos del mismo, se elaboró una propuesta para la aplicación bioingeniería para la rehabilitación ecológica del área, identificando especies arbóreas, arbustivas y herbáceas apropiadas, así como las ventajas, consideraciones especiales y procedimientos para intervención con las técnicas seleccionadas.

Las técnicas de bioingeniería presentadas en este trabajo constituyen una herramienta eficaz en la protección contra la erosión y el reforzamiento de suelos; sin embargo, es importante complementarlas con medidas de control de aguas y estrategias de mantenimiento durante la etapa de establecimiento de la vegetación.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Especialización en Ingeniería Ambiental. Director: Wilfredo del Toro Rodríguez

## ABSTRACT

**TITLE: EVALUATION OF BIOENGINEERING TECHNIQUES FOR ECOLOGICAL RESTORATION OF AREAS DEGRADED BY OPEN PITS\***

**AUTHOR: LINA MARCELA LÓPEZ M., LINA VANESSA BARBOSA RODRÍGUEZ\*\***

**KEY WORDS:** Bioengineering, Ecological Restoration, Rehabilitation, Reclamation, Replacement, Revegetation, Open Pits.

### **CONTENT:**

This paper aims to assess the bioengineering techniques for ecological restoration of areas degraded by open pits. The implementation of engineering requires the completion of open pits, involving geomorphological terrain modification, bringing consequences at different levels of the landscape, increasing their vulnerability to erosion and causing changes in water balance and slopes stability conditions. Bioengineering is a technical discipline based on the use of live plants of native species in combination with inert materials, which allows establishing mechanisms for protection against surface erosion, stabilization and consolidation of land and the creation of drainage networks adapted to the new morphological conditions and geomorphological aspects provided with a stable growth substrate for plants.

An identification of the variables of ecological rehabilitation and bioengineering was performed considering a comparative study of different techniques according to their applicability under the given conditions. A case of study was taken, for which after analyzing both forest inventory and topographic, hydro, geological and soil aspects, was developed a proposal for the use of bioengineering towards ecological rehabilitation of the area, identifying appropriate trees, shrubs and herbaceous species, and the advantages, special considerations and procedures for the selected intervention techniques.

Bioengineering techniques presented in this paper are an effective tool in protecting against erosion and soil reinforcement; however, it is important to supplement them with water control measures and maintenance strategies during the establishment phase of the vegetation.

---

\* Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. School of Chemical Engineering. Specialization in Environmental Engineering. Director: Wilfredo del Toro Rodríguez

## INTRODUCCIÓN

La restauración ecológica es el proceso de recuperación parcial de un ecosistema que ha sido degradado o destruido mediante un disturbio, donde se tiene como principal propósito el restablecimiento de la función y la estructura de las áreas que han sido perturbadas. Los disturbios se clasifican según la causa que les dió origen y que dan como resultado un tipo de área o ecosistema afectado. Dentro de ellos se consideran los disturbios de tipo: *Natural*: como incendios forestales, huracanes, inundaciones y deslizamientos de tierra, entre otros. *Antrópicos*: incendios forestales inducidos, tala, uso agrícola, uso pecuario, construcciones urbanas, descargas de sedimentos, descarga de contaminantes, extracción de materiales a cielo abierto, entre otros. Además de que los disturbios pueden variar dependiendo de su origen, también traen consigo diferentes consecuencias como la aparición de un claro, la pérdida total o parcial del suelo, cambios en las condiciones microclimáticas (luz, temperatura, humedad, precipitación), pérdida total o parcial del banco de semillas, disminución del reclutamiento de especies nativas y la pérdida o disminución en la riqueza de las especies (Mansourian, 2005).

Hoy en día las actividades extractivas a cielo abierto modifican la geomorfología del espacio en explotación trayendo consigo consecuencias en los diferentes niveles del paisaje. A nivel atmosférico se producen contaminaciones mediante la emisión de partículas sólidas, polvo y gases, derivada de la apertura de huecos. En cuanto a la hidrología, se modifica la red hidrográfica y se presenta riesgo de contaminación de aguas superficiales por partículas sólidas y acumulación de residuos. Dentro de las consecuencias que afectan la fauna y flora se encuentran: la eliminación o reducción de la cubierta vegetal generando dificultades para la regeneración de la vegetación, lo cual conlleva a la alteración o pérdida de hábitats para la fauna y desplazamiento de especies. A nivel geofísico las alteraciones se presentan por medio de la eliminación irreversible del suelo fértil,

un aumento del riesgo de desprendimiento, deslizamientos o hundimientos de tierra, aumento de la carga de sedimentación aguas abajo, afectación a la pendiente y aumento de la erosión. En definitiva, no sólo se crean unos espacios degradados, con una morfología nueva y unas dinámicas distintas, sino que se crea un espacio singular, disimilar de su entorno.

La restauración ecológica de las zonas degradadas por actividades extractivas implica la creación de una nueva geomorfología. Esto comporta la estructuración de una red de drenaje adaptada a las nuevas condiciones morfológicas, que sea eficaz y sin riesgos. De la misma forma implica la creación de vertientes geomorfológicamente estables y dotadas de un substrato de crecimiento para las plantas. La plantación de especies nativas como estrategia de recuperación de estas zonas, ofrece ventajas importantes: son especies adaptadas a las condiciones edáficas y climáticas, y también a los agentes bióticos (insectos polinizadores, herbívoros, micorrizas, plagas, potenciales, etc.), de la zona a recuperar. En consecuencia, son las especies que mejor garantizan una sucesión sostenible de la nueva comunidad vegetal. Dentro de las estrategias de restauración deben tenerse en cuenta los requerimientos o condicionantes específicos de la zona a restaurar. Todo ello debe ser compatible con las exigencias de estabilidad de la cubierta edáfica necesaria para el establecimiento de la vegetación. Las condiciones de estabilidad geotécnica se pueden observar en la zona circundante a la explotación, son una buena referencia para el diseño de nuevas geoformas; la presencia y la altura de los taludes naturales, el ángulo de inclinación de las vertientes estables y sin erosión y las características de la red de drenaje preexistente. La buena gestión del manejo de aguas es imprescindible para mantener la estabilidad de los taludes y para evitar los movimientos en masa. Debe evitarse la entrada en los taludes del agua de escorrentía de las precipitaciones ordinarias, bien sea mediante cunetas perimetrales, ya que las aguas de precipitaciones intensas generan fenómenos de erosión que degradan los taludes y requieren de una buena gestión.

En términos generales dentro de la toma de decisiones para recuperar estas áreas se deben tener en cuenta 4 aspectos principales; 1) Aportarle al terreno la estabilidad geotécnica máxima posible, 2) realizar un manejo adecuado de aguas y 3) proteger las geoformas evitando y controlando la erosión, 4) velar por el establecimiento de las plantas autóctonas (Jorba y Vallejo, 2010).

El objetivo del presente trabajo es evaluar las técnicas de bioingeniería para la restauración ecológica de áreas degradadas por excavaciones a cielo abierto. Dentro de la revisión de los temas descritos, se tuvo en consideración un estudio comparativo de las diferentes técnicas de bioingeniería para la restauración ecológica de estas áreas y se elaboró una propuesta para la rehabilitación de un talud empleando técnicas de bioingeniería en el cuenco de disipación del vertedero del Proyecto hidroeléctrico de Sogamoso en Santander, Colombia.

## **1. RESTAURACIÓN ECOLÓGICA GENERALIDADES**

Dadas las consecuencias ambientales que conllevan los ecosistemas degradados, se ha considerado la restauración ecológica como una de las posibilidades para la recuperación de estos ecosistemas. Antes de dar una definición amplia de lo que es la restauración ecológica es importante dar a conocer dos conceptos claves. El primero es la restauración pasiva la cual consiste en la recuperación natural de un ecosistema cuando es eliminado el disturbio o la barrera que impide su regeneración. Este tipo de recuperación depende de la resiliencia de un ecosistema, es decir de la capacidad que tiene el ecosistema para volver a su estado original después de un disturbio. En determinadas ocasiones, cuando el disturbio es muy grave y los ecosistemas o zonas degradadas no pueden regenerarse solos y es muy lenta su regeneración o se desvían de la dinámica natural, es necesario implementar estrategias para lograr su recuperación; lo cual se denomina restauración asistida o activa.

### **1.1 RESTAURACIÓN ECOLÓGICA, REHABILITACIÓN, RECLAMACIÓN Y REVEGETALIZACIÓN**

#### **1.1.1 Restauración Ecológica (Vargas, 2007)**

Según la Sociedad Internacional para la Restauración Ecológica (SERI), se define como el proceso de asistir la recuperación, no de la totalidad sino de los componentes básicos de la estructura, función y composición de especies de un ecosistema o área natural que han sido degradados o destruidos. Cuando se habla de ecosistemas forestales diferentes autores definen la restauración como el restablecimiento de la estructura, la productividad y la diversidad de las especies originalmente presentes en el bosque. Con el tiempo, los procesos ecológicos y las funciones coincidirán con las del bosque original. Dentro de las principales características de la restauración ecológica se encuentran las siguientes:

- Es muy factible que con ayuda antropogénica se puedan recuperar los mecanismos de regeneración de un ecosistema después de un disturbio.

- El ecosistema puede llegar a una o varias sucesiones naturales, pero difícilmente puede volver a su estado original.
- El grado de recuperación de un ecosistema va a depender del conocimiento del ecosistema o área de referencia (área original antes del disturbio) y del estado actual del ecosistema (después del disturbio).
- El objetivo actual de la restauración ecológica es iniciar y acelerar procesos que conduzcan a la recuperación del ecosistema.

La restauración ecológica no busca únicamente restablecer las condiciones originales de lo que era un ecosistema, sino que además busca crear una auto organización sostenible y persistente, donde un ecosistema sea capaz de sostenerse a sí mismo, permitiéndole resistir a invasiones por nuevas especies, que sea tan productivo como el original y que tenga interacciones bióticas similares a las condiciones iniciales.

A pesar de que se plantean esfuerzos prometedores desde el enfoque de la restauración ecológica, existen áreas naturales demasiado degradadas de las cuales no se puede hablar de restauración si no de acciones encaminadas hacia la rehabilitación, la reclamación o la revegetalización. En general estas acciones se encuentran dentro del marco de las estrategias de un proceso de restauración ecológica.

### **1.1.2 Rehabilitación (Samper, 2000)**

A diferencia de la restauración ecológica la rehabilitación no pretende llegar al estado original de un área o ecosistema degradado. Es posible que se puedan recuperar las principales funciones ecosistémicas sin recuperar totalmente su estructura, es decir es posible obtener algunos de los servicios ecosistémicos sin necesidad de recuperar completamente la estructura del ecosistema, incluso se pueden reemplazar las especies que originalmente lo componen. De esta manera, se tendría el restablecimiento de la productividad y de algunas, pero no necesariamente todas, las especies animales y vegetales originalmente presentes. En muchos casos la plantación de árboles nativos o

de especies pioneras dominantes y de importancia ecológica, pueden iniciar un proceso de rehabilitación.

### **1.1.3 Reclamación o Reemplazo**

La reclamación o reemplazo hace referencia a la recuperación de un área degradada a su estado de utilidad que a su estado original. Se reemplaza el ecosistema degradado por uno productivo pero este no tiene las características del ecosistema original. Generalmente la recuperación de la productividad en un sitio degradado se realiza utilizando principalmente especies de árboles exóticos, donde frecuentemente se usan monocultivos. La diversidad biológica original no se recupera pero la función de protección y la mayoría de los servicios ecológicos pueden ser restablecidas.

La reclamación o reemplazo ha sido ampliamente utilizado en la recuperación de zonas degradadas por minería a cielo abierto, ya que involucra acciones para la reconstrucción de la topografía, el suelo y las condiciones para el crecimiento de las plantas después del disturbio.

### **1.1.4 Revegetalización**

Es el proceso mediante el cual las plantas colonizan un área de la cual ha sido removida su cobertura vegetal original por el efecto de un disturbio. La revegetalización no necesariamente implica que la vegetación nativa u original sea restablecida. Algunas de las áreas que sufren disturbios son ocupadas por especies invasoras que desvían las sucesiones o coberturas vegetales diferentes a las originales.

## **1.2 ELEMENTOS DE LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA A ESCALA FORESTAL (NEWTON Y TEJEDOR, 2011)**

La restauración o rehabilitación de un paisaje o área forestal es un proceso planificado que pretende recuperar la integridad ecológica y mejorar el bienestar humano en paisajes forestales que han sido deforestados o degradados. La restauración de paisajes

forestales comprende una serie de elementos fundamentales que se deben tener en cuenta a la hora de planificar un proyecto de recuperación de la cobertura forestal:

- La planificación de la restauración forestal se hace en el contexto de otros elementos: sociales, económicos y biológicos, característicos de un determinado paisaje o zona forestal. Esto no implica necesariamente la plantación de árboles en todo el paisaje, sino más bien en aquellas zonas estratégicamente localizados en áreas donde sea necesario lograr un conjunto de funciones (por ejemplo, la estabilización del suelo o el suministro de materiales de construcción para las comunidades locales).
- Implica eliminar las causas originales que provocaron la pérdida y degradación de la vegetación. También implica que si estos factores no son eliminados, la restauración será probablemente en vano.
- Se deben plantear diferentes soluciones a un mismo problema. No existe una técnica individual de restauración que pueda ser aplicada en todas las situaciones. De manera específica, en cada caso tendrán que ser tenidos en cuenta un número determinado de acciones que dependerán de las condiciones locales. Dentro de las soluciones se pueden incluir acciones prácticas, tales como las técnicas agroforestales, el enriquecimiento por plantación o la regeneración natural a escala de paisaje, pero también tiene que abarcar el análisis de las políticas, la formación, el presupuesto y la investigación.
- El objetivo principal es restaurar una serie de productos forestales, servicios y procesos, más que la cobertura del bosque per se. Los objetivos que se persiguen a largo plazo deberían idealmente ser propuestos a través de un proceso que incluyera representantes de diferentes grupos con intereses en el paisaje con el fin de alcanzar, si no un consenso, al menos un compromiso que sea aceptable para todos.
- Es necesario incluir dentro de la planificación todos los beneficios potenciales de las funciones ecosistémicas como lo son; el ciclado de nutrientes, la estabilización y protección de los suelos, las especies animales que habitan en el área, etc. con el fin

de que la elección de la técnica de restauración, lugares y especies arbóreas estén mejor pensados.

### **1.3 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR UN PROYECTO DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA**

Cuando se habla de restaurar un área que ha sido degradada, se pueden presentar diversos factores tanto naturales como sociales que hacen que cada sitio sea único y por ende que las estrategias de restauración sean diferentes para cada lugar. Aunque no existen métodos estandarizados para restaurar un ecosistema, existen recomendaciones generales basadas en las bases teóricas y en las experiencias acumuladas alrededor del mundo.

En general se pueden definir 5 fases claves dentro de un programa de restauración dentro de las cuales se describen actividades como; Identificar y tratar las causas que son responsables de la degradación de un área o ecosistema, definir objetivos y sus formas de evaluación, desarrollar metodologías para lograr dichos objetivos y monitorear el curso de la restauración (Hoobs y Norton, 1996).

#### **1.3.1 Pasos seguir dentro de un proceso de restauración**

Los pasos a seguir no necesariamente tienen que ser en el orden propuesto, todo depende de la particularidad de los sitios, de las escalas y los objetivos propuestos.

**Paso 1. Definir el área a restaurar y su ecosistema de referencia.** Una vez definida el área que se pretende restaurar, se debe evaluar el estado del conocimiento histórico de la zona, es decir, tener un ecosistema de referencia. En los casos donde el objetivo de la restauración no es volver precisamente al ecosistema original, si no recuperar o rehabilitar la zona degradada, los inventarios de las especies de flora y fauna más importantes de la zona de referencia, pueden jugar un papel importante dentro de la toma de decisiones en el proyecto de restauración.

**Paso 2. Evaluación del estado actual de la zona a restaurar.** En esta fase se presentan las evidencias de los problemas que presenta la zona degradada para precisar posteriormente los objetivos de restauración. Se hace comprensión de los factores de alteración y los atributos del ecosistema en cuanto a composición de especies. Se debe tener en cuenta:

- Definir el área y su grado de alteración
- Evaluar el estado del suelo y su hidrología
- Definir si aún persisten los disturbios a esa escala y si se pueden volver a presentar. Si no se eliminan de una forma permanente los factores tensionantes es posible que el proyecto de restauración no sea viable.
- Tener en cuenta las recomendaciones de la gente local en cuanto a fenómenos estacionales como lluvias o relacionados con especies nativas.

**Paso 3. Definición de objetivos.** Los objetivos se deben establecer con claridad para lograr que el proyecto tenga éxito en términos de efectividad y costos. Se debe definir el estado deseado de las posibles trayectorias sucesionales del ecosistema.

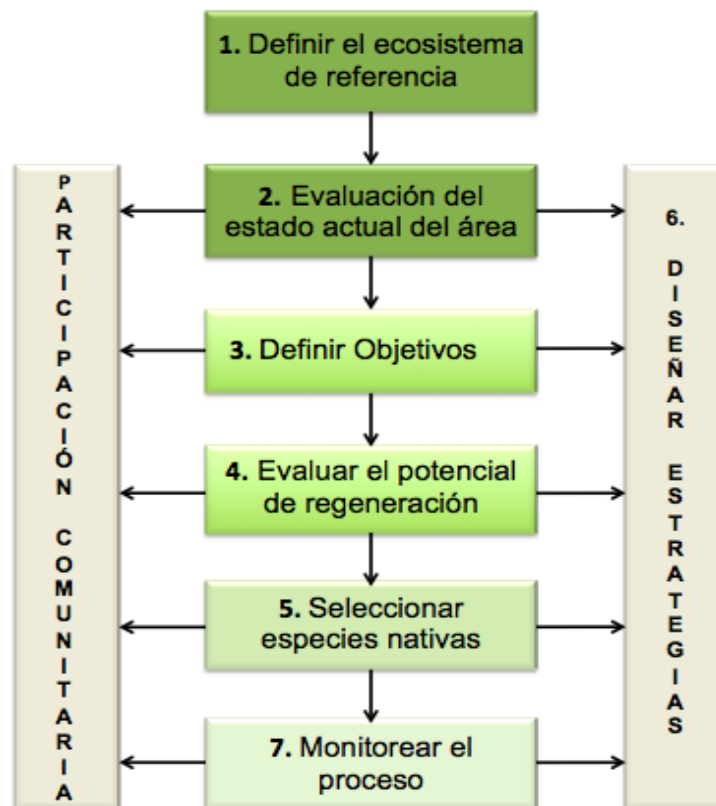
**Paso 4. Evaluar el potencial de regeneración.** Esta es una fase diagnóstica para evaluar el potencial de regeneración, es decir, la disponibilidad de especies que hay en la región, su ubicación, su etapa sucesiva y abundancia. En este paso es importante tener un inventario de la composición de especies y una clasificación de las sucesiones vegetales para definir la estructura de las especies según los mosaicos de vegetación actuales producto de diferentes regímenes de disturbios.

**Paso 5. Seleccionar las especies adecuadas para la restauración.** Del listado de especies que se tiene en el inventario se deben escoger las que tienen el potencial de regeneración y las que son más importantes bajo una escala de atributos o rasgos que pueden ser útiles según los objetivos de restauración. Es importante que las especies seleccionadas se encuentren fácilmente en los viveros locales ya que esto es de suma importancia para su propagación en el área a restaurar.

**Paso 6. Diseñar estrategias para superar barreras de la restauración.** Dependiendo de la variedad de disturbios que se hayan generado en la zona a restaurar, es necesario el desarrollo de técnicas físicas, químicas o biológicas que puedan ser utilizadas independientemente o conjuntamente para lograr los resultados deseados. Un ejemplo de esto es el restablecimiento de las condiciones edáficas e hidrológicas para la reintroducción de biota nativa.

**Paso 7. Monitorear el proceso de restauración.** Es necesario diseñar un sistema de seguimiento del área sujeta a restauración, dejando claramente establecidos los indicadores que resulten más apropiados para la escala y el caso del que se trate. Mantener un seguimiento puntual del crecimiento de la biota nativa y su dispersión para verificar el éxito del proceso a largo plazo.

**Figura 1.** Esquema general de un proceso de restauración ecológica



Fuente: Vargas, 2007

## **2. BIOINGENIERÍA APLICADA A EXCAVACIONES A CIELO ABIERTO**

La ejecución de obras de ingeniería como vías, presas, minas, entre otras, requiere llevar a cabo excavaciones que permitan crear determinadas superficies para el emplazamiento de las mismas de acuerdo con las condiciones de diseño. Las excavaciones a cielo abierto implican no solo la modificación de la morfología del terreno, sino que aumentan su vulnerabilidad ante procesos erosivos causados por acción del impacto directo de las aguas lluvias sobre el terreno desprotegido de vegetación, la infiltración de grandes volúmenes de agua, la dispersión de partículas por acción del viento y la alteración de las condiciones de estabilidad de los taludes provocada por la remoción de materiales ubicados en la base de los mismos.

Es necesario establecer para estos trabajos, no solo los parámetros y técnicas ingenieriles de excavación más apropiados para las condiciones específicas del terreno, sino también procedimientos de protección contra la erosión, manejo de aguas, estabilización y consolidación de taludes, y obras de contención.

Existen técnicas tradicionales para protección y estabilización de taludes, tales como el concreto lanzado, los muros de gaviones, muros de contención en concreto, las cuales son consideradas por algunos autores como “no sostenibles en el largo plazo debido a su alto costo inicial incrementado con los costos de reparación y mantenimiento, debido al deterioro de los materiales” (FOPAE, 2013).

Una alternativa viable para responder ante las necesidades de estabilidad del terreno es la bioingeniería, que al estar basada en la utilización de plantas vivas se constituye como herramienta de partida para la rehabilitación de los ecosistemas que han sido afectados con la excavación.

### **2.1 GENERALIDADES**

La bioingeniería es una disciplina técnica que utiliza las plantas vivas, algunas veces en conjunto con materiales inertes como piedras, madera, acero o elementos sintéticos,

como medida de control y prevención de la erosión, cumpliendo funciones de contención y protección del terreno ante eventos de lluvia, y mejorando sus características de drenaje. También puede ser empleada como herramienta para rehabilitación ambiental de áreas intervenidas por obras civiles como canteras, carreteras y otras obras de infraestructura para el transporte, así como para la restauración ecológica de márgenes de ríos y la ejecución de obras hidráulicas en zonas montañosas.

Los principales objetivos de la bioingeniería son:

**Técnico-funcional:** Control de la erosión, protección contra agentes climáticos y manejo de aguas en la estabilización de taludes. Disminución de la velocidad de cauces.

**Ecológico:** Restauración de áreas mediante el uso de especies nativas para promover el equilibrio ecológico.

**Paisajístico:** Recuperación de paisajes intervenidos por actividades antrópicas.

**Socioeconómico:** Soluciones eficaces de ingeniería, de costo reducido gracias a la utilización de materiales en su mayoría de origen natural, lo que las hace competitivas ante los métodos ingenieriles tradicionales. Los insumos naturales y la participación de mano de obra local favorecen la economía de la región circundante a las áreas intervenidas. Trabajo multidisciplinario que implica participación de profesionales de distintas ramas.

## 2.2 PRINCIPIOS DE APLICACIÓN

Para llevar a cabo un proyecto de bioingeniería es necesario considerar los siguientes aspectos:

**Evaluación de conveniencia:** Identificar las condiciones iniciales del área a intervenir y evaluar factores de tipo técnico, socio-económico y ambiental, para establecer la conveniencia de la utilización de bioingeniería frente a otros métodos.

**Caracterización de la zona:** Recopilar e interpretar información hidroclimática, y geomorfológica de la zona, para utilizarla en la aplicación de métodos tradicionales de diseño hidráulico y geotécnico, respetando la normatividad aplicable.

**Aprovechamiento de la capacidad natural del sistema:** Procurar el uso de especies nativas para evitar contaminación genética. El uso de plantas de origen local garantiza su adaptación a las condiciones hidroclimáticas y estacionales propias de la región.

**Análisis técnico:** Realizar una evaluación de los procedimientos de trabajo aplicables, especies vegetales óptimas y disponibilidad de materiales, equipos y personal calificado para la realización de las tareas.

### **2.3 PARÁMETROS DE ESTUDIO**

Para realizar un diseño de bioingeniería es importante realizar un estudio de la información que pueda condicionar la aplicación de las diversas técnicas:

**Topografía:** Pendientes del terreno.

**Características geológicas:** Procesos activos naturales o generados por la excavación, tales como erosión, desprendimientos, deslizamientos.

**Características hidroclimáticas:** Presencia de afloramientos de agua, nivel freático, precipitaciones, temperatura, brillo solar, humedad, etc.

**Composición de suelos:** Características litológicas y condiciones que favorezcan o limiten el establecimiento de vegetación, características del subsuelo.

**Consideraciones geotécnicas:** Algunas técnicas de bioingeniería cumplen funciones de contención por gravedad, que al igual que los procedimientos de ingeniería convencional como muros de contención, deben ser analizadas considerando las condiciones de equilibrio por deslizamiento, volcamiento, capacidad portante y estabilidad global.

## **2.4 MATERIALES EMPLEADOS EN BIOINGENIERÍA**

### **2.4.1 Materiales vegetales vivos**

La importancia de la vegetación en la bioingeniería va desde proporcionar protección contra la erosión superficial hasta ayudar a reforzar el suelo con sus raíces. Los principales factores del uso de plantas vivas son:

- Protección contra el impacto de las gotas de lluvia y los efectos erosivos del agua de escorrentía.
- Aumento y mantenimiento de la capacidad de infiltración.
- Extracción de humedad del suelo.
- Fijación del suelo y aumento de resistencia al cortante por acción de las raíces.
- Prevención de ocurrencia de grietas por desecación.
- Protección contra la fuerza directa del viento sobre el suelo.

El material vegetal debe ser elegido tras una evaluación de las características hidroclimáticas a las cuales estará sometido, así como las condiciones naturales del suelo de la zona de estudio.

Se debe procurar el uso de especies nativas, realizando un proceso de selección que considere no solo su adaptabilidad ecológica a las características del suelo y el clima locales, sino también sus propiedades físicas y mecánicas naturales para la protección y contención del terreno.

### **2.4.2 Materiales inertes**

Cuando las pendientes del terreno son altas, se hace necesario utilizar elementos inertes que ayuden a dar soporte para el correcto establecimiento de la vegetación, y que además sirvan de apoyo en la estabilización de taludes, control de formación de cárcavas y manejo de aguas. Las estructuras fabricadas con materiales no vivos ayudan a dar

soporte al terreno durante el período de germinación, rebrote y crecimiento de raíces, que es cuando las técnicas de revegetalización resultan más vulnerables.

Los materiales inertes empleados en bioingeniería pueden ser de origen natural como madera, rocas y tierra, que pueden ser obtenidos de la misma zona a tratar, hecho que deriva en una reducción de costos de los procedimientos.

También se pueden emplear redes, mantos, mallas y esteras degradables elaboradas a partir de fibras sintéticas o vegetales como yute, paja y coco, que se integren fácilmente con las especies vegetales, y que puedan ser utilizadas como medida de control temporal durante el proceso de establecimiento. En casos críticos de inestabilidad del suelo, pueden ser utilizadas geoceldas sintéticas y elementos metálicos como mallas metálicas y pernos de anclaje.

## **2.5 RECONSTITUCIÓN DEL SUELO**

En los procesos de excavación a cielo abierto la estructura del suelo es alterada, por lo que para aplicar técnicas de bioingeniería es necesario reconfigurarla, buscando obtener unas características similares o mejores que las del suelo original.

La reconstitución del suelo se da en dos etapas:

- Colocación de la capa mineral alterada (horizonte B): Está conformada por materiales bien estructurados, permeables, con poco contenido de humus, con un contenido aproximado del 10% de piedras pequeñas que permitan el crecimiento de raíces y el paso del agua. Se pueden emplear materiales retirados durante el proceso de excavación, o mejorarlo en caso de que éste no posea características óptimas.
- Extendido de la tierra vegetal o capa superior: Debe tener una profundidad máxima de 40 cm, con alto contenido de humus y favorabilidad a los procesos biológicos. Es preferible utilizar el suelo retirado durante la excavación para garantizar su

compatibilidad con las especies de flora nativa, pero también es posible mejorar sus características físicas y químicas para favorecer el establecimiento de la vegetación.

### **3. TÉCNICAS DE BIOINGENIERÍA**

Las técnicas de bioingeniería se pueden clasificar en técnicas de revestimiento o protección, técnicas de estabilización o consolidación, técnicas mixtas y técnicas complementarias.

No todas las técnicas son aplicables a todos los casos, la efectividad del procedimiento adoptado depende de las características particulares de la excavación y del entorno en que esta se encuentra, por eso la viabilidad de la intervención a realizar debe ser considerada y analizada desde la fase de diseño de las obras.

#### **3.1 TÉCNICAS DE REVESTIMIENTO**

Tienen como objetivo principal proporcionar al suelo cobertura y protección contra la erosión superficial. Se utilizan siembras de diversos tipos, apoyadas por mantos y fibras de origen vegetal, que ayudan a dar soporte al material vivo durante el proceso de establecimiento.

Las técnicas más comunes son:

- Hidrosiembra simple: Consiste en la colocación de una película de un lodo constituido por semillas de especies vegetales, agua y abonos orgánicos. Se utiliza en terrenos con una buena proporción de material fino y coloidal, pero con pendientes inferiores a 20°.
- Hidrosiembra con mulching: El "mulching" o acolchado es una cubierta superficial, de fibras origen natural (madera, paja, coco, entre otras) o artificial (sintéticas), empleada sobre la mezcla de la hidrosiembra simple, que actúa como reductor de pérdidas de agua por evaporación y protege las semillas para favorecer su germinación, además de proporcionar elementos nutritivos para las plantas tras su descomposición. Es una

técnica adecuada para terrenos con pendientes hasta 35° y con presencia de erosión de baja intensidad.

- Hidrosiembra con mulching adherido: Es una hidrosiembra con fibras de madera en longitudes y cantidad controladas, incorporadas a la mezcla, que además contiene adherentes naturales de alta viscosidad. Este tratamiento tiene un gran poder protector y posee alta capacidad de retención de agua. Puede ser utilizado en terrenos altamente susceptibles a la erosión, medianamente pobres en contenido de materia orgánica y fracción fina, y con pendiente máxima de 50 °.
- Hidrosiembra de gran espesor: Consiste en la utilización de un lodo rico en materia orgánica (turba y compost) y mulching de fibras de madera, y su utilización es recomendada cuando el sustrato presenta gran deficiencia de materia orgánica como sucede en áreas rocosas. En presencia de pendientes fuertes es posible reforzar el proceso con la colocación de paja picada formando una cubierta sobre la mezcla.
- Trasplante de césped natural: Recubrimiento antierosivo que consiste en el retiro y posterior trasplante de paneles de césped natural. Esta técnica es adecuada para terrenos con bajas pendientes donde no haya movimientos en masa. Los paneles pueden ser fijados con estacas vivas.
- Césped natural en rollos o tepes: Revestimiento de taludes de baja pendiente con rollos o tapetes de césped listo. Técnica adecuada en terrenos donde no haya movimientos activos. Los rollos o tapetes pueden ser fijados con estacas vivas.
- Esteras y mantos de fibras vegetales: Son utilizados en combinación con diversos métodos de siembra, principalmente en taludes propensos a la erosión eólica y por meteorización, y su función es proteger las semillas durante el periodo de germinación. Las estereras y/o mantos son fijados al talud utilizando anclajes, generalmente ganchos metálicos en “U”.

- Geoceldas verdes: Técnica basada en la utilización de geoceldas o redes tridimensionales tipo panal fabricadas a partir de cintas de polietileno de alta densidad o poliéster no tejido, que se fijan al talud con anclajes metálicos, y se utilizan como medida de protección contra la erosión superficial en combinación con siembra o hidrosiembra. También es posible realizar plantación de estacas vivas y arbustos nativos. Su utilización se recomienda en taludes con pendientes pronunciadas, suelos pobres para el establecimiento de vegetación y zonas rocosas. Esta técnica es aplicable en taludes con pendiente máxima de 45°.
- Colchón verde con malla metálica de doble torsión: Utilización de mallas de alambre galvanizado que por tener una alta resistencia a la tensión se emplean principalmente en taludes rocosos sujetos a procesos erosivos. Su durabilidad está determinada por la acidez del suelo. Las mallas cumplen una función de protección de las siembras realizadas con los métodos descritos anteriormente, además es posible realizar la plantación de estacas vivas y arbustos nativos. Esta técnica es aplicable en taludes con pendiente máxima de 55°.

### **3.2 TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN**

Son las técnicas orientadas a la estabilización de suelo entre 2,0 m y 2,5 m de profundidad, por medio de la utilización de plantas de especies leñosas o partes de ellas, las cuales deben tener capacidad de generación de raíces adventicias que eventualmente formen una malla que actúe como refuerzo del terreno. Las principales técnicas de esta categoría son:

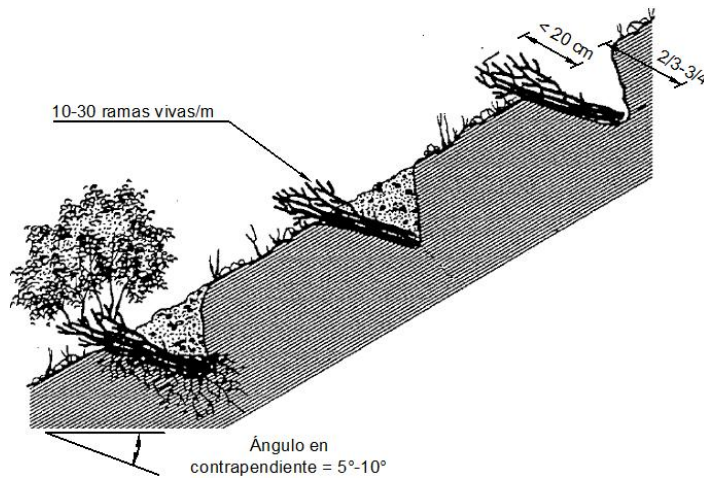
- Estacas vivas: Consiste en la plantación de estacas en el suelo para que estas se desarrollen como plantas completas, generando un sistema de raíces que actúe como reforzamiento del suelo. Las estacas pueden ser utilizadas como anclaje de las redes o mantos de revestimiento al mismo tiempo que cumplen su función de estabilización.
- Plantación de árboles y arbustos: Consiste en la plantación de arbustos y/o árboles jóvenes de especies nativas, producidos en viveros. La siembra se debe realizar en

hoyos del tamaño adecuado para la planta, verificando que las paredes no queden compactadas para permitir el desarrollo de las raíces. Para ayudar al mantenimiento de la planta en la etapa inicial, se pueden utilizar palos tutores para sostenimiento y “mulching” en la base para promover la retención de agua.

Esta técnica es adecuada para taludes con pendientes bajas con presencia de suelo orgánico; los suelos no apropiados pueden ser mejorados con tierra vegetal y fertilizantes. Las siembras de arbustos y árboles se pueden realizar en combinación con esteras de fibras naturales, geoceldas sintéticas y otros tipos de revestimientos; los arbustos pueden ser empleados paralelamente con emparrillados y mallas metálicas, pero los árboles nunca deberán ser combinados con ninguno de estos dos métodos.

- **Trasplante de plantas silvestres y rizomas:** Técnica utilizada para la conservación y propagación de especies difíciles de conseguir en el mercado, o la germinación de semillas no suele ser exitosa. Es una técnica apropiada para canteras, taludes reconformados y zonas de escasa vegetación donde las semillas de especies nativas no están disponibles comercialmente, en entornos hídricos y sustratos no drenantes.
- **Lechos de ramaje:** Consisten en la excavación de escalones o terrazas paralelas en las cuales se realiza la plantación de ramas vivas de especies leñosas o arbustos nativos y su posterior cobertura con material de la excavación. El material vegetal implantado tener longitudes entre 2,0 m y los 4,0 m y debe ser orientado de forma más o menos perpendicular a la superficie del talud. Esta técnica es aplicable a deslizamientos superficiales de material suelto, en taludes con pendiente máxima de 40°.

**Figura 2. Lechos de ramaje**

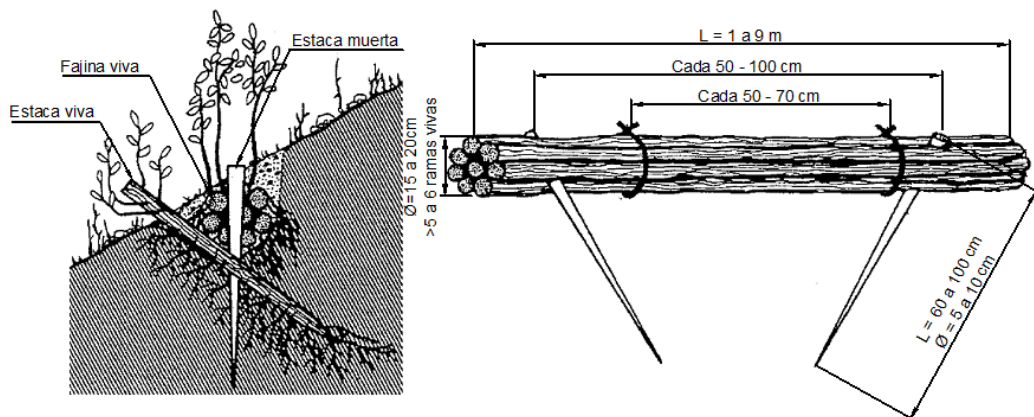


**Fuente:** COITAPAC, 1998

- Fajinas vivas: Las fajinas son fardos cilíndricos elaborados a partir de ramas vivas de plantas leñosas amarradas con sogas de fibras naturales o sintéticas o con alambre, que son fijados al terreno mediante estacas vivas o muertas, en zanjas poco profundas excavadas a lo largo de las curvas de nivel. Es común aprovechar para la parte más fina del material vegetal sobrante de otras técnicas de bioingeniería.

Es una técnica aplicable al control de la erosión superficial en taludes con pendientes entre 30 ° y 35 °.

**Figura 3. Fajinas vivas**



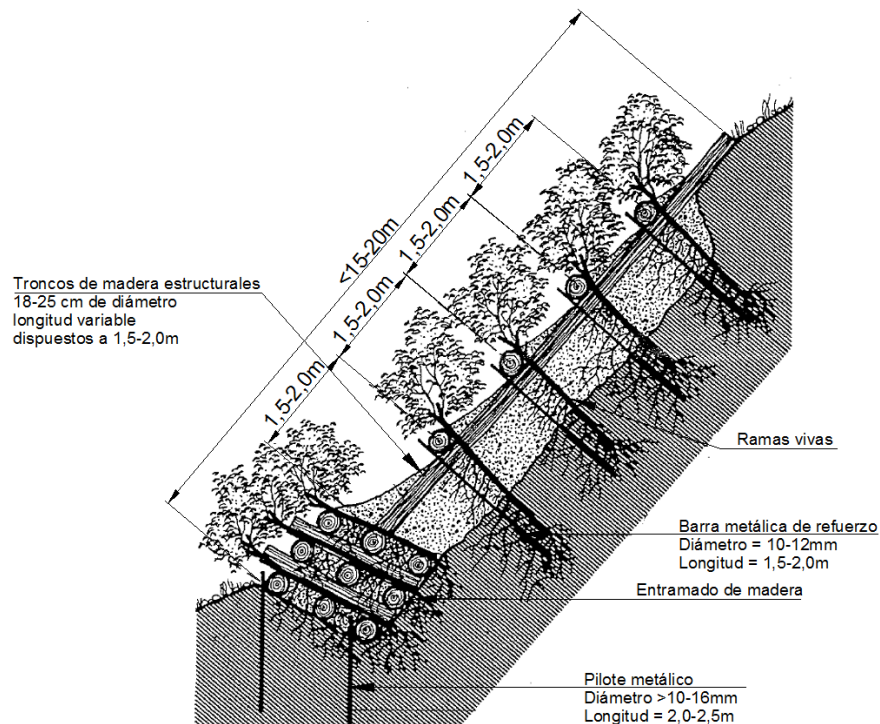
**Fuente:** COITAPAC, 1998

### 3.3 TÉCNICAS MIXTAS DE ESTABILIZACIÓN

Son aquellas que combinan la utilización de material vegetal vivo con materiales inertes como madera, piedra, acero galvanizado, o geosintéticos los cuales deben estar en capacidad de cumplir la función de estabilización bien hasta que las plantas se desarrollen para aportar resistencia al sistema, o en el largo plazo cuando la vegetación solo cumpla fines paisajísticos.

- Emparrillado vivo: Grilla de madera construida con palos verticales y horizontales; los troncos horizontales van clavados sobre los verticales, y éstos a su vez se apoyan sobre un tronco o un entramado resistente. Toda la estructura va anclada al terreno con barras de acero, y entre las celdas del entramado se siembran estacas vivas o plantas enraizadas de especies leñosas y luego se llenan con tierra. Esta técnica es aplicable en taludes con pendientes entre 45° y 60° que presentan fenómenos erosivos.

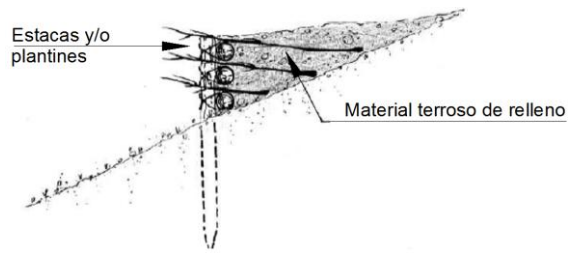
**Figura 4.** Emparrillado vivo – Vista lateral



**Fuente:** COITAPAC, 1998

- Trinchos vivos: Consiste en la plantación estacas vivas o muertas en el suelo, y posterior colocación y amarre de palos horizontales, entre los cuales se debe dejar espacio suficiente para la siembra de plantines ó estacas vivas, que también pueden ser sembrados por encima de los trinchos, rellenando posteriormente con material terroso. Esta técnica es apropiada para el control de la erosión superficial.

**Figura 5.** Trinchos vivos - Vista lateral

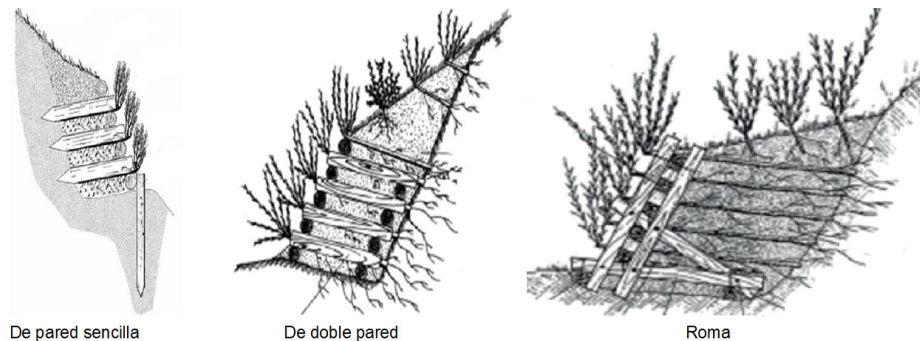


**Fuente:** Cornelini, Sauli y Preti, 2006

- Entramados vivos: Son estructuras de contención por gravedad, conformadas por palos de madera que forman cámaras en varios niveles, en las que se siembran ramas vivas o especies arbustivas, rellenando posteriormente las cámaras con materiales inertes de la zona como palos, piedras y tierra.

Dependiendo de la configuración de las cámaras, se pueden encontrar entramados de pared sencilla, de doble pared, de cajón triangular o "latino", tipo roma, entre otros; el objetivo de aplicación es el mismo y para un rendimiento óptimo pueden llegar a tener entre 2,0 y 2,5 m de altura.

**Figura 6.** Algunos tipos de entramados vivos



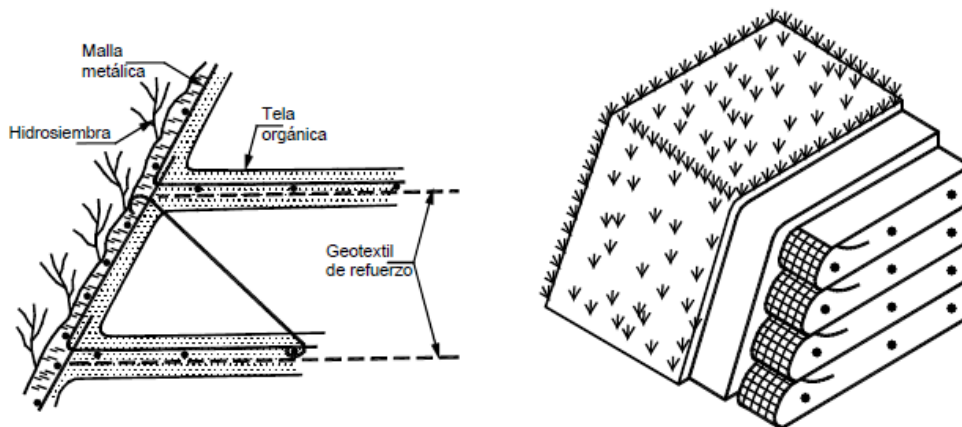
**Fuente:** Cornelini, Sauli y Preti, 2006

- Muros verdes de tierra reforzada: Son obras que consisten en la utilización de mallas metálicas y materiales sintéticos como geotextiles y geomallas como refuerzo de un terraplén de suelo conformado en capas.

“Un problema importante de los geotextiles es su deterioro con la luz ultravioleta del sol y por esto se requiere que este material permanezca cubierto” (Suárez, 2001), para el caso de esta técnica se puede utilizar hidrosiembra o la plantación de ramas vivas.

Los muros en tierra reforzada son utilizados como obras de contención en el pie del talud. Aunque es posible configurar muros con pendientes exteriores casi verticales, es recomendable no exceder los 65° para permitir un correcto establecimiento de la vegetación.

**Figura 7.** Tierra reforzada vegetalizada



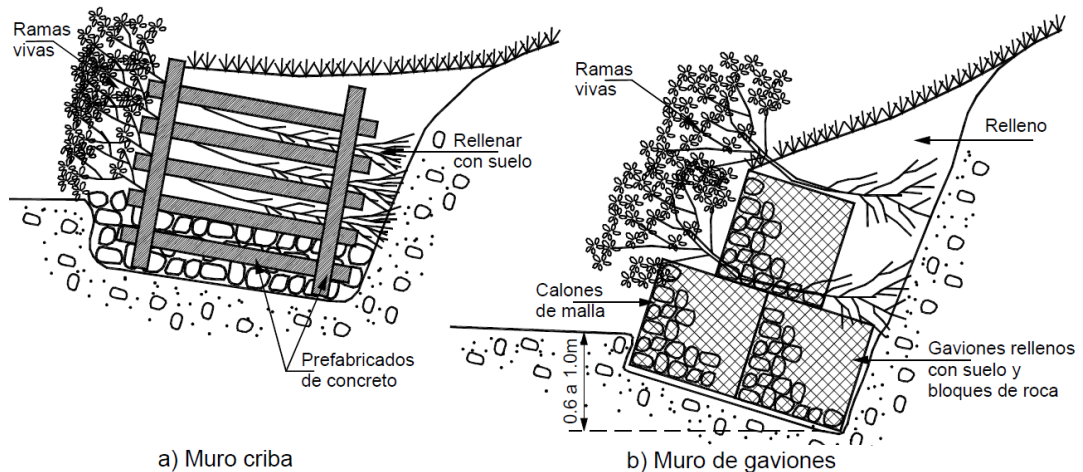
**Fuente:** Suárez, 2001

- Gaviones verdes: Los gaviones son cajones rectangulares de malla de alambre galvanizado de doble torsión o malla hexagonal, rellenos de cantos o roca triturada de mínimo 15 cm de diámetro. En esta técnica se colocan ramas de especies arbustivas entre módulos de gaviones o en el interior de los mismos, rellenándolos también con suelo orgánico para facilitar el establecimiento de la vegetación.

Los gaviones son estructuras de contención por gravedad, que por sus condiciones de flexibilidad, permeabilidad y adaptabilidad de sus materiales a los ecosistemas permiten la restauración ecológica espontánea; al combinarlos con plantas vivas se estimula el proceso de restauración y los sistemas radiculares desarrollados por las plantas ayudan a reforzar la estructura.

- Muro criba vegetalizado: El muro criba es una estructura modular de contención constituida por elementos prefabricados de concreto o madera; los espacios generados entre módulos se rellenan con suelo y estacas vivas que deben atravesar la estructura completamente para permitir el desarrollo de raíces dentro del suelo por detrás del muro. Procedimiento aplicable a taludes con pendientes hasta 60°. Es necesario considerar las posibles limitaciones en el crecimiento de vegetación por déficit de agua agravado por la presencia de los módulos de concreto.

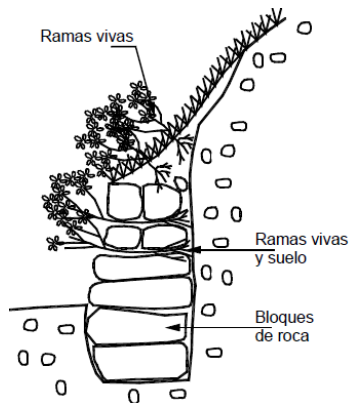
**Figura 8.** Muro criba y muro de gaviones



**Fuente:** Suárez, 2001

- Muros de piedra vegetalizados: Muros de altura máxima de 1,50m, contruidos con piedras cuadradas y suelo orgánico, con plantación de ramas vivas o arbustos nativos entre capas. Las ramas deben atravesar completamente la estructura para permitir el desarrollo de raíces en el suelo trasero.

**Figura 9.** Muro de piedra vegetalizado



**Fuente:** Suárez, 2001

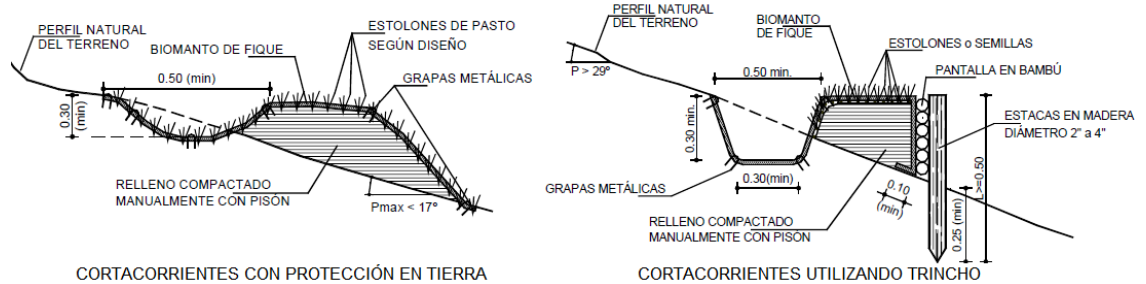
### 3.4 TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS

Son procesos que cumplen funciones complementarias a las de las técnicas descritas anteriormente, mejorando sus resultados sin cumplir directamente funciones de estabilización o protección. A continuación se presentan las técnicas complementarias más representativas en el campo del presente trabajo.

- **Cunetas:** Son zanjas o canales que se hacen para conducir el agua de escorrentía. En las obras de ingeniería que impliquen la conformación de taludes se deben prever cunetas de coronación (en la parte alta del talud) así como cunetas perimetrales. Para la protección de estos canales se pueden emplear piedras, biomantos, mantos sintéticos, fibras sintéticas fijadas con pegante que permiten el establecimiento de vegetación, entre otras.
- **Diques de corona:** Son pequeños terraplenes, cubiertos con vegetación u otra cubierta protectora, construidos en la corona del talud para impedir el paso del agua de escorrentía.
- **Cortacorrientes o canales interceptores:** Son canales transversales al talud que se construyen para captar y evacuar el agua de escorrentía, con el fin de evitar que ésta haga un recorrido muy largo a través del talud, ganando energía que pueda resultar

destruictiva incluso a pesar las medidas bioingenieriles de protección adoptadas. El fondo de los canales debe ser protegido con piedras, biomantos o geotextiles. De acuerdo con las condiciones particulares de cada talud, los cortacorrientes pueden requerir además del canal, un dique de protección en tierra o con trinchos.

**Figura 10.** Cortacorrientes



**Fuente:** Suárez, 2001

- Filtros vivos: Consisten en la excavación de zanjas y posterior superposición de capas de material vegetal vivo con alta capacidad de reproducción. Aunque el material más usado es la guadua, también es posible utilizar fajinas vivas elaboradas con ramas de especies nativas. “Dependiendo de la saturación del terreno, los filtros se pueden establecer en forma de espina de pescado. En zonas de pendientes altas, los filtros deben ir fijados al terreno con trinchos vivos escalonados,” (Rivera Posada, 2011) en este caso los trinchos cumplen un papel adicional como disipadores de energía.

**Fotografía 1.** Filtros vivos de guadua



**Fuente:** Rivera Posada, 2011

## **4. CASOS EXITOSOS**

En este capítulo se presentan algunos casos exitosos de aplicación de técnicas de bioingeniería, como herramientas para la restauración ecológica de áreas degradadas por excavaciones a cielo abierto.

### **4.1 TRATAMIENTOS BIOINGENIERILES EN LA VÍA A LA VEREDA VILLARROSA EN ARGELIA, VALLE DEL CAUCA**

Entre los años 2002 y 2003 se llevaron a cabo en el municipio de Argelia, en el departamento de Valle del Cauca, Colombia, varios procesos de restauración de áreas rurales degradadas principalmente por actividades relacionadas con el sector cafetero pero también algunos fenómenos provocados por medidas no tomadas durante la conformación de caminos veredales.

#### **4.1.1 Sitio de la intervención**

Áreas circundantes al camino vecinal de la vereda Villarrosa.

#### **4.1.2 Antecedentes**

Deterioro de vía veredal por deficiente o inexistente manejo de las aguas provenientes del talud superior, conformadas principalmente por flujos subsuperficiales, escorrentía y aguas de una quebrada que atraviesa el sector, hecho que en épocas de altas precipitaciones provocaba afectación de los taludes bajos y subsecuente formación de hundimientos en la banca que impedían el paso vehicular. Soluciones previas incluyeron la construcción de muros de contención en concreto y gaviones que quedaban destruidos por las avalanchas de la quebrada al inicio de nuevos períodos invernales, conduciendo a un diagnóstico erróneo de la presencia de una falla geológica sin solución.

#### 4.1.3 Entidades encargadas de la intervención

Las actividades bioingenieriles fueron desarrolladas por la Fundación Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria CIPAV y la Corporación Ecoambientes, con fondos provenientes de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, en áreas circundantes al camino vecinal de la vereda Villarrosa.

#### 4.1.4 Descripción de las medidas adoptadas

- Manejo de las aguas en la vía: Se llevó a cabo la canalización de la quebrada bajo la banca de la vía con una tubería de concreto de diámetro mayor a 20 pulgadas. La entrada y la salida de la tubería fueron protegidas con trinchos vivos escalonados para evitar la socavación del fondo del cauce en esas zonas. (Ver Fotografía 2)

**Fotografía 2.** Trinchos vivos



**Fuente:** Ecoambientes

- Manejo de cunetas: Para evitar acumulaciones de agua sitios puntuales de las cunetas que bordean la vía, que posteriormente pudieran causar daños por desbordamiento en temporadas de lluvias, fueron previstas ventanas de evacuación de aguas de escorrentía cada 10 a 15 m a lo largo de las mismas, para inducir salidas de agua controladas. Se implementó la técnica de Manejo Integrado de Arvenses que implica el

retiro selectivo de maleza para no dejar zanjas completamente descubiertas y de esta manera evitar la socavación.

- Construcción de filtros en la banca de la carretera: Se llevó a cabo la construcción de filtros vivos en guadua que atraviesan la vía.
- Manejo de aguas de escorrentía del talud superior: Para reducir la velocidad de las aguas de escorrentía que bajan por el talud superior hacia la vía, se realizó la construcción de disipadores simples de energía con estacas vivas de nacedero (*Trichanthera gigantea*), sembradas cada 1 m a través de la pendiente de la ladera.
- Protección del talud superior: Se realizó siembra de maní forrajero (*Arachis pinto*) como medida de protección contra el efecto directo de la lluvia sobre el talud.
- Estabilización del talud inferior: Se realizó la construcción de terrazas escalonadas en tierra con filtros de guadua y reforzadas con estacas vivas de nacedero.

**Fotografía 3.** Terrazas escalonadas en tierra y filtro de guadua



**Fuente:** Ecoambientes

## 4.2 RESTAURACIÓN DE TALUD EL TABLAZO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE ACUEDUCTO DE POPAYÁN

### 4.2.1 Sitio de la intervención

Planta de tratamiento de agua potable El Tablazo, Municipio de Popayán, Colombia.

### 4.2.2 Antecedentes

Desprendimiento de talud de vía urbana pavimentada, por pendiente pronunciada (85%) con influencia de aguas de escorrentía.

### 4.2.3 Entidades encargadas de la intervención

Convenio Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD, Universidad de Florencia Italia y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A. E.S.P. y la Fundación Pro Cuenca Rio Las Piedras.

### 4.2.4 Descripción de las medidas adoptadas

Se realizó disminución de la pendiente del talud con la construcción de dos niveles de entramados vivos de tipo triangular o “latino”. Al obtener una pendiente del 48% en la parte alta del talud después del primer tratamiento, se aplicó la técnica de emparrillado vivo, empleando cobertura herbácea y arbustiva.

#### **Fotografía 4.** Tratamientos bioingenieriles Talud El Tablazo, Popayán



Construcción de entramados

Construcción de Emparrillados

Vista final del talud

**Fuente:** Recaman, 2013

## 5. ESTUDIO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE BIOINGENIERÍA DISPONIBLES PARA EL CONTROL DE MECANISMOS DESESTABILIZANTES DEL TERRENO

Las diferentes técnicas de bioingeniería permiten tomar acciones para el control de eventos desestabilizantes del terreno que pueden presentar resultados similares y en ocasiones mejores que los procedimientos tradicionales de ingeniería, en la Tabla 1 se presentan alternativas de los dos ámbitos para controlar diferentes factores que intervienen en la estabilidad del terreno.

**Tabla 1.** Procedimientos tradicionales de ingeniería vs. Técnicas de bioingeniería

MECANISMO A INTERVENIR	TRATAMIENTO CON TÉCNICAS TRADICIONALES	TRATAMIENTO CON TÉCNICAS DE BIOINGENIERÍA
Erosión superficial	Conformación de terrazas. Recubrimiento con mantos geosintéticos.	Conformación de terrazas vivas, revestimiento con mantos geosintéticos y fibras naturales, trinchos vivos, lechos de ramaje, empradizado, hidrosiembra.
Erosión regresiva	Conformación de terrazas y disposición de estructuras de contención con sacos de suelo-cemento.	- Conformación de terrazas vivas. Emparrillados vivos y entramados vivos de pared doble y sencilla - Reconstitución del suelo y revegetalización.
Aguas superficiales	- Canales de drenaje en concreto. Estructuras de disipación. - Cunetas en concreto, piedra pegada, sacos de suelo-cemento. Trincheras. - Tubos de drenaje.	- Sistemas de drenaje filtros de guadua y fajinas vivas. - Barreras de disipación de energía con trinchos vivos.
Deslizamientos	- Estructuras de contención en el pie del talud: Muros de concreto armado, muros de concreto ciclópeo. - Reconstitución de taludes: reducción de la pendiente por medio de terrazas.	- Entramados vivos, gaviones verdes. - Reconstitución de la pendiente con terrazas en tierra reforzada o con trinchos vivos, revegetalización de la superficie.
Flujos de detritos y tierra	Dique en concreto armado, dique filtrante, gaviones. Barreras de control de flujo con mallas metálicas.	Diques de madera y roca. Trinchos vivos escalonados. Diques con gaviones vivos.
Desprendimientos	- Re perfilado de taludes. - Anclajes y revestimiento con concreto lanzado y malla electro soldada. - Tendones de anclaje y pantalla de concreto. - Medidas preventivas: gaviones, túnel falso en concreto.	- Re perfilado de taludes. - Mallas de alambre ancladas revegetadas. - Muro de contención en tierra reforzada revegetada.

**Fuente:** Las autoras con base en Sauli, Cornelini y Preti, 2006

La posibilidad de utilización de las diferentes técnicas puede ser ampliamente influenciada dependiendo de las características particulares del medio a intervenir. Un parámetro crucial para la definición de la técnica a emplear es la pendiente, pues a medida que ésta aumenta crece también la complejidad tecnológica de la intervención, aunque se debe tener en cuenta que con la combinación de varias alternativas es posible mejorar los efectos de las mismas. En la Tabla 2 se presenta una distribución de las principales técnicas de acuerdo con la pendiente máxima de aplicación.

**Tabla 2.** Pendiente del talud vs. Técnicas de bioingeniería

PENDIENTE MÁXIMA DEL TALUD	TÉCNICA DE BIOINGENIERÍA
0° - 20°	Hidrosiembra simple
35°	Fajinas vivas, trinchos vivos
40°	Lechos de ramaje
45°	Entramado vivo, Geoceldas vivas
50°	Emparrillado vivo
55°	Colchón verde con malla metálica de doble torsión
65°	Tierra reforzada vegetalizada

**Fuente:** Las autoras

En cuanto a la selección de especies vegetales y su función en el sistema bioingenieril con respecto a los materiales inertes, se deben analizar las diferentes situaciones y combinaciones que se pueden utilizar. La Tabla 3 se presenta una relación de los materiales vivos e inertes y su papel dentro de la intervención de bioingeniería, de acuerdo con el planteamiento de Sauli, Cornelini y Preti 2006.

**Tabla 3.** Clasificación de técnicas según la función de los materiales

<b>Material</b>	<b>Función</b>	<b>Ejemplo</b>
Sólo plantas vivas	Función técnica primaria	Lechos de ramaje
Plantas vivas más material inerte	Plantas vivas con función técnica primaria más materiales biodegradables dominantes (madera, biomantos).	Entramado vivo
	Plantas vivas con función técnica secundaria más materiales no biodegradables dominantes: natural (piedra, tierra) y artificial (plástico)	Gaviones verdes, tierra reforzada verde, geosintéticos reverdecidos, colchones de malla metálica.
	Plantas vivas sin función técnica más que la restitución de la unidad ecosistémica más material artificial dominante	Muro criba verde
Sólo material inerte	Función técnica	Muros de contención, pantallas de concreto con anclajes.
Sólo plantas vivas para acción morfológica	Para re naturalización y aumento de la biodiversidad	Siembras simples
Material inerte natural	Fomento de la colonización espontánea	Esteras y biomantos para protección de vegetación.
	Construcción de unidades morfológicas	Canalizaciones y diques de madera y piedra, diques de tierra para conservación del hábitat.
	Mantenimiento de biodiversidad de fauna	Tubos para anfibios, pasos superiores para ungulados, rampas para peces.

**Fuente:** Las autoras con base en Sauli, Cornelini y Preti, 2006

## **6. CASO DE ESTUDIO: CUENCO DE DISIPACIÓN DEL VERTEDERO DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO DEL RÍO SOGAMOSO**

Para el manejo de crecientes que generen volúmenes de agua superiores a la capacidad de almacenamiento del embalse, el Proyecto Hidroeléctrico del Río Sogamoso prevé un vertedero de canal abierto ubicado en el estribo izquierdo de la presa, operado por compuertas y que disipa su energía en un cuenco conformado en la zona de descarga al río.

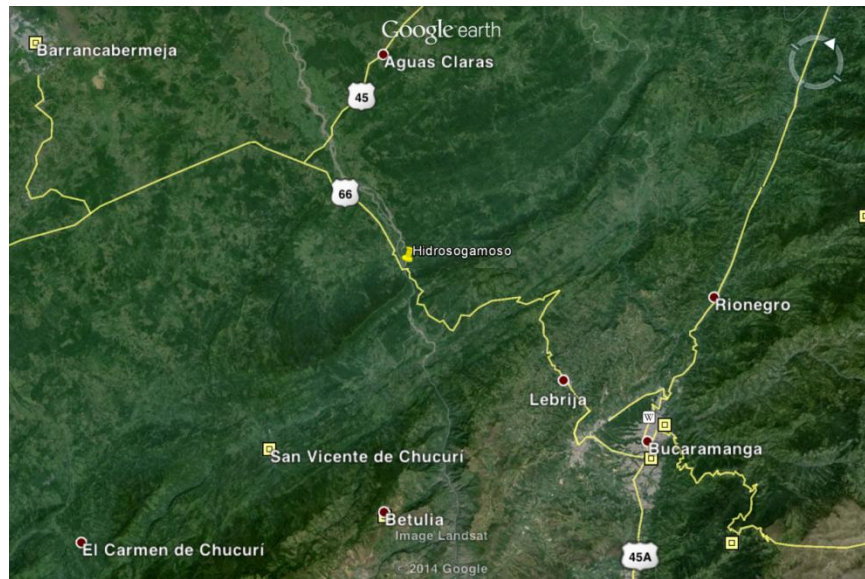
Para la conformación de la zona de descarga, el diseño requiere una excavación del talud paralelo, cuya protección se estudiará en el presente capítulo. Como base para la elaboración de la caracterización del área de estudio, fue utilizada la información del Estudio de Impacto Ambiental del proyecto y los documentos de las Especificaciones Técnicas de Construcción.

### **6.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA**

#### **6.1.1 Localización**

El proyecto Hidroeléctrico Sogamoso está localizado en la cuenca del río Sogamoso, a una distancia aproximada de 51 km aguas abajo de la confluencia de los ríos Suárez y Chicamocha y a 75 km, de la confluencia del río Sogamoso con el río Magdalena. (Ver Figura 11)

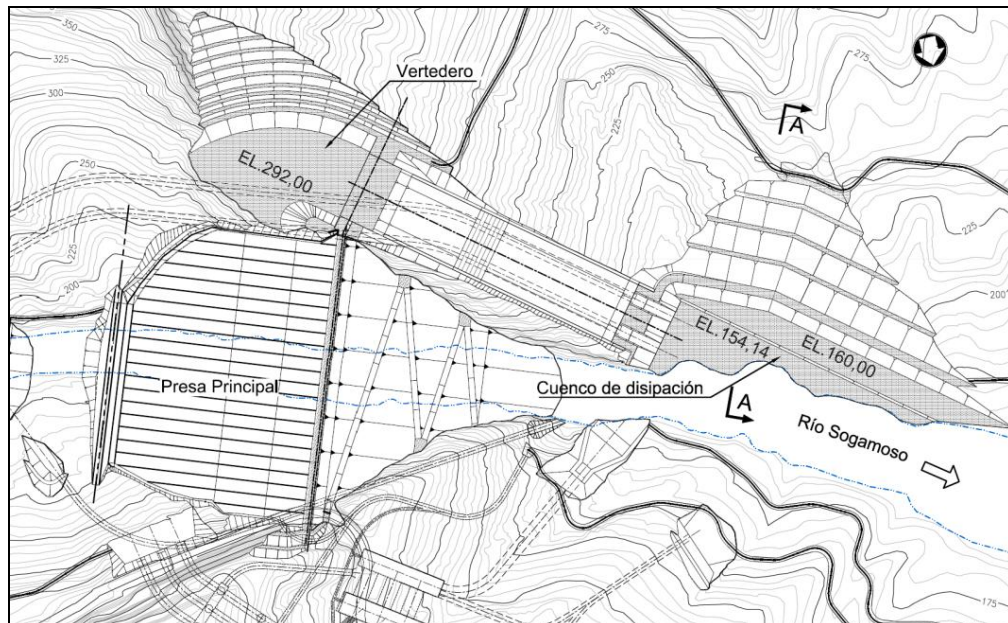
**Figura 11.** Localización general proyecto Hidrosogamoso



**Fuente:** Google Earth, 2014

El cuenco de disipación del vertedero se encuentra localizado en la margen izquierda del río Sogamoso, aguas abajo del sitio de la presa. (Ver Figura 12)

**Figura 12.** Localización del cuenco de disipación

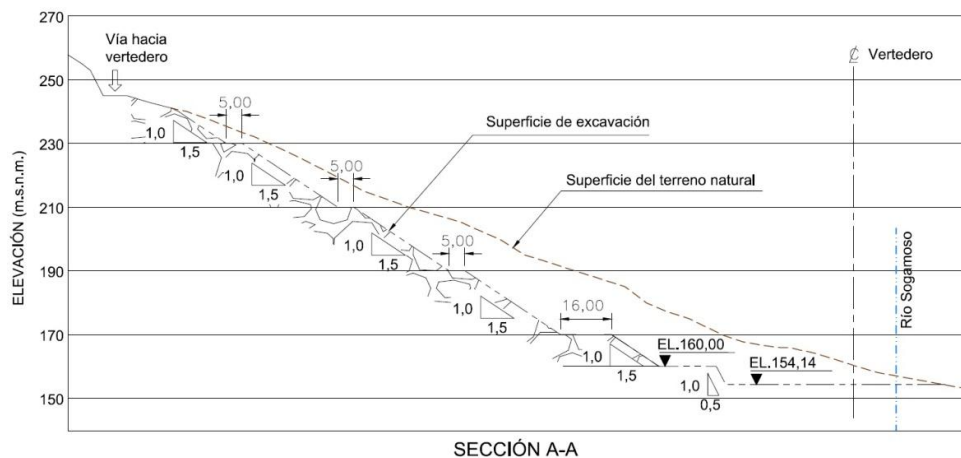


**Fuente:** Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso

### 6.1.2 Topografía

Las obras en la zona del cuenco de disipación consisten en la conformación de la zona de descarga entre las cotas 154 msnm y 160 msnm; adicionalmente, la ladera debe ser conformada por encima de este nivel, para garantizar que las condiciones de flujo del vertedero no se vean afectadas por la acumulación de material socavado. La configuración de los taludes de excavación, con bermas de 5,0 m de ancho cada 20 m verticales y taludes con pendientes 1,5H:1,0V (aproximadamente 34°), se muestra en la Figura 13.

**Figura 13.** Sección del talud del cuenco de disipación<sup>1</sup>



**Fuente:** Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso

### 6.1.3 Geología

Las rocas de la zona pertenecen a la formación Esmeraldas (Tee), conformada principalmente por arcillolita blanda a dureza media, de aspecto masivo con nódulos ferruginosos, con algunas intercalaciones de arenisca y limolita de 0,50 m de espesor.

En el área se destacan dos niveles de arenisca denominados La Cristalina y Oleoducto, de 15 m de espesor, que forman dos cordones alargados norte-sur, separados unos 100

<sup>1</sup> La sección A-A está indicada en Figura 12

metros por arcillolita. La arenisca en estos niveles es de dureza media a dura, en sectores laminada, de matriz arcillosa, poco cementada y ligeramente meteorizada.

Desde el punto de vista estructural, el sector del cuenco se encuentra afectado por cuatro sistemas de diaclasas, en la Tabla 4 se indican los datos de rumbo y buzamiento de los sistemas encontrados.

**Tabla 4.** Rumbo y buzamiento de los sistemas de diaclasas del cuenco

SISTEMA	RUMBO	BUZAMIENTO
S - 1	N 70° W	70° - 85° S
S - 2	N 30° - 50° W	50° - 75° NE
S - 3	N 5° - 10° W	65° - 80° NE 50° - 65° SE
S - 4	N 30° - 40° E	34° - 35° NW

**Fuente:** Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso

En la **Tabla 5** se presentan las principales características de los sistemas de diaclasas antes mencionados.

**Tabla 5.** Características de los sistemas de diaclasas de la zona del cuenco

SIST.	ESPACIAMIENTO	PERSISTENCIA	SUPERF.	RELLENO	METEORIZACIÓN
S - 1	2,0 a 3,0 m	>2,0 m	Rugosa a lisa	Sin relleno	Moderada
S - 2	0,15 a 3,0 m	>5,0 m	Lisa	Arcilla y/o limo	Fuerte
S - 3	0,2 a 1,0 m	>2,0 m	Ligeramente rugosa	Arcilla y/o limo	Moderada
S - 4	0,3 a 2,0 m	>5,0 m	Lisa	Sin relleno	Leve

**Fuente:** Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso

#### **6.1.4 Geomorfología**

En el área de estudio, predominan las zonas geomorfológicas Colinas (Col) y Espinazos (Esp). Espinazos y Colinas se refieren a zonas de montañas cuya altura y forma se deben a plegamientos de las rocas superiores de la corteza terrestre y que conservan rasgos de dichas estructuras a pesar de los procesos de denudación.

#### **6.1.5 Tipos de suelo**

Los suelos de la zona de estudio son medianamente desarrollados, con presencia de horizontes A, B y C, de textura arcillolimoso color café oscuro con espesores inferiores a 50 cm; son ligeramente húmedos, cohesivos, expansivos, poco permeables y moderadamente susceptibles a fenómenos de remoción en masa.

#### **6.1.6 Parámetros climatológicos**

El estudio de parámetros climatológicos se realizó con base en la información registrada por la estación climatológica principal Trigueros, operada por el IDEAM, y ubicada en área cercana a las obras del Proyecto, para el período comprendido entre los años 1996 y 2006.

- **Temperatura media:** La temperatura media anual multianual es de 27,6°C, con variaciones entre 27,2°C y 28,2°C. La temperatura media máxima se presenta en agosto y la temperatura media mínima se da en el mes de noviembre.
- **Humedad relativa:** La humedad relativa media anual multianual es del 76%, presentando sus valores más altos en los períodos de abril a junio y octubre a diciembre, siendo mayo el mes en el cual se registra la humedad relativa media más alta (80%). El mes con menor humedad relativa media es agosto con el 71%.

- **Evaporación:** La evaporación total media anual multianual es de 1383 mm. La mayor evaporación mensual es de 131 mm y se presenta en el mes de julio, mientras que la menor evaporación ocurre en el mes de noviembre con un valor de 99,5 mm.
- **Velocidad del viento:** La velocidad media anual multianual del viento es de 1,62 m/s, presentando los registros medios máximos de velocidad entre los meses de enero a marzo y de julio a septiembre. La mayor velocidad media mensual es de 1,80 m/s y se da en el mes de agosto, mientras que en mayo se registra el menor valor con 1,52 m/s.
- **Precipitación:** Para el análisis del comportamiento de la precipitación en la zona del Proyecto, se utilizaron los registros de la estación climatológica Puente La Paz entre los años 1979 y 2007. La precipitación media anual multianual es de 3204,7 mm. Los períodos húmedos se presentan de septiembre a noviembre y de abril a mayo, mientras los períodos secos van de junio a agosto y de diciembre a marzo.

La mayor precipitación media mensual se presenta en octubre (468,6 mm), mientras enero es el mes más seco (133 mm).

#### **6.1.7 Cobertura vegetal**

Previo al inicio de las obras, la zona del cuenco de disipación del vertedero estaba conformada principalmente por la unidad vegetal Pastizales (P), compuesta por vegetación herbácea de potreros con predominio de poáceas nativas y mejoradas, mezcladas con elementos herbáceos, arbustivos menores y pequeñas lianas tendidas.

#### **6.1.8 Excavación y protección del talud**

Los taludes finales de excavación quedaron conformados por arcillolita y arenisca. En la parte alta y en los laterales de los taludes se presenta contacto roca-suelo residual más coluvión, situación que durante el período de excavación generó flujo de detritos, agravado por agentes atmosféricos como la humedad, el viento y las precipitaciones.

El diseño inicial de protección del talud, plantea una cobertura con concreto lanzado de 7,50 cm de espesor en las bermas, mientras que para los taludes se definió realizar empedrado con *brachiaria decumbens* en conjunto con perforaciones de drenaje de 15,00 m de longitud espaciados cada 15,00 m a lo largo de las bermas.

**Fotografía 5** . Trabajos iniciales de excavación y protección del talud



**Fuente:** Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso

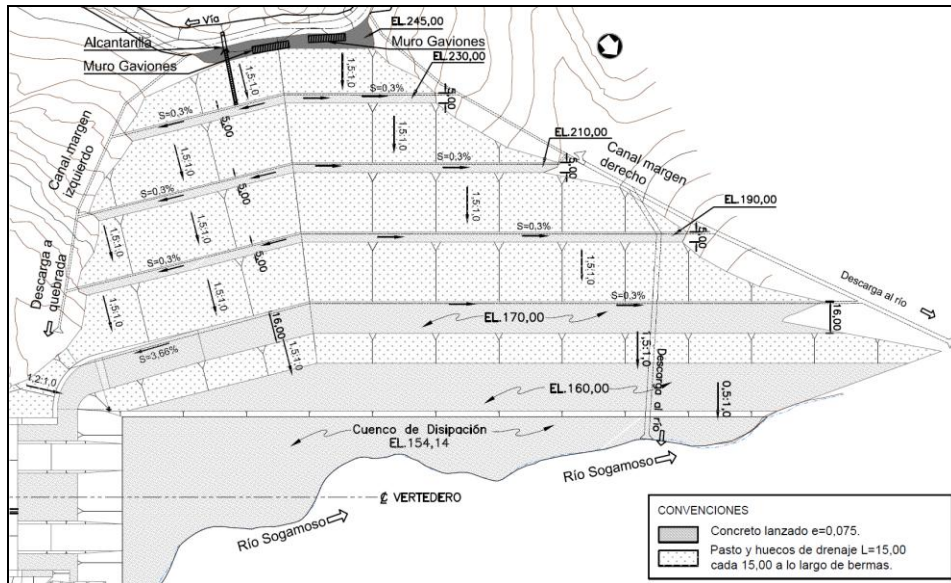
Como se indica en la Figura 14, un canal colector en concreto reforzado de 1,0 m de ancho por 0,80 m de altura bordea el talud, para conducir el agua de escorrentía procedente de la cuneta de la vía de la parte alta, así como de las bermas del talud de la estructura. Adicionalmente, un canal escalonado para descole de la alcantarilla de la vía superior baja por la zona central del talud hasta la primera berma (elevación 230 m.s.n.m.) para hacer su descarga en la cuneta que luego conduce el agua hasta el canal perimetral.

Para controlar a largo plazo el flujo de detritos del coluvión inestable a nivel de la vía superior, el diseño contempla la construcción de dos muros de gaviones.

Los trabajos de protección del talud planteados en el diseño, han sido ejecutados en su totalidad, pero durante períodos lluviosos han sufrido daños considerables

como se aprecia en la Fotografía 6, debido a que el empedrado instalado está completamente expuesto al impacto del agua y los taludes de más de 30 m de longitud con pendientes de casi 34° facilitan que el agua alcance velocidades altas lo que promueve el desprendimiento de la vegetación.

**Figura 14.** Protección de talud del cuenco de disipación en diseño original



**Fuente:** Las autoras con base en información suministrada por el Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso

**Fotografía 6.** Izquierda: Imagen tomada durante evento de lluvia. Derecha: Empedrado dañado por desprendimiento de material del talud



**Fuente:** Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso

Como se observa en la Fotografía 7 algunos taludes conservan el empradizado, pero en la parte central éste se ha perdido por completo.

**Fotografía 7.** Estado actual del talud



**Fuente:** Las autoras

## **6.2 RECUPERACIÓN DEL ECOSISTEMA**

En el caso del cuenco de disipación del vertedero del proyecto Hidrosogamoso no es posible hablar de una restauración ecológica debido en primera instancia a la alteración morfológica de la zona que no puede ser reconstituida a su estado original debido a la función hidráulica de la misma dentro del proyecto. Por otra parte la cercanía a las obras puede afectar en cierto grado las funciones ecosistémicas.

Las técnicas de bioingeniería propuestas en este numeral están encaminadas a lograr una rehabilitación de la zona degradada, donde se tiene como principal propósito recuperar algunos de los servicios ecosistémicos mediante el establecimiento de especies vegetales nativas, sin necesidad de recuperar completamente la estructura del ecosistema.

Previo a la iniciación del proceso de rehabilitación del talud es indispensable obtener la siguiente información:

- Listado de especies vegetales presentes.
- Abundancia de las especies más comunes, a partir de transectos de vegetación u otras medidas cuantitativas.
- Descripción de la estructura de la vegetación (densidad de individuos de las especies dominantes, altura, distribución espacial).

Lo ideal es que las especies nativas seleccionadas dentro del proceso de rehabilitación sean de las mismas extraídas en el aprovechamiento forestal ejecutado en el área del cuenco, o en otras áreas del proyecto.

### **6.2.1 Procedimiento general para la rehabilitación del talud**

Se ha considerado que la pendiente y el tipo de material que va a utilizarse como sustrato limitan y condicionan el establecimiento de la vegetación. El proceso de rehabilitación debe contemplar los siguientes pasos:

**Paso 1.** Establecimiento del sistema de drenaje (manejo de aguas)

**Paso 2.** Protección contra la erosión. Obtención de los sustratos edáficos

**Paso 3.** Selección de especies nativas arbóreas y arbustivas

**Paso 4.** Siembra de *Brachiaria decumbens* y plantación de árboles y arbustos nativos

**Paso 5.** Mantenimiento

## **6.3 SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE BIOINGENIERÍA**

Para la selección de técnicas a aplicar se tienen en cuenta los siguientes criterios:

### **6.3.1 Manejo de aguas**

De acuerdo con el diseño inicial, se realizaron obras de drenaje profundo y drenaje superficial. Los fenómenos erosivos en el talud del cuenco se deben principalmente al manejo de aguas de la vía, pues las estructuras de drenaje no cuentan con la capacidad

suficiente para los eventos de lluvia que ocurren en la zona. En la Fotografía 9 se aprecia socavación a los lados del canal de concreto, y aguas abajo del mismo se presenta una vertiente natural y parte del agua captada por la cuneta de la vía tiende a correr por ella. Por otra parte, la cuneta de la berma de la elevación 230 m.s.n.m no tiene la capacidad suficiente para recibir el agua de la alcantarilla de la vía superior, por lo que se desborda y genera el daño de la cobertura vegetal de la parte baja.

El canal existente debe ser reemplazado por uno diseñado con la capacidad adecuada para el caudal que recibe, y que conduzca el agua de la alcantarilla de la vía de manera controlada a través del talud, por lo menos hasta la berma de la elevación 170 m.s.n.m. De acuerdo con las técnicas de bioingeniería evaluadas, el filtro de guadua sostenido por trinchos vivos escalonados que también cumplan función de disipación de energía, es una técnica que se adapta a las condiciones y necesidades del talud.

### **6.3.2 Construcción de filtro vivo con guadua sostenido con trinchos vivos**

**Objetivo:** Controlar las aguas procedentes de la alcantarilla de la vía superior y recuperar el equilibrio de humedad en la parte alta del talud.

**Ventajas:** Al realizar sostenimiento del filtro con trinchos vivos escalonados estos cumplirán también un papel en la disipación de la energía del agua captada por esta estructura, evitando así socavación del canal y daños en la protección del talud.

**Consideraciones especiales:** Los canales con trinchos escalonados en taludes favorecen la acumulación de sedimentos, lo que puede conducir al taponamiento del filtro e incluso el volcamiento de los trinchos, por lo cual éstos no deben ser muy altos (más de 1,0 m) y se debe considerar un vertedero que permita el paso libre del agua, y además un babero o disipador de energía en la base del vertedero para impedir el impacto directo del agua sobre el lecho y subsecuente socavación<sup>2</sup>. En el caso propuesto, los palos de guadua del filtro actúan como protección del lecho del canal.

---

<sup>2</sup> RIVERA POSADA, José Horacio. Construcción de Trinchos Vivos para Conducción de Aguas de Escorrentía en Zonas Tropicales de Ladera. Manizales, Colombia. 2001.

**Procedimiento:**

- Excavar la zanja según las dimensiones que arroje el diseño hidráulico.
- Remover la tierra del fondo y las paredes de la zanja para facilitar la implantación de la vegetación.
- Sellar los extremos de las guaduas con tabiques o tapones naturales.
- Colocar a lo largo de la zanja cuatro o cinco capas o tendidos de guaduas, utilizando preferiblemente guaduas jóvenes (menores de dos años) para facilitar el rebrote.
- Colocar las estacas verticales o soporte del trincho, ancladas en el terreno de 1,0 m a 2,0 m, dependiendo de la profundidad a la que se encuentre el suelo firme.
- Colocar estacas de anclaje lateral para evitar volamiento (mínimo 1,0 m de anclaje).
- Colocar guaduas horizontales para el atraque del filtro y realizar el amarre a las estacas de soporte.
- Dejar un vertedero en el centro del trincho para permitir el flujo de agua.

**Fotografía 8.** Trincho con vertedero sobre filtro principal



**Fuente:** La Calera le informa (<http://lcalera-cundinamarca.gov.co>)

### 6.3.3 Protección contra la erosión

La técnica de trasplante de paneles de *brachiaria decumbens* para protección antierosiva se ha mantenido estable en algunas zonas del talud superior, pero requiere protección del impacto directo de la lluvia pues en algunas zonas comienza a levantarse. El desprendimiento de vegetación y suelo de los taludes ha generado taponamiento de las cunetas de las bermas, por lo cual el agua de escorrentía no está siendo conducida hacia los canales perimetrales y en cambio corre libremente por los taludes generando más desprendimientos.

**Fotografía 9.** Detalle de drenajes en la parte superior del cuenco



**Fuente:** Las autoras

En las zonas bajas y laterales, el tratamiento de protección con cobertura vegetal empleado no ha sido efectivo, debido a fenómenos de erosión superficial por falta de protección de la misma durante el proceso de establecimiento. En este caso se propone la utilización de un manto biodegradable para control de erosión y protección de la vegetación, el cual deberá ser fijado al terreno con estacas vivas de las especies definidas en el numeral 6.4. Las zonas que conservan la vegetación instalada previamente, deben ser reforzadas con manto y estacas vivas, para ayudar a su correcto establecimiento.

## 6.4 SELECCIÓN DE ESPECIES VEGETALES Y MÉTODOS DE SIEMBRA

### 6.4.1 Substrato edáfico

**Objetivo:** Restablecer las condiciones edáficas adecuadas para el desarrollo de la vegetación deseada en el talud.

Una de las estrategias propuestas para el proceso de rehabilitación del talud es proporcionar un substrato edáfico que permita el desarrollo la vegetación deseada. En determinados casos puede ser suficiente el propio material mineral de extracción del talud, si se realiza un estudio que determine sus características. Sin embargo, para lograr el establecimiento de las plantas hay que garantizar que el suelo tenga las propiedades físicas y el suministro de nutrientes convenientes como carbono, nitrógeno y fósforo asimilable. La restauración o rehabilitación con criterios ecológicos no pretende crear suelos muy fértiles o gruesos si lo que se quiere es que se desarrolle una vegetación semejante a la natural. Por esta razón, es conveniente realizar un substrato que tenga la profundidad y la fertilidad suficientes, de la siguiente manera:

#### ***Materias primas para el substrato edáfico:***

- Residuos minerales del material de excavación del talud
- Suelos de una zona aledaña al talud donde se presente crecimiento de vegetación nativa, para mezclar con minerales y residuos pedregosos. El suelo tomado de la zona aledaña debe contener material del horizonte A y C (materia orgánica y minerales, profundidad 0-40 cm). Si el material procede de suelos forestales cercanos, la fertilidad de la mezcla ya suele ser adecuada.
- En caso de que la mezcla anterior no se pueda realizar, es recomendable el uso de enmiendas orgánicas como la incorporación de restos vegetales. En este caso lo ideal sería el uso de un manto biodegradable que contenga fibras naturales como paja, yute, madera, o coco. Los mantos de fibras naturales facilitan el proceso de desarrollo de las

plantas debido a que permiten el paso de la luz solar y favorecen la retención controlada de la humedad requerida para la germinación. El manto se biodegrada con el tiempo y se integra al suelo.

**Fotografía 10.** Agromanto instalado en Río Negro, Antioquia sobre lodo fértil en la Variante Aeropuerto



**Fuente:** PAVCO

***Procedimiento:***

- Realizar nivelación del terreno para obtener una superficie lisa y uniforme.
- Instalar el manto realizando la colocación desde la parte alta hacia la parte baja del talud.
- Espesor aconsejable: mínimo 20 cm y máximo 40 cm, pero la presencia de la enmienda o del manto orgánico debe estar en la capa superficial de 0-20 cm. Es conveniente generar espesores de substrato irregular, reproduciendo las condiciones del suelo natural.
- Hay que tener en cuenta el asentamiento del material antes de la plantación. Verificar que el manto se mantenga en contacto firme y continuo con el suelo.
- Es recomendable dejar reposar la mezcla anterior como mínimo 15 días antes de la revegetación.

- Realizar el anclaje del sustrato con la siembra de plántulas o estacas vivas según el numeral 6.4.2.

**Mantenimiento:** En eventos de precipitaciones fuertes los mantos pueden sufrir desgarros, por lo cual es importante realizar revisiones periódicas y hacer reemplazo de las áreas afectadas. Es igualmente importante verificar problemas de erosión o socavación debajo de los mantos y reconfigurar el suelo o la vegetación afectada. Si se detectan problemas de estabilidad del sustrato o pérdidas por erosión, hacer reposición localizada.

#### **6.4.2 Siembra de especies gramíneas, plantación de árboles y arbustos (Jorba y Vallejo, 2010)**

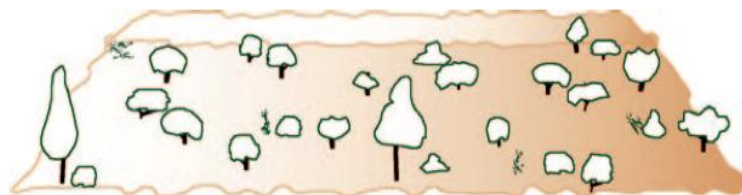
**Objetivo:** Fijación del sustrato con especies vegetales nativas para integrar ecológicamente el talud protegiéndolo de la escorrentía superficial y de procesos erosivos.

Para la estabilización del talud y la protección contra la erosión se recomienda utilizar especies vegetales de crecimiento rápido, capaces de formar un estrato herbáceo denso con relativa rapidez. Entre estas especies, las gramíneas como *Brachiaria decumbens* tienen un papel relevante ya que son capaces de formar numerosas hojas a ras del suelo y porque enraízan densamente en el suelo. Por otra parte las plantas leguminosas también tienen un elevado interés a causa de su capacidad de utilizar el nitrógeno atmosférico, y por tanto de crecer en sustratos pobres en nutrientes y de mejorarlos. La introducción de plantas leñosas (árboles y arbustos) tiene el objetivo de promover su papel como especies clave, que pueden atraer otras especies, y contribuir a restablecer la integridad del ecosistema. El uso de especies gramíneas de rápido crecimiento y leñosas de crecimiento anual, pueden generar cubiertas vegetales iniciales importantes y posteriormente pueden permitir la introducción espontánea de las especies presentes en los ecosistemas naturales de referencia (Maginnis, 2007).

**Procedimiento:**

- Realizar la hidrosiembra de *Brachiaria decumbens*<sup>3</sup> en las zonas donde se presentó el desprendimiento a causa del mal manejo de las aguas.
- La plantación de las especies leñosas que van a fijar el sustrato se debe realizar de manera irregular, simulando la distribución de las plantas que se observa espontáneamente en el ambiente natural. Se deben incorporar especies de los diferentes estratos de la vegetación nativa (árboles, arbustos, y herbáceas).
- Las especies arbóreas se deben plantar al pie y en el centro del talud, donde la profundidad del sustrato sea superior.
- Los arbustos se pueden plantar en toda la superficie del talud.
- Aplicar el manto orgánico en la base de los árboles y arbustos plantados para evitar el desarrollo de maleza alrededor del individuo, o realizar limpiezas periódicas de las herbáceas durante el primer año después de la plantación.
- En el caso de que se observe mortalidad o daños por herbívora, se deben colocar protectores de polipropileno, o de otro material consistente ventilado, alrededor de los individuos plantados.

**Figura 15 .** Esquema de la plantación.



**Fuente:** Jorba y Vallejo, 2010

<sup>3</sup> Siembra de *Brachiaria decumbens*, a pesar de no ser una especie gramínea nativa fue seleccionada dentro de las primeras medidas de recuperación y aún persisten en gran parte del talud.

- Las especies de arbustos pueden plantarse en toda la superficie del talud, mientras que los árboles solo en el centro o al pie del talud.

**Composición de especies:** arbóreas, arbustivas y lianas que deben ser seleccionadas (Ver Tabla 6).

**Siembra de especies:** Épocas húmedas entre septiembre a noviembre y de abril a mayo.

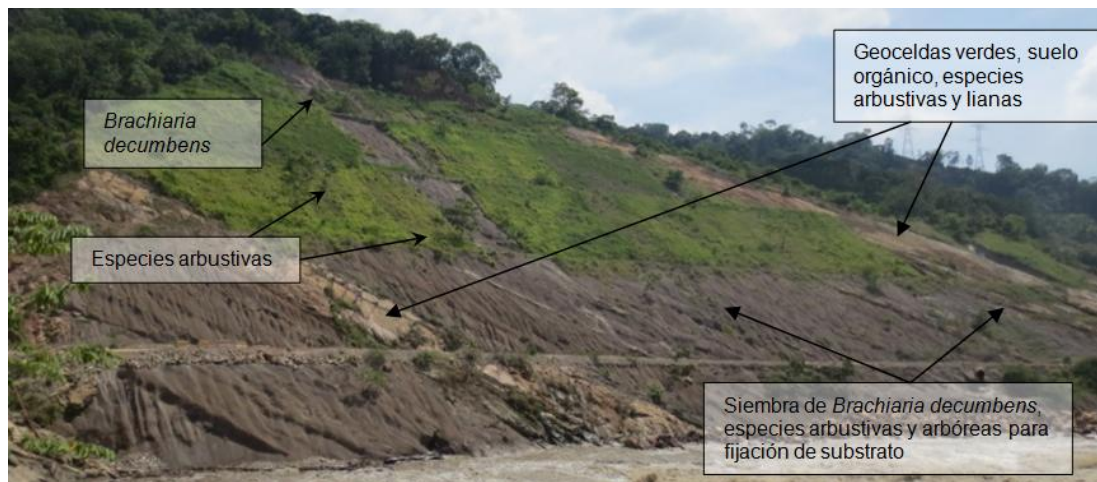
**Número de especies establecidas en el talud:** 1-3 arbóreas, 4-5 especies arbustivas (dominantes en la vegetación de referencia, preferentemente especies rebrotadoras de fruto carnoso y/o especies que pueden fijar el sustrato) y 1-2 lianas.

**Edad:** Entre 1-2 años para los árboles. También se pueden utilizar estacas vivas o rebrotes de los árboles y arbustos.

**Densidad:** 1 árbol cada 10 m, 1 arbusto cada 3 m.

**Mantenimiento:** Riegos de mantenimiento si las condiciones meteorológicas después de las plantaciones no son favorables.

**Fotografía 11 .** Distribución de especies nativas y de *Brachiaria decumbens* dentro del proceso de rehabilitación del talud.



**Fuente:** Las autoras

**Tabla 6** . Listado de especies nativas que pueden ser consideradas dentro de los procedimientos de siembra y plantación en el numeral 6.4.2

<b>Especie<sup>4</sup></b>	<b>Nombre común</b>	<b>Arbórea</b>	<b>Arbustiva</b>	<b>Herbácea</b>
<i>Cordia alliodora</i>	Món coro	X		
<i>Casearia sp.</i>	-	X		
<i>Cecropia peltata</i>	Yarumo	X		
<i>Mobea occidentalis</i>	-	X		
<i>Inga spuria</i>	-	X		
<i>Jacaranda sp.</i>	Guayacán	X		
<i>Xylopi a sp</i>	Vaya		X	
<i>Bidens sp</i>	Cadillo			X
<i>Momordica charantia</i>	-			X
<i>Cyper sus sp.</i>	Cortadera			X
<i>Schizolobium parahyba</i>	Frijolito	X		
<i>Mimosa sp.</i>	Dormidera		X	
<i>Pithecellobium dulce</i>	Gallinero		X	
<i>Pithecellobium Saman</i>	Samán	X		
<i>Rynchosia sp</i>	-			X
<i>Albizia guachapele</i>	Nauno	X		
<i>Miconia sp</i>	-		X	
<i>Silmax sp.</i>	Uña de gato			X
<i>Piper sp.</i>	Aguardientillo		X	
<i>Piper umbellatum</i>				X

**Fuente:** Las autoras con base en inventario forestal del proyecto

### 6.4.3 Geoceldas verdes

En las zonas donde afloran los estratos de arenisca no funcionó el trasplante de césped debido a que los taludes rocosos facilitan el deslave del suelo orgánico colocado para la implantación de la vegetación, por esto se deben emplear otras especies vegetales y

<sup>4</sup> Las especies seleccionadas son de rápido crecimiento y son en su mayoría especies pioneras que colonizan rápidamente el ecosistema. A la hora de seleccionarlas se debe tener en cuenta su disponibilidad de plántulas o estacas vivas en los viveros locales.

técnicas que se adapten mejor a las condiciones del suelo. Se propone la utilización de geoceldas verdes para la siembra de especies nativas, ya que su campo de aplicación en taludes hasta 45° de pendiente las hace aptas para el caso de estudio.

**Objetivo:** Realizar la siembra de vegetación en los taludes rocosos, utilizando geoceldas sintéticas de polietileno extruido en forma de panal para proporcionar soporte al suelo orgánico necesario para el desarrollo de las plantas seleccionadas.

**Ventajas:** Las geoceldas son estructuras elásticas que se adaptan a la morfología del terreno, y permiten la estabilización del suelo orgánico evitando que en eventos de lluvia este se deslice junto con la vegetación implantada. Las conexiones entre celdas permiten el drenaje interno y facilitan la absorción de agua durante las precipitaciones, fenómeno que favorece el control de la erosión y las condiciones de humedad apropiadas para el establecimiento de especies vegetales. Este sistema es compatible con la siembra de especies arbustivas.

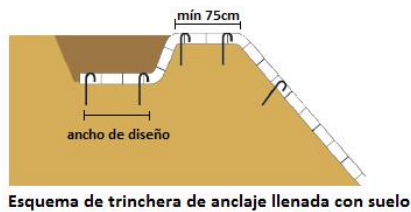
**Consideraciones especiales:** Durante las primeras lluvias a las que se someta el sistema se puede presentar compactación del suelo, hecho que puede derivar en una apariencia antiestética de las celdas y en algunos casos fenómenos erosivos superficiales en el suelo orgánico colocado. Esta situación se puede evitar utilizando mantos o esteras biodegradables de fibras naturales.

**Procedimiento:**

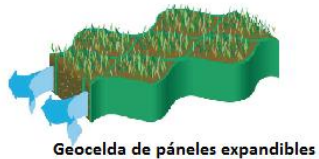
- Realizar una nivelación de la superficie, eliminando piedras sueltas y sistemas de raíces.
- Excavar una trinchera de anclaje en la parte superior del talud.
- Realizar la fijación de las tiras de geoceldas en la trinchera, utilizando anclajes metálicos en forma de “U”.
- Llenar la trinchera de anclaje con suelo o concreto.

- Extender las tiras a lo largo del talud y abrirlas como un acordeón.
- Fijar las tiras a lo largo del talud con ganchos en “U” de acuerdo con las especificaciones técnicas del fabricante.
- Rellenar las celdas con suelo orgánico (numeral 6.4.1).
- Realizar la siembra de acuerdo con las especies y procedimientos descritos en el numeral 6.4.2, utilizando únicamente especies arbustivas y lianas.

**Figura 16 . Geoceldas sintéticas de polietileno**



Esquema de trinchera de anclaje llenada con suelo



Geocelda de paneles expandibles



Geoceldas en Ilopango, El Salvador. 2003.

**Fuente:** TENAX

## 7. CONCLUSIONES

Antes de definir estrategias para la recuperación ecológica de un área degradada, es necesario realizar un completo estudio de los aspectos topográficos, hidroclimáticos, geológicos y edafológicos de la zona, así como un censo de las especies animales y vegetales presentes en el área, con el fin de determinar la necesidad de llevar a cabo intervenciones de bioingeniería que cimenten el proceso.

Es fundamental realizar un análisis detallado de los datos obtenidos en el estudio preliminar, fundamentado en recorridos de campo que permitan llegar al fondo de las causas de la degradación y de esta manera definir las técnicas más adecuadas para su solución.

Las técnicas de bioingeniería presentadas en este trabajo constituyen una herramienta eficaz en la protección contra la erosión y el reforzamiento de suelos, sin embargo, es importante complementarlas con medidas de control de aguas superficiales y subsuperficiales que garanticen la estabilización de los taludes en el largo plazo.

El uso de vegetación como sistema de protección contra la erosión presenta ventajas no solo en el aspecto técnico, por su habilidad natural en el reforzamiento de suelos, sino también en el aspecto ecológico y paisajístico como vehículo para fomentar la reconstitución de ecosistemas y conservación de la biodiversidad, y en el ámbito económico debido a los bajos costos de ejecución por el uso de especies autóctonas, materiales naturales y mano de obra local, sin embargo la bioingeniería no debe ser vista como un reemplazo de la ingeniería tradicional sino como un complemento de ella que permite su integración con el entorno natural.

Además de las consideraciones de orden técnico, se debe hacer un estudio minucioso de las especies a establecer y las técnicas de siembra, definiendo igualmente estrategias de mantenimiento en el mediano plazo, o hasta que la vegetación se haya establecido totalmente y sea apta para llevar a cabo la totalidad de las funciones conferidas en el diseño.

En el caso particular del cuenco del vertedero del proyecto Hidrosogamoso, en donde los taludes rocosos se encuentran estables y no requieren sistemas adicionales de protección, la utilización de geoceldas verdes puede ser entendida desde el punto de vista de la ingeniería tradicional como un costo innecesario, sin embargo debe ser valorada como una herramienta para la rehabilitación del ecosistema degradado por la ejecución de las obras civiles, que pueda proporcionar un nuevo hábitat para algunas de las especies animales y vegetales originalmente presentes en el área y otras desplazadas de otras zonas del proyecto. En condiciones similares, los costos por utilización de materiales sintéticos pueden ser compensados maximizando el uso de mano de obra y materiales naturales locales.

## 8. RECOMENDACIONES

Establecer un programa de monitoreo de la plantación a corto y mediano plazo donde se debe contemplar la posibilidad de intervenciones complementarias para corregir errores de planificación e intervenciones fracasadas.

La supervivencia de las plantaciones es un indicador muy importante del éxito de la restauración, y se puede evaluar de forma sencilla. Se pueden utilizar transectos fijos de unos 10 m de longitud a lo largo de los cuales se deben contar los individuos plantados de cada especie que se encuentren a una distancia de 0,5 m del transecto. Lo que se debe encontrar como resultado al medir este indicador, es el 50% supervivencia al cabo de 1 año de la plantación para cada una de las especies plantadas. Es conveniente observar si se ha formado una costra en superficie que dificulte la germinación de las plantas, especialmente cuando el substrato es rico en limos.

A la hora de la planificación se recomienda no introducir especies exóticas porque pueden competir y desplazar a las especies autóctonas que se desean restablecer dentro de la zona.

Dentro del programa de monitoreo es importante dedicar una atención especial al funcionamiento del sistema general de drenaje: funcionalidad de los canales de protección de los taludes, recogida de agua y de drenaje hacia el sistema general. También es importante verificar la no aparición de síntomas de erosión significativos: erosión laminar o cárcavas, o por el contrario su identificación aguas abajo, mediante la aparición de acumulaciones excesivas de sedimentos en la base de los taludes.

## BIBLIOGRAFÍA

ASOCIACIÓN NACIONAL DE EMPRESARIOS FABRICANTES DE ÁRIDOS: ANEFA. AGRUPACIÓN DE FABRICANTES DE ÁRIDOS DE ATRAGÓN: AFA. Manual de Restauración de Explotaciones Mineras a Cielo Abierto de Aragón. Aragón, España. GOBIERNO DE ARAGÓN.

ECOAMBIENTES. Tratamientos Bioingenieriles en la Vereda Villarrosa, Argelia, Valle Del Cauca, Colombia. {En línea}. {10 de marzo de 2014} disponible en: <http://ecoambientes.tripod.com/id12.html>

FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS. ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. Seminario de Bioingeniería: La bioingeniería en la protección y estabilidad de taludes, laderas y cauces en zonas urbanas. Bogotá. FOPAE, 2013.

GRUPO TÉCNICO CONVENIO 587 DE 2003: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – INVIAS. Manual Para la Inspección Visual de Obras de Estabilización. Bogotá, Colombia. INVIAS, 2006.

HOOBS, R.J., & D.A. NORTON. 1996. Towards a conceptual framework for restoration ecology. *Restoration Ecology* 4(2): 93-110.

IDEASS ITALIA. La Ingeniería Naturalística: Técnicas Apropriadas y Sostenibles para la Reducción de la Vulnerabilidad del Territorio. {En línea}. {Consultado el 2 de marzo de 2014}. Disponible en: [http://www.ideassonline.org/pdf/br\\_37\\_79.pdf](http://www.ideassonline.org/pdf/br_37_79.pdf)

JORBA, M., Vallejo R.V. 2010. Manual para la restauración de canteras de roca caliza en clima mediterráneo. Jorba, Montse, ed. II Vallejo Calzada, Victoriano Ramón, ed. III. Catalunya. Àrea d'Avaluació i Restauració d'Activitats Extractives.

LA CALERA LE INFORMA. Bioingeniería en La Calera. La Calera, Colombia. {En línea}. {29 abril de 2014} disponible en: <http://lacalera-cundinamarca.gov.co/apc-aa/view.php3?vid=1090&cmd%5B1090%5D=x-1090-1996136>

MAGINNIS, S., Jackson, W. 2007. What is FLR and how does it differ from current approaches? En: Rietbergen-McCracken, J., Maginnis, S., Sarre, A. (eds.), The forest landscape restoration handbook. Earthscan, London, UK: pp. 5–20.

MANSOURIAN, S. 2005. Overview of forest restoration strategies and terms. En: Mansourian, S., Vallauri, D., Dudley, N. (eds.), Forest restoration in landscapes: beyond planting trees. Springer, New York, USA: pp. 8–16.

NEWTON, A.C. y Tejedor, N. (Eds.). 2011. Principios y práctica de la restauración del paisaje forestal: Estudios de caso en las zonas secas de América Latina. Gland, Suiza: UICN y Madrid, España: Fundación Internacional para la Restauración de Ecosistemas. xxiv + 409 pp.

PETRONE, Alessandro. CROCETTI, Cesare. FERRARI, Roberto. Manual de Ingeniería Naturalística. Quito, Ecuador. DEISTAF, 2012.

RECAMAN MEJIA, Liliana. Seminario de Bioingeniería: Gestión del Riesgo Cuenca Alta del Río Cauca con Participación Comunitaria en Las Fuentes de Abastecimiento del Municipio de Popayán. Bogotá. FOPAE, 2013.

RIVERA POSADA, José Horacio. Construcción de Trinchos Vivos para Conducción de Aguas de Escorrentía en Zonas Tropicales de Ladera. Manizales, Colombia. 2001

RIVERA POSADA, José Horacio. Sistemas de Drenaje con Filtros Vivos para la Estabilización y Restauración de Movimientos Masales en Zonas de Ladera. Chinchiná, Colombia. CENICAFÉ, 2011.

SAMPER, C. 2000. Ecosistemas Naturales, Restauración ecológica e investigación. Ponce de León (Ed.). Memorias del seminario de restauración ecológica y reforestación. P.p. 27-37. Fundación Ángel- Escobar. Bogotá- Colombia

SAULI, Giuliano. CORNELINI, Paolo. PRETI, Federico. Manuale di Ingegneria Naturalistica Volume 2: Manuale studio cave e discariche. Regione Lazio, 2006.

SUÁREZ DÍAZ, Jaime. Control de Erosión en Zonas Tropicales. Bucaramanga, Colombia. UIS, 2001.

SUÁREZ DÍAZ, Jaime. Deslizamientos Volumen 1: Análisis Geotécnico. Bucaramanga, Colombia. UIS, 2009.

SUÁREZ DÍAZ, Jaime. Deslizamientos Volumen 2: Técnicas de Remediación. Bucaramanga, Colombia. UIS, 2009.

TENAX. Geoceldas TENAX TENWEB. {En línea}. {28 de abril de 2014} disponible en: <http://www.tenax.net/geosinteticos/productos/geoceldas-tenweb.htm>

VARGAS, O. 2007. Guía metodológica para la restauración ecológica de bosque altoandino. Grupo de restauración ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

PAVCO. Geosintéticos Control de Erosión. {En línea}. {29 abril de 2014} disponible en: <http://artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/PAVCO.pdf>

## ANEXOS

### ANEXO A. Definiciones

**EXCAVACIÓN A CIELO ABIERTO:** Es la extracción de material por medios mecánicos o manuales, que se realiza sobre la superficie del terreno siguiendo un diseño determinado, para llegar a la elevación definida para el emplazamiento de una obra.

**EROSIÓN:** Proceso de desprendimiento, transporte y depósito del suelo superficial, por acción del agua o el viento, agravado por factores de tipo local como la presencia o ausencia de vegetación, capacidad de retención de agua del suelo, características de drenaje y pendiente, intervenciones antrópicas entre otras.

**MOVIMIENTOS EN MASA:** Fenómeno de transferencia de masas de suelo por acción de la fuerza de gravedad con contribución del agua como agente de transporte, así como las características topográficas, biológicas y climáticas de la zona y las actividades antrópicas que en ella se desarrollen. Los fenómenos de remoción en masa se clasifican en movimientos de reptación, flujos, deslizamientos, caídas, volcamientos y movimientos complejos.

**REPTACIÓN:** También conocida como “creep”, es un movimiento imperceptiblemente lento del suelo, relacionado con factores como la gravedad, variación del volumen de arcillas por cambios en condiciones de humedad. Puede ser identificado porque provoca inclinación de árboles, postes y cercas.

**FLUJOS:** Desplazamiento lento o rápido de materiales, generalmente en condición húmeda. Los tipos más comunes de flujos son los de detritos, de tierras, de lodos y avalanchas.

**DESLIZAMIENTO:** Movimiento de una masa de roca o suelo a lo largo de una o varias superficies de falla bien definidas. Según la geometría de la superficie de ruptura, se pueden clasificar en deslizamientos rotacionales y deslizamientos traslacionales o planares.

**CAÍDA:** Desprendimiento de masa de cualquier tamaño de un talud de pendiente pronunciada, en el cual el material desciende por el aire por caída libre, por saltos o por rodamiento.

**VOLCAMIENTO:** Giro hacia adelante de uno o varios bloques de roca con respecto a un punto o eje bajo el centro de gravedad del material desplazado. Este movimiento puede ocurrir por acción de la gravedad, por influencia del agua en las juntas o por movimientos sísmicos.

**MOVIMIENTOS COMPLEJOS:** Son movimientos en masa en los cuales se presenta la combinación de dos o más tipos de desplazamiento.

## ANEXO B. Marco normativo

La aplicación de medidas de restauración ecológica está soportada en el siguiente marco normativo:

NORMA	COMENTARIO
<b>Constitución Política de Colombia</b>	<b>Artículo 79:</b> “...Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.”
	<b>Artículo 80:</b> “El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución...”
<b>Ley 99 de 1993</b>	<b>Artículo 1:</b> “...2. La biodiversidad del país, por ser patrimonio nacional y de interés de la humanidad, deberá ser protegida prioritariamente y aprovechada de forma sostenible...” y “...7. El Estado fomentará la incorporación de los costos ambientales y el uso de instrumentos económicos para la prevención, corrección y restauración del deterioro ambiental y para la conservación de los recursos naturales renovables”.
	<b>Artículo 7:</b> “Se entiende por ordenamiento ambiental del territorio [...] la función atribuida al Estado de regular y orientar el proceso de diseño y planificación de uso del territorio y de los recursos naturales renovables de la Nación, a fin de garantizar su adecuada explotación y su desarrollo sostenible.”
	<b>Artículo 50:</b> “Se entiende por Licencia Ambiental la autorización que otorga la autoridad ambiental competente para la ejecución de una obra o actividad, sujeta al cumplimiento por el beneficiario de la licencia de los requisitos que la misma establezca en relación con la prevención, mitigación, corrección, compensación y manejo de los efectos ambientales de la obra o actividad autorizada.”
<b>Decreto 2820 de 2010</b>	<b>Artículo 1:</b> Sobre las medidas de compensación: “Son las acciones dirigidas a resarcir y retribuir a las comunidades, las regiones, localidades y al entorno natural por los impactos o efectos negativos generados por un proyecto, obra o actividad, que no puedan ser evitados, corregidos, mitigados o sustituidos.”
<b>Resolución 1517 de 2012</b>	Es la resolución por medio de la cual se adopta el Manual para la Asignación de Compensaciones por Pérdida de Biodiversidad, el cual tiene como objetivo “...establecer el procedimiento para la determinación y cuantificación de las medidas de compensación por pérdida de biodiversidad...”.  El manual establece lineamientos para la realización de actividades de prevención, mitigación, corrección y compensación en proyectos, obras o actividades, planteando la restauración ecológica como alternativa tanto para la corrección como para compensación.
<b>Ley 1450 de 2011</b>	Es la ley por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014, en donde como medida para el fortalecimiento de la protección y restauración de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos, ordena adoptar el Plan Nacional de Restauración, cuyo objetivo es “Orientar y promover la restauración ecológica, la recuperación y la rehabilitación de áreas disturbadas, que conlleven a la distribución equitativa de beneficios, a la conservación de la diversidad biológica y a la sostenibilidad y mantenimiento de bienes y servicios ambientales, en un marco de

NORMA	COMENTARIO
	<i>adaptación a los cambios globales”.</i>
<b>Plan Nacional de Restauración</b>	Este documento destaca que las acciones de compensación comprenden <i>“...tanto la conservación como la restauración entre otras, privilegiando la conservación como actividad objeto de compensación por pérdida de biodiversidad. Sin embargo, si el área a compensar no se logra establecer en fragmentos ecológicamente equivalentes, se generarán acciones de restauración, cuyo objetivo es el restablecimiento del ecosistema que ha sido intervenido”...</i> De acuerdo con éste plan, el nivel del disturbio, el tipo del disturbio y la vida útil del proyecto, definen si se llevarán a cabo procesos de restauración ecológica, rehabilitación o recuperación, que tengan como meta final el incremento del área, la integración a la matriz ecológica o al paisaje y su conectividad con los ecosistemas adyacentes”.
<b>Resolución 1526 de 2012</b>	<p><b>Artículo 3:</b> Se definen como proyectos de sustracción temporal la construcción de accesos e infraestructura asociada a actividades de exploración sísmica, perforación exploratoria de hidrocarburos y galerías de exploración para proyectos hidroeléctricos; obras de exploración minera; explotación de material de construcción; exploración de potencial geotérmico; y actividades de exploración sísmica que no requieran la construcción de accesos.</p> <p><b>Artículo 10:</b> Sobre las medidas de compensación, restauración y recuperación: <i>“En los casos en que proceda la sustracción de las áreas de reserva forestal, sea esta temporal o definitiva, la autoridad ambiental competente impondrá al interesado en la sustracción, las medidas de compensación, restauración y recuperación a que haya lugar, sin perjuicio de las que sean impuestas por la autoridad ambiental competente en virtud del desarrollo de la actividad que se pretenda desarrollar en el área sustraída...”</i>, así como en <i>“...el caso de sustracción temporal, las medidas de compensación se realizarán en el área afectada por el desarrollo de la actividad...”</i>.</p>