

**METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE PRÁCTICAS DE CONTROL DE EROSIÓN
HÍDRICA DEL SUELO Y OTROS PROCESOS DE DEGRADACIÓN ASOCIADOS A
PROYECTOS DE REFINACIÓN DE PETRÓLEO, COMO HERRAMIENTA DE GESTIÓN
AMBIENTAL. CASO DE ESTUDIO REFINERÍA AMUAY, MUNICIPIO LOS TAQUES.
ESTADO FALCÓN-VENEZUELA**

Autor:

Ing. Gusbel Rosana Torres Rivas

www.bdigital.ula.ve

**Trabajo de Grado para optar al título de Magister Scientiae en Gestión de Recursos
Naturales Renovables y Medio Ambiente (con énfasis en Estudio de Impacto
Ambiental)**

**CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO E INVESTIGACIÓN AMBIENTAL Y
TERRITORIAL**

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

MÉRIDA, VENEZUELA

2025

DEDICATORIA

A ti Mami

A ti este y cada uno de mis logros

Eres mi heroína y mi ejemplo a seguir

Porque me enseñaste que no hay atajos hacia las metas

Que se construyen un paso a la vez y con esfuerzo

Te amo

www.bdigital.ula.ve

AGRADECIMIENTOS.

Al culminar esta etapa gratificante para mí quiero agradecer a quienes hicieron realidad este sueño, aquellos que me acompañaron en el camino y siempre fueron inspiración, apoyo y fortaleza.

En primer lugar, a Dios quien ha sido mi guía, fortaleza y su mano de fidelidad y amor ha estado conmigo siempre hasta el día de hoy. Gracias también le doy a Dios por darme una familia maravillosa, quienes han creído siempre en mí, enseñándome a valorar todo lo que tengo y recordándome siempre de lo que soy capaz. Gracias por ser parte de mi vida y por permitirme ser parte de su orgullo.

A la Universidad de Los Andes, especialmente al Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial, por abrirme sus puertas para crecer y aprender. Hoy puedo decir que estoy orgullosa de ser parte de esta casa de estudios y horada de haber conocido en ella personas dignas de admiración.

A mi tutora la Profesora Kretheis Márquez, quién siempre estuvo dispuesta con paciencia a orientarme para lograr conseguir esta meta, le estaré siempre agradecida por compartir conmigo su experiencia y conocimientos.

Finalmente, Agradezco a todas las personas que de una u otra manera me ayudaron en este proceso. A los que están aquí hoy en día y a los angelitos que me cuidan desde el cielo.

www.bdigital.ula.ve

INDICE GENERAL.

ACTA VEREDICTO	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Planteamiento del Problema.....	2
1.3 Justificación.....	5
1.4 Objetivos de la Investigación	6
1.4.1 Objetivo General	6
1.4.2 Objetivos Específicos.....	6
1.5 Alcances	8
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Antecedentes de la Investigación	8
2.2 Marco Legal	11
2.2.1 Constitución de la República Bolivariana de Venezuela (1999)	11
2.2.2 Ley Orgánica del Ambiente (2006)	11
2.2.3 Ley Penal del Ambiente (2012)	12
2.2.4 Ley Forestal de Suelos y de Aguas (1966)	12
2.2.5 Ley de Aguas (2007).....	13
2.2.6 Decreto No. 2.220 Normas para regular las actividades capaces de provocar cambios de flujo, distribución de cauces y problemas de sedimentación (1992.....	13
2.2.7 Resolución No. 56 Normas sobre recaudos para la evaluación ambiental de programas y proyectos mineros y de exploración y producción de hidrocarburos (1996).....	13
2.2.8 Norma Internacional ISO 14001 Norma Internacional ISO 14001 requisitos de los sistemas de gestión ambiental con orientación para su uso (2015).....	13
2.2.9 Convenios internacionales suscritos y rectificados por Venezuela.....	13
2.3 Bases Conceptuales	14
2.3.1 Suelo	14
2.3.2 Degradación del suelo	14
2.3.4 Erosión del suelo	15
2.3.5 Conceptos petroleros de interés	18
2.3.6 Etapas de la cadena de valor de los hidrocarburos e impactos ambientales asociados	20
CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO.....	23

3.1 Descripción de las etapas de la investigación	25
3.1.1 Etapa 1. Revisión documental e identificación de impactos ambientales sobre el subcomponente físico natural suelo y su significancia en la erosión hídrica y otros procesos de degradación asociados a refinerías de petróleo.	25
3.1.2 Etapa 2. Selección de prácticas de control de erosión hídrica y degradación del suelo asociada a proyectos de refinación de petróleo	35
3.1.3 Etapa 3. Propuesta de la metodología para la selección de prácticas de control de erosión hídrica y procesos de degradación de suelo asociados a proyectos de refinación de petróleo	38
3.1.4.1 Caracterización del área de estudio	39
3.1.4.2 Identificación de procesos de erosión dentro de la Refinería Amuay	44
3.1.4 Etapa 4. Conclusiones y Recomendaciones	46
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	47
4.1. Identificación de impactos ambientales sobre el subcomponente físico natural suelo y su significancia en la erosión hídrica y degradación asociada a refinerías de petróleo	47
4.2. Caracterización de escenarios de riesgos socio naturales y tecnológicos	54
4.2.1 Valoración de riesgos Tecnológicos	57
4.3 Jerarquización de impactos ambientales del subcomponente ambiental suelo con la metodología RIAM	62
4.3.1 Evaluación Impactos ambientales empleando la metodología VIAPS (valor del impacto ambiental potencial a seleccionar).....	62
4.3.2 Aplicación de RIAM	62
4.4 Selección de prácticas de control de erosión hídrica del suelo y otros procesos de degradación para proyectos de refinación de petróleo.....	67
4.4.1 Identificación de prácticas de control de erosión hídrica en proyectos de diferente naturaleza.....	67
4.4.2 Descripción y validación de factores de prácticas de control de erosión hídrica del suelo y otros procesos de degradación en proyectos de refinación petrolera a criterio de experto.....	78
4.4.3 Integración de las prácticas de control y factores de selección para cada fase de los proyectos de refinación petrolera	81
4.4.3.1 Prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación para la fase de trabajos preliminares de proyectos de refinación petrolera.....	82
4.4.3.2 Prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo para la fase de construcción de proyectos de refinación petrolera	84
4.4.3.3 Prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo para la fase de operación y mantenimiento de proyectos de refinación petrolera.....	86
4.5 Evaluación de las prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo asociada respecto a los factores de selección mediante juicios de valor.....	88

4.6 Propuesta de metodología para la selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación de suelo asociados a proyectos de refinación de petróleo	93
4.6.1 Consideraciones adicionales para la selección de prácticas de control de erosión y otros procesos de degradación en proyectos de refinación petrolera	96
4.7 Aplicación al caso de estudio de la Refinería Amuay	97
4.7.1 Prácticas para el control de erosión hídrica y otros procesos de degradación asociada en los diques y taludes en la Refinería Amuay	97
4.7.2 Prácticas para el control de erosión hídrica y otros procesos de degradación asociada en los diques de los patios de almacenamiento de la Refinería Amuay	98
4.7.3 Prácticas para para el control de erosión hídrica y otros procesos de degradación asociada en los taludes perimetrales de la Refinería Amuay	98
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	103
5.1 RECOMENDACIONES	106
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	108
APÉNDICES	113
Apéndice A	114
Apéndice B	146
Apéndice C	159
Apéndice D	177

www.bdigital.ula.ve

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1.1 Árbol de problemas planteado para la investigación.....	4
Figura 1.2 Árbol de objetivos planteados paara la investigación.....	7
Figura 2.1 Principales tipos de degradación del suelo.....	15
Figura 3.1 Esquema metodológico de la investigación.....	24
Figura 3.2 Ubicación relativa del área caso de estudio correspondiente a la Refinería Amuay, Municipio Los Tanques. Estado Falcón. Venezuela.	39
Figura 3.3 Mapa de textura del suelo de la península de Paraguaná	42
Figura 3.4 Gráfico de Precipitación Media Mensual en la península de Paraguaná en el periodo 1971-2000	43
Figura 3.5 Mapa de diques y taludes Refinería Amuay.....	45
Figura 3.6 Mapa de caracterización de pendientes de la Refinería Amuay.....	48
Figura 4.1 Relevancia de los factores para la selección de prácticas de control de erosión hídrica a juicio de experto.....	81
Figura 4.2 Aspectos para la consideración de prácticas de control de erosión hídrica y otros proceos de degradación en la fase de trabajos preliminares para el proyecto de refinerías de petróleo.....	82
Figura 4.3 Aspectos para la consideración de prácticas de control de erosión hídrica y otros proceos de degradación en la fase de construcción para el proyecto de refinerías de petróleo.....	84
Figura 4.4 Aspectos para la consideración de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación en la fase de operación y mantenimiento para el proyecto de refinerías de petróleo.....	87
Figura 4.5 Procedimiento de selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros proceos de degradación asociados a proyectos de refinación petrolera	94

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 2.1 Etapas de la cadena de valor de hidrocarburos	20
Tabla 3.1 Matriz de evaluación del subcomponente ambiental suelo relacionando las actividades con potencial de generar impactos; con las acciones capaces de degradar el recurso y los impactos que podrían generar erosión del suelo y otros procesos de degradación	29
Tabla 3.2 Criterios de evaluación de la Amenaza.	30
Tabla 3.3 Criterios de evaluación de la vulnerabilidad.....	30
Tabla 3.4 Criterios de evaluación del factor de riesgo..	31
Tabla 3.5 Relación causa efecto.....	32
Tabla 3.6 Momento para cada impacto..	32
Tabla 3.7 Regularidad de la manifestación.	32
Tabla 3.8 Tiempo de retorno a condiciones antes de la acción..	33
Tabla 3.9 Criterios Grupo A	34
Tabla 3.10 Criterios Grupo B.	34
Tabla 3.11 Rangos correspondiente para los puntajes ES (Environmental Score)	35
Tabla 3.12 Matriz de comparación para ponderación de los criterios de selección.	37
Tabla 3.13 Datos de erosión en áreas de la Refinería Amuay.	45
Tabla 4.1 Impactos asociados a la erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en la etapa trabajos preliminares para la implantación de una refinería..	48
Tabla 4.2 Impactos asociados a la erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en la etapa de construcción para la implantación de una refinería.	50
Tabla 4.3 Impactos asociados a la erosión hídrica del suelo y otros procesos de degradación en la etapa de operación y mantenimiento de una refinería.	52
Tabla 4.4 Resumen de impactos primarios que pueden generar erosión hídrica del suelo y otros procesos de degradación en refinerías.	53
Tabla 4.5 Resumen de impactos secundarios que pueden generar erosión hídrica del suelo y otros procesos de degradación en refinerías	53
Tabla 4.6 Caracterización de los escenarios de riesgo Socio- Naturales relacionados con la erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en refinerías de petróleo.	55
Tabla 4.7 Riesgos Tecnológicos asociados a la erosión hídrica y otros procesos de degradación en refinerías de petróleo.....	58
Tabla 4.8 Evaluación de los riesgos tecnológicos asociados a la erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en refinerías.	60
Tabla 4.9. Evaluación de impactos relacionados a la erosión hídrica del suelo y otros procesos de degradación asociados a refinerías mediante VIAPS	63
Tabla 4.10 Matriz RIAM para los impactos asociados a la erosión hídrica y otros procesos de degradación en los proyectos de refinación petrolera.....	65
Tabla 4.11 Prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación identificadas en el grupo de control de agua superficial y subterránea.	69
Tabla 4.12 Prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación identificadas en el grupo de control de sedimentos.....	71
Tabla 4.13 Prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación identificadas en el grupo de estabilización.	73

Tabla 4.14 Prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación identificadas en el grupo de remediación.....	76
Tabla 4.15 Frecuencia de uso de prácticas de control de agua superficial y subterránea	77
Tabla 4.16 Frecuencia de uso de prácticas de control de sedimentos.....	77
Tabla 4.17 Frecuencia de uso de las prácticas de estabilización.....	78
Tabla 4.18 Frecuencia de uso de prácticas de remediación.....	78
Tabla 4.19. Frecuencia de repetición por factor de selección en la matriz de evaluación de cada experto.	80
Tabla 4.20 Peso de cada factor de selección por cada experto consultado.....	80
Tabla 4.21 Peso total de cada factor.....	80
Tabla 4.22 Prácticas de control de erosión hídrica y degradación del suelo seleccionadas para la etapa de trabajos preliminares en los proyectos de refinación petrolera.	83
Tabla 4.23 Prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación seleccionadas para la etapa de construcción en los proyectos de refinación petrolera.....	85
Tabla 4.24 Prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación seleccionadas para la etapa de operación y mantenimiento en los proyectos de refinación petrolera.....	88
Tabla 4.25 Rangos de los factores de selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo establecidos para los juicios de valor	89
Tabla 4.26 Juicios de valor realizados a las prácticas de la fase de trabajos preliminares de los proyectos de refinación petrolera.....	90
Tabla 4.27 Juicios de valor realizados a las prácticas de la fase de construcción de los proyectos de refinación petrolera.....	91
Tabla 4.28 Juicios de valor realizados a las prácticas de la fase de operación y mantenimiento de los proyectos de refinación petrolera.....	92
Tabla 4.29 Ficha técnica para la selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación en proyectos de refinación petrolera.	95
Tabla 4.30 Ficha técnica para la selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en los diques de los patios de almacenamiento de la Refinería Amuay.....	99
Tabla 4.31 Ficha técnica para la selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en los taludes perimetrales de los patios de almacenamiento de la Refinería Amuay.....	100
Tabla 4.32 Para la selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en bases de taludes de la Refinería Amuay.	101
Tabla 4.33 Ficha técnica para la selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en taludes y proximidades a las piscinas de tratamiento de residuos de la Refinería Amuay.....	102

RESUMEN.

El desarrollo económico y social del mundo depende en gran medida de proveer a la población alimentos, trabajo, tecnología y materias primas para la manufactura. Por lo cual es prudente considerar a una de las principales actividades económicas del mundo representada por la industria petrolera. Sin embargo, los procesos asociados a la extracción, producción y refinación del petróleo; conllevan un número importante de impactos ambientales, especialmente sobre el recurso suelo. En el caso especial de las refinerías su implantación involucra acciones capaces de acentuar procesos de erosión hídrica como cortes de laderas, deforestación, extracción de material de préstamo, así como construcción de infraestructura. A estas acciones se asocian riesgos de desestabilización de taludes, derrumbes, deslizamientos y contaminación de cursos de agua; resultando en incendios, explosiones, fugas químicas, además de lamentables pérdidas de vidas humanas. Sin dejar de lado las mermas económicas generadas por la paralización de una planta de esta índole. Por tal motivo, se resalta la importancia de desarrollar una metodología para la selección de prácticas de control de erosión hídrica de suelos en proyectos de refinación de petróleo que vaya de la mano con la gestión ambiental, considerando que esta clase de metodología existe para proyectos como la agricultura y la ganadería, pero no para escenarios de refinerías. La investigación plantea el desarrollo del estudio por etapas; la primera de ellas la identificación de los impactos ambientales sobre el recurso suelo y jerarquización de los mismos mediante la Matriz de evaluación rápida de impacto "RIAM", además de la valoración de los riesgos tecnológicos asociados a la ocurrencia de dichos impactos. Seguidamente, el reconocimiento de las prácticas de control de erosión empleadas en proyectos de distinta naturaleza. A continuación, la consulta de la opinión de los expertos para el establecimiento de los factores de selección haciendo uso de una matriz de comparación por pares. Posteriormente, la evaluación de las prácticas apropiadas respecto a los factores de selección, a través de juicios de valor. Finalmente, la integración de todos los aspectos evaluados para el diseño de la metodología y su aplicación al caso de estudio de la refinería Amuay. Como resultado el análisis ambiental logró identificar ocho (8) impactos primarios negativos y quince (15) impactos secundarios, que obtuvieron según *RIAM* rangos -B y -C en su mayoría. En consecuencia, se tomó en cuenta los distintos escenarios a lo largo de la vida de los proyectos de refinación petrolera donde la erosión hídrica puede tener lugar y fueron propuestas prácticas de control de erosión desde las fases preventivas hasta aquellas donde se requiere mitigar y posteriormente supervisar su funcionamiento. Adicionalmente, el trabajo pudo establecer como factores condicionantes ante la selección de prácticas el tipo de suelo, clima y topografía; de tal manera que la metodología diseñada se adapte para cada proyecto especial de refinerías de petróleo sin discriminar el área donde el mismo se establezca. Por último, al aplicar la metodología al caso de estudio de la refinería Amuay fue posible corroborar las afectaciones sobre el recurso suelo asociadas a los procesos de erosión hídrica, identificados en la revisión ambiental de la investigación. Así pues, según los tipos de erosión hídrica detectada en las áreas de la Refinería Amuay se ajustaron las medidas más idóneas para el control de erosión en diques y taludes de acuerdo a los criterios relevantes según los expertos, destacando que los procesos de erosivos tipificados en la refinería logran ser atendidos con las prácticas propuestas dentro de la metodología diseñada. No obstante, se destaca que el éxito de la implementación de cualquier práctica dependerá de la participación de la empresa o institución, comenzando por el personal que hace vida dentro de ella, seguido de la gerencia encargada de la supervisión ambiental y monitoreo.

Palabras clave: suelo, erosión hídrica, degradación, refinería, RIAM, prácticas de control, metodología, protección.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

1.1 Introducción.

Nuestro planeta puede ser visto como un conjunto de elementos, en el que todos interaccionan y guardan equilibrio entre sí, incluida la especie humana. En otras palabras, es un entorno formado por componentes físicos, químicos y biológicos con los que se relacionan los seres vivos. La superficie de la tierra representa un escenario de múltiples recursos, estructuras y procesos. En este entorno dinámico se encuentra el recurso suelo, reconocido como la capa vital y productiva, formada por una mezcla de minerales, materia orgánica, agua y organismos vivos. Esta capa superficial es indispensable para los ecosistemas, pero es extremadamente vulnerable a las alteraciones, tanto naturales como las promovidas por la acción humana. La naturaleza abrupta de estas alteraciones artificiales a menudo impide que los ecosistemas se adapten, llevándolos a ser suprimidos.

A lo largo de la historia, el desarrollo económico y el crecimiento demográfico han provocado un uso indiscriminado del recurso suelo, lo que ha generado numerosos impactos negativos. Sin embargo, la industria petrolera, una de las actividades económicas más influyentes a nivel mundial, ha exacerbado estos problemas. Los procesos asociados a la extracción, producción y refinación del crudo conllevan importantes impactos ambientales, especialmente sobre el recurso suelo. La afectación del suelo a raíz de la actividad petrolera ha acentuado problemas como la erosión, la compactación, la salinidad y la contaminación. Esta degradación directa no solo amenaza la biodiversidad, sino que también incrementa los riesgos de accidentes laborales en las instalaciones o en sus alrededores.

Entendiendo que el crecimiento de la población mundial es un factor prácticamente imposible de frenar, el camino hacia una verdadera armonía entre el ambiente y el hombre, es la gestión ambiental, siendo esta la administración y manejo de las actividades que influyen sobre el ambiente, mediante un conjunto de pautas, técnicas y mecanismos que aseguren la puesta en práctica de una política ambiental racional y sostenida. La gestión ambiental incluye por tanto la planeación ambiental, ordenación territorial, regulación de asentamientos humanos y normas. Pero también la educación e investigación, pieza clave para el desarrollo de instrumentos que permitan la prevención y resolución de impactos ambientales.

Por otra parte, el desarrollo económico y social del mundo depende en gran medida de proveer a la población alimentos, trabajo, tecnología y materias primas para la generación de productos. El petróleo y su gama casi infinita de productos derivados le convierten en un producto prácticamente imprescindible.

Por tal motivo se plantea la importancia de desarrollar una metodología para la selección de prácticas de control de erosión hídrica de suelos en proyectos de refinación de petróleo que vaya de la mano con la gestión ambiental. Adicionalmente, que dicha metodología sea aplicable a cualquier proyecto de índole similar, convirtiéndose entonces en un instrumento de gestión ambiental que dirija el camino hacia el desarrollo humano sostenible. Como medio importante de validación el estudio será aplicado al caso de estudio de la Refinería Amuay. Ubicada en el Municipio Los Tanques, Estado Falcón Venezuela.

Es importante destacar que la producción y refinación petrolera es la principal actividad económica de nuestro país. Según PDVSA (2016) Venezuela cuenta con 300.078 MMBLS de reservas probadas de petróleo. Distribuidas en 279.117 MMBLS en la Cuenca Oriental, dentro de la cual se ubica la Faja Petrolífera del Orinoco, 20.330 MMBLS en las Cuencas Maracaibo-Falcón, 1.088 mmbbls en las Cuenca Barinas-Apure y 343 mmbbl en la Cuenca Carúpano.

La propuesta para la investigación se desarrollará en tres (3) capítulos, para su mejor entendimiento. En el primer capítulo se expone la justificación e importancia de la investigación, el problema a considerar y los objetivos que darán solución a dicho problema; así como los alcances que pueda tener la investigación.

Por otra parte, en el segundo capítulo, se presentan las bases conceptuales y legales que dan sustento al presente trabajo y finalmente en el tercer capítulo, se expondrá el marco metodológico, el cual está conformado por cuatro etapas; la primera de ellas consistirá en la revisión documental e identificación de impactos ambientales para refinerías de petróleo. En la segunda etapa se validarán las prácticas de control de erosión hídrica del suelo para proyectos de refinación de petróleo mediante la revisión de prácticas existentes para proyectos de distinta naturaleza. En la tercera se propondrá la metodología para la selección de prácticas de control de erosión hídrica de suelos en proyectos de refinación petrolera, aplicándola a un caso de estudio; y en la cuarta y última etapa se realizarán las conclusiones y recomendaciones de la presente investigación.

1.2 Planteamiento del Problema.

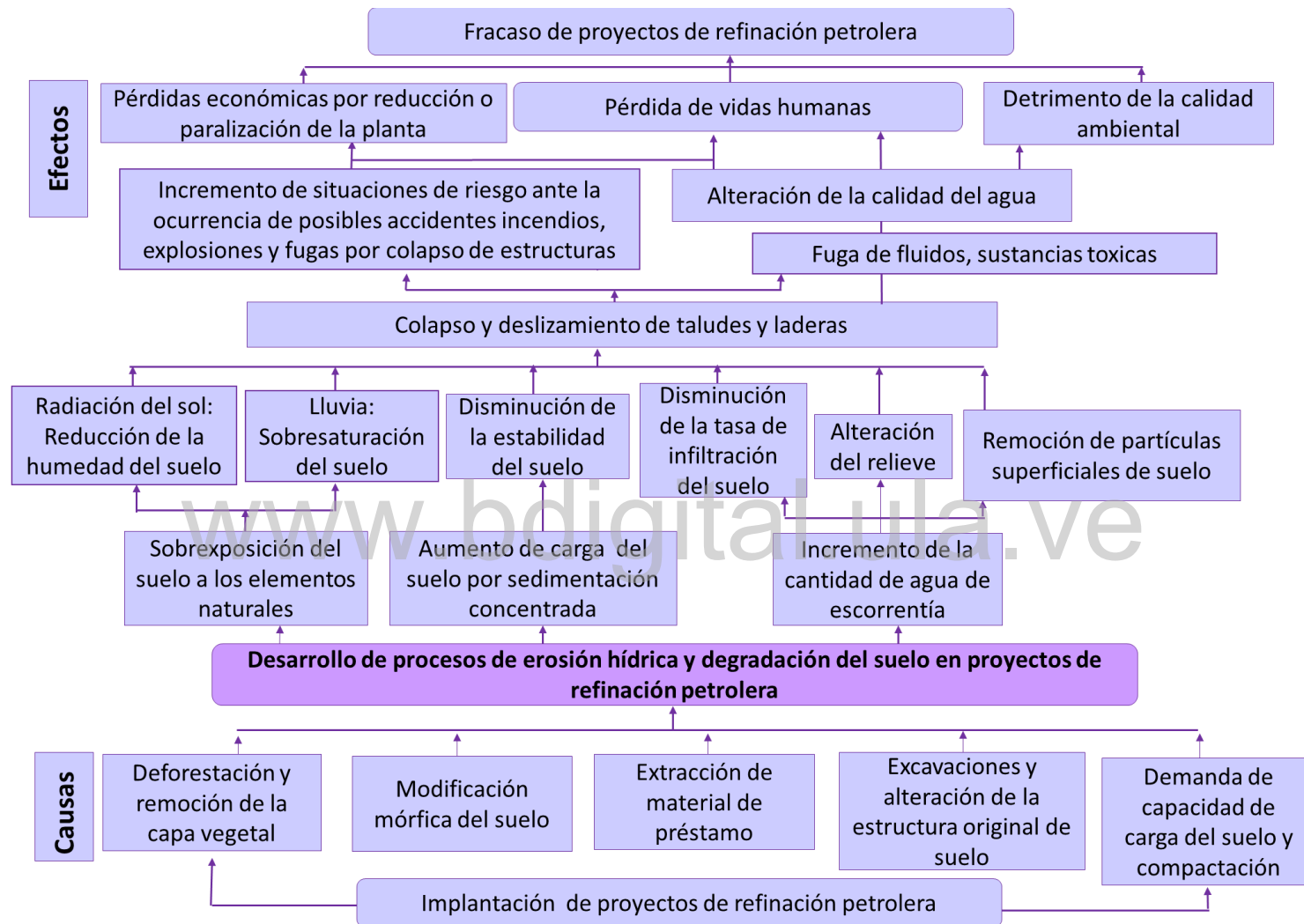
El suelo puede definirse desde la perspectiva agrícola como el soporte para la vida vegetal y la base de producción de alimentos. Mientras que, para el lado ambiental juega un papel crucial en los procesos ecosistémicos como regulación del agua y retención de nutrientes. Además, puede verse como cualquier material sin consolidar que se encuentra sobre la roca madre, compuesto por partículas minerales, materia orgánica, agua y aire, con la función principal de soportar estructuras ingenieriles. Sin embargo, a pesar de su importancia, el suelo no ha recibido de la sociedad la atención que merece; se han fomentado acciones antrópicas centradas en la alteración mórfica del suelo que han conducido a la disminución de su calidad, fertilidad y productividad, incidiendo negativamente en la propia utilidad. En este contexto, una de las funcionalidades del mismo suelo como depositario de recursos minerales y base física de desarrollos industriales, acentúa su exposición a la degradación. Un ejemplo de ello son los depósitos de hidrocarburos.

En este sentido, el petróleo representa un recurso natural no renovable que aporta el mayor porcentaje del total de la energía que se consume en el mundo. El petróleo es la fuente de energía más importante de la sociedad actual. Además, es la base de una de las principales actividades económicas a nivel mundial. Su producción y exportación es controlada por la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) creada en 1960, con sede en Viena. Esta organización en donde Venezuela ha jugado un rol importante por décadas busca establecer una política común a la hora de fijar un precio y unas cuotas de producción para el petróleo. Puede entenderse a raíz de lo expuesto, la importancia de la actividad petrolera como medio de sustento para la humanidad. Sin embargo, su relevancia también representa uno de los motivos principales de la disminución de la calidad del suelo.

El aprovechamiento del petróleo lleva consigo la alteración de las características originales del suelo. Comenzando desde su explotación donde se requiere la perforación de pozos, hasta su refinación donde se involucran plantas de refinación, unidades de almacenamiento y transporte. Los impactos más resaltantes asociados a esta actividad corresponden a la pérdida del recurso suelo por remoción de la capa vegetal, modificación de la estructura del suelo, compactación y reducción de la tasa de infiltración. En consecuencia, todo impacto ambiental negativo implica una serie de efectos que pueden derivar en mayores riesgos y accidentes. En el caso especial de las refinerías su implantación involucra acciones capaces de acentuar procesos de erosión hídrica como cortes de laderas, deforestación, extracción de material de préstamo, así como construcción de infraestructura. A estas acciones se asocian riesgos de desestabilización de taludes, derrumbes, deslizamientos y contaminación de cursos de agua; resultando en incendios, explosiones, fugas químicas, además de lamentables pérdidas de vidas humanas. Sin dejar de lado las mermas económicas generadas por la reducción o paralización de una planta de esta índole.

Una vez comprendido que la actividad petrolera representa la principal actividad económica del país y de muchas partes del mundo; es momento de plantear alternativas que permitan evitar, disminuir y mitigar su impacto ambiental, pero también impedir accidentes desencadenados por todas las acciones de modificación del suelo que en este tipo de proyecto agudizan los procesos de erosión hídrica. Esto solo es posible desarrollando metodologías que consideren como una pieza fundamental la gestión ambiental en el camino para el desarrollo sostenible. Por lo tanto, es importante fomentar líneas de investigación orientadas a analizar las actividades de refinación petrolera y su afectación sobre el recurso suelo, de tal manera que estimulen a las compañías y organismos competentes a implementar prácticas de control para que dicha actividad sea sostenible. En consecuencia, esta investigación está centrada en desarrollar una metodología para la selección de prácticas de control de erosión hídrica en proyectos de refinación petrolera. A sabiendas que existen prácticas adaptadas a otro tipo de proyectos como agricultura, minería y ganadería, pero no para los proyectos de refinación.

A continuación, se presenta el árbol de problemas (Figura 1.1), realizado para la presente investigación, siguiendo la metodología de Marco Lógico, la cual fue incorporada en 1998 por el Banco Mundial (BM) utilizado en el diseño, ejecución y evaluación de proyectos sociales de desarrollo. En este árbol, se pueden observar las causas y efectos que produce la ausencia de la una metodología para la selección de prácticas de control hídrica de suelos en proyectos de refinación petrolera.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 1.1. Árbol de problemas planteado en la investigación.

1.3 Justificación.

Los recursos no renovables como lo son el petróleo y el gas, hasta ahora, son hidrocarburos esenciales para desarrollo del hombre, pues son la materia prima para la obtención de subproductos como: combustibles, lubricantes, plásticos, productos de limpieza, pinturas, asfalto, entre otros. Además de representar la principal fuente de ingreso de muchos países. Sin embargo, toda actividad antrópica ocasiona un impacto ambiental. Las actividades de refinación petrolera no son la excepción a esta norma; la implantación de elementos e infraestructuras que facilitan el procesamiento de estos fluidos extraídos de grandes profundidades del subsuelo conllevan alteraciones a los componentes ambientales especialmente el recurso suelo.

Este tipo de obras ocasionan, desde la implantación del proyecto, alteraciones sobre el suelo que, si no son tratadas oportunamente, ocasionarán daños irreversibles. Uno de estos impactos es la erosión hídrica del suelo promovida por la deforestación, los cortes de laderas, construcción de terrazas, excavación del suelo, compactación e incluso otro tipo de degradación asociada como vertido de fluidos y materiales de construcción. La erosión hídrica por su parte puede resultar más agresiva y con mayores afectaciones en comparación con otros tipos de erosión como por ejemplo la eólica. Tal como es posible imaginarse estas acciones vienen acompañadas de una cantidad considerable de riesgos pues son capaces de desatar deterioro sobre los elementos del proyecto.

Bajo el escenario planteado donde los procesos de erosión hídrica y la degradación física o química del suelo tengan lugar, pueden ocurrir movimientos de masa como deslizamientos de laderas, colapso de taludes además de modificaciones en el patrón de corrientes de agua, aumento de suspensión de partículas y contaminantes, entre otros. En consecuencia, las afectaciones sobre la refinería y las personas relacionadas a ella serán inmediatas. En primer lugar, la operatividad de la planta será interrumpida, pues ante un accidente la producción es paralizada o reducida. Del mismo modo si llegara a existir afectación sobre el patio de tanques habrá disminución en el almacenamiento, en consecuencia, el despacho de productos se encontrará por debajo del volumen esperado y muy probablemente fuera de los lapsos de tiempo requeridos. El reflejo de los problemas mencionados conduce a la merma de ingresos económicos.

Adicionalmente, las distintas unidades de servicio como los hornos, torres de destilación, torres de enfriamiento, tanques, oleoductos y gasoductos; pueden estar expuestos a procesos de quiebres del terreno o sepultamiento. Culminado en fugas, explosiones, incendios, pero aún más grave en pérdida de vidas humanas. Cabe destacar que, aunque dentro de las empresas encargadas de los proyectos de refinación petrolera existen en muchos casos manuales de gestión ambiental, los mismos no siempre responden a las técnicas más favorables para el ambiente sino a motivos de índole económica, favoreciendo siempre a los de menor costo. Adicionalmente, el problema de la erosión hídrica en este tipo de proyectos puede llegar a ser subestimado y tratado muy superficialmente.

Es por ello que en esta investigación además de caracterizar los impactos ambientales asociados a la erosión hídrica se busca establecer una metodología para la selección de prácticas de control de erosión hídrica en proyectos de refinación petrolera, que vaya de la mano con la gestión ambiental apropiada y el desarrollo sostenible. Esto permitirá a mediano y largo plazo la reducción de situaciones de riesgo y accidentes para las personas que laboran dentro de los proyectos de refinación, así como también la

población cercana a las instalaciones; salvaguardando sus vidas. Además, promoverá la efectividad en el desarrollo de las actividades de la planta generando mejores valores económicos y no menos importante la preservación de la calidad ambiental.

1.4 Objetivos de la Investigación.

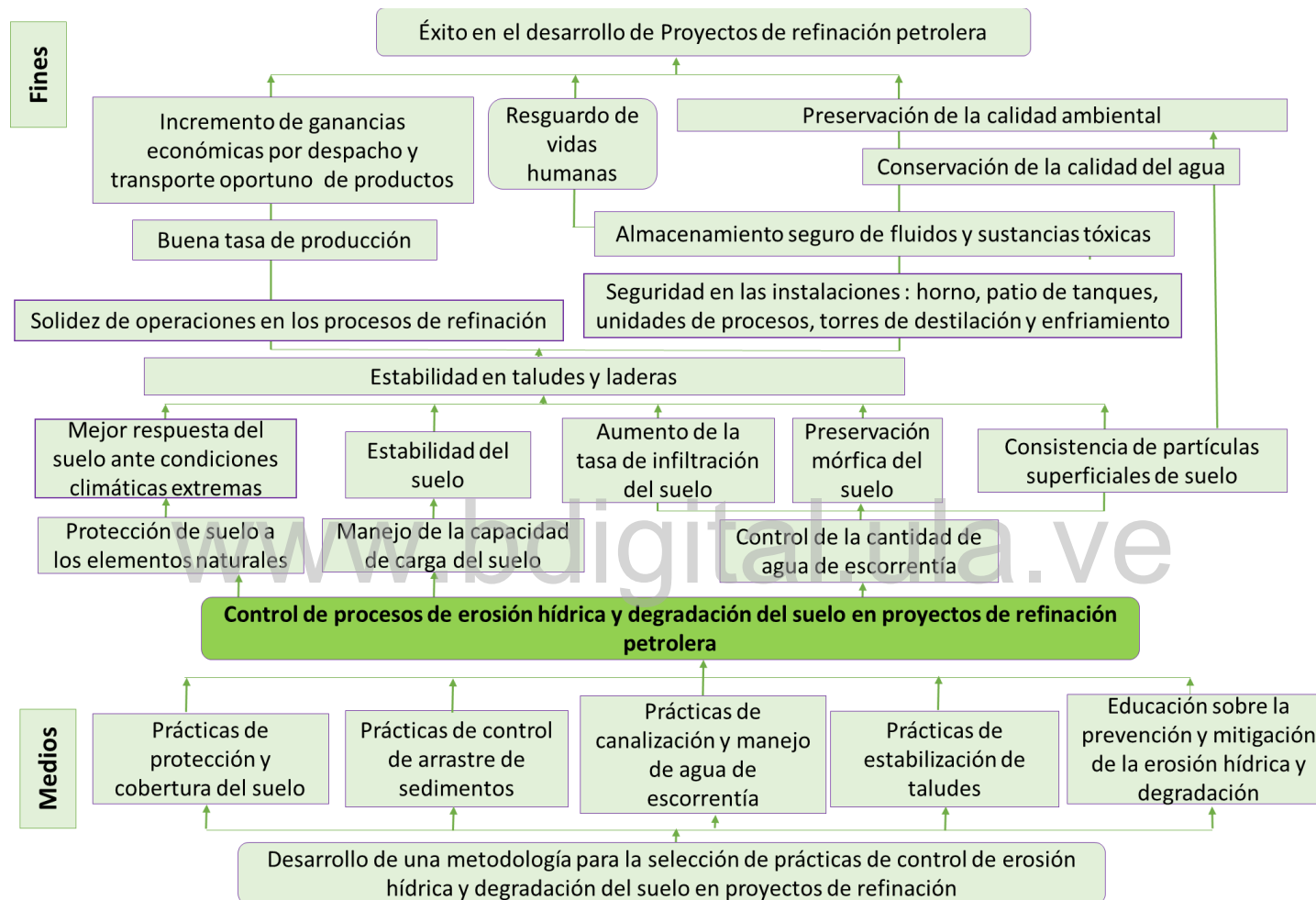
En esta sección se describirán los objetivos que busca cumplir la presente investigación; de igual manera se expone el árbol de objetivos propuesto, en donde se muestran los medios y fines que se lograran con el cumplimiento de los objetivos planteados (Figura 1.2).

1.4.1 Objetivo General.

Desarrollar una metodología para la selección de prácticas de control de erosión hídrica de suelos y otros procesos de degradación asociados a proyectos de refinación de petróleo, como herramienta de gestión ambiental mediante la revisión de prácticas de control existentes en proyectos de diferente naturaleza.

1.4.2 Objetivos Específicos.

- Analizar las características de alteración del recurso suelo por erosión hídrica y otros procesos de degradación asociados a proyectos de refinación de petróleo mediante un análisis ambiental, que permita la identificación de los impactos más resaltantes.
- Estimar los riesgos tecnológicos relacionados a los impactos ambientales por erosión hídrica y otros procesos de degradación según su probabilidad de ocurrencia y amenaza para su consideración en la selección de las prácticas de control.
- Caracterizar las prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación existentes, a través de la revisión de medidas empleadas en proyectos de distinta naturaleza para su comparación y posterior análisis.
- Evaluar los criterios de selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación en proyectos de refinación petrolera a juicio de experto, usando una matriz de comparación por pares para su jerarquización según su grado de relevancia.
- Valorar las prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación identificados respecto a los factores de selección, mediante juicios de valor que permitan clasificarlas según su adecuación.
- Generar una metodología de selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación para el recurso suelo adaptada específicamente para instalaciones de proyectos de refinación de petróleo y su aplicación al caso de estudio de la Refinería de Amuay.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 1.2. Árbol de objetivos planteado en la investigación.

1.5 Alcances.

Los alcances de la investigación se establecen en un análisis exhaustivo de los impactos ambientales generados por la actividad de refinación petrolera sobre el recurso suelo, evaluando a profundidad únicamente el subcomponente físico suelo y la significancia de los procesos de erosión hídrica asociados. A estos impactos se le aplicará la matriz de evaluación rápida de impacto RIAM con la finalidad de Jerarquizar los impactos identificados, además de considerar los riesgos tecnológicos relacionados dichos impactos. De esta manera se pasará a realizar un contraste entre las técnicas de control de erosión hídricas aplicadas en proyectos de distinta naturaleza mediante una revisión bibliográfica. Finalmente, la consideración de todos los criterios permitirá diseñar una metodología de selección de prácticas de control especial para proyectos de refinación petrolera.

Esta investigación será por completo de carácter documental encargada de recopilar, examinar y evaluar la información relacionada con el objeto de estudio. Por lo tanto, no se realizarán visitas de campo para recopilar información. Como base del estudio se toma el antecedente de Semprun (2017), quien identifica los procesos de erosión hídrica del suelo como el principal problema en la desestabilización los taludes del C.R.P “Centro de Refinación Paraguaná”. Asimismo, los trabajos previos relacionados con metodologías para proyectos de refinación petrolera son prácticamente inexistentes lo que limitará la exposición de antecedentes.

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.

Dentro de este capítulo se presentan los antecedentes, bases conceptuales y legales, que sustentan el desarrollo de esta investigación.

2.1 Antecedentes de la Investigación.

Abordando el tema de los impactos asociados a la actividad petrolera Vargas (2020) realiza un estudio de los impactos ambientales de la producción petrolera en Colombia y su relación con la innovación tecnológica en los últimos quince años. El autor analiza los principales impactos generados a los medios biótico, abiótico y socioeconómico durante la explotación petrolera, así como las principales actividades a las cuales se atribuyen estos impactos. Adicionalmente, evalúa estos impactos y jerarquiza tres tecnologías para su mitigación.

En el mismo sentido, Semprun (2017), expone en su trabajo la problemática de erosión a lo largo de los acantilados Oeste de la Península de Paraguaná dentro de las instalaciones de la Refinería Amuay. Asimismo, Lambe (1993) en Semprun (2017) señala que los continuos deslizamientos y desprendimientos del suelo que han ocurrido durante los últimos años en los taludes del C.R.P “Centro de Refinación Paraguaná” por erosión, han contribuido a la reducción de almacenamiento de desechos de crudo y por ende una falla en las operaciones y procesos del C.R.P. Por tal motivo, el autor realiza la caracterización de las condiciones de los diques y taludes en la Refinería de Amuay utilizando sistemas de información geográfica, con el fin de aportar estrategias para los problemas de erosión.

El estudio comienza por describir el material empleado para la construcción de los diques de tierra que se construyeron alrededor de los tanques de almacenamiento con propósito de contener fugas de hidrocarburos o agua. La composición señalada corresponde a suelos impermeables libres de materia orgánica clasificados como gravas arcillosas, el método de protección contra erosión en la cara interna del dique es generalmente una mezcla de asfalto y kerosén o gasoil, también se emplea malla electrosoldada y hormigón proyectado. Posteriormente, se detallan las características del área de estudio geología, geomorfología, relieve, suelos, clima, hidrografía, vegetación y fauna; con el objeto de comprender el escenario físico natural que engloba a la refinería. A continuación, el autor llevó a cabo la identificación de las condiciones de los diques y taludes del Complejo de Refinación mediante la interpretación de fotografías aéreas, visitas a campo y la integración de los datos mediante los Sistemas de Información Geográfica para construir mapas de pendientes y modelos de elevación digital.

Como resultado del trabajo Semprun identificó que el área total del complejo es de 568,96ha de las cuales 25% se encuentra afectada por erosión hídrica. Los diques abarcan 187,14 ha y los taludes 44,76 ha del área total. Los diques pertenecientes a los patios de almacenamiento se encuentran erosionados en un 63,51 % siendo el tipo de erosión más relevante la erosión laminar. En cuanto a los taludes el 36,67 % están en condiciones de erosionabilidad, con predominancia de erosión en surcos. Finalmente, mediante un análisis breve de criterios el autor propone como método de estabilización de diques tratamiento lineal con sacos de tierra.

Por su parte, Nápoles et al (2005) llevan a cabo la caracterización de suelos de la refinería “Hermanos Díaz”, evaluando la tratabilidad de estos, fertilizando con nutrientes.

Los principales resultados demostraron contaminación por hidrocarburos entre 4 y 12% siendo los valores más altos para los suelos con alto contenido de arenas y deficiencia de oxígeno producto a la presencia de petróleo elemento que impide la circulación de aire y medio acuoso edáfico finalmente demostraron que las técnicas de biorremediación respondieron mejor para los suelos con bajo aporte de CO₂.

En cambio, Francke et al (2004) proponen un manual de control de erosión, con el propósito de desarrollo y aplicación de técnicas de viverización, forestación y conservación de suelos y aguas, para la recuperación de terrenos degradados por procesos de erosión y desertificación. Para los autores entre los principales problemas ambientales de Chile se reconocen procesos de erosión y degradación del suelo los cuales afectan aproximadamente 45 % del territorio. El estudio se realizó en 120 ha de microcuencas de la zona semiárida de Chile por un periodo de 6 años desde marzo de 1993. Los resultados indicaron que la combinación de técnicas de control de erosión y de forestación, con enfoques integrales de uso múltiple a nivel de microcuencas, permiten recuperar de forma sostenible zonas rurales degradadas. En este sentido el manual plantea tratamientos de regulación de flujos hídricos, tratamientos de incremento de la infiltración, tratamientos lineales de control de laderas y taludes, tratamientos de cubiertas superficiales, tratamientos de regulación de flujos hídricos en cauces y tratamientos biológicos.

A su vez, Pando et al (2003) plantean la comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica. El objetivo fundamental del trabajo fue estimar la erosión hídrica mediante un método directo y mediante la ecuación RUSLE en una microcuenca en el noreste de México. Para ello se estratificó la cuenca en unidades geomorfológicas para el método directo y en unidades ambientales para los métodos indirectos; estas últimas fueron agrupadas al interior de las unidades geomorfológicas a fin de comparar los resultados obtenidos por uno y otro método. La comparación arrojó como resultado que los valores de erosión obtenidos por el método indirecto variante FAO, para la microcuenca en su conjunto, fueron estadísticamente iguales a los obtenidos por el método directo.

López (2002) en su investigación sobre la degradación del suelo, expone las principales causas de pérdida de los suelos, entre las que destaca la ocupación del suelo por explotación de yacimientos e implantación de infraestructura de tipo industrial. Dentro de este trabajo describe los impactos más significativos generados por los agentes causantes de la degradación y algunas medidas correctoras. Establece una diferenciación entre tres agentes como lo son el impacto por ocupación representado por la superficie afectada o a ser ocupada del proyecto, impacto por contaminación relacionada a los contaminantes que se aportan a raíz de las actividades del proyecto y finalmente el impacto por sobreexplotación del suelo asociado a la pérdida de la productividad por erosión laminar y en surco.

Cuberos (1994) diseña un manual de manejo y conservación de suelos y aguas en torno al incremento de la producción agrícola y ganadera en Costa Rica. Cuberos destaca el aumento de la producción nacional, ampliando la frontera agrícola e intensificando la mayoría de las actividades agropecuarias. Para el autor los suelos del país se deterioran aceleradamente, causando una disminución de su productividad pues el 39% del área agrícola se encontraba para la fecha con un alto grado de erosión hídrica. Así pues, plantea la necesidad de tomar medidas que permitan aumentar la productividad al hacer uso de suelos y cultivos con tecnologías rentables apropiadas. Entre los aspectos más importantes que se incluyen dentro del manual se encuentran: los parámetros para la capacidad de uso del suelo, técnicas de conservación agronómica, técnicas de

conservación de suelos utilizando medidas estructurales y elementos para la evaluación del seguimiento de los trabajos de conservación de suelos.

2.2 Marco Legal.

En esta sección se presentan las leyes y lineamientos vigentes considerados de mayor relevancia con el tema de estudio, con la finalidad presentar una breve y precisa revisión de los principales aspectos legales que rigen la gestión integral de riesgo a nivel nacional, regional y local.

2.2.1 Constitución de la República Bolivariana de Venezuela (1999).

Se considera la variable ambiental en la constitución de 1999 como un eje transversal a lo largo del desarrollo del contexto constitucional. Pero específicamente, su capítulo IX, reflejado en los artículos del 127 al 129, considera los derechos del ambiente como mandato que todos los venezolanos están en la obligación de cumplir y hacer cumplir cada decreto establecido por la constitución.

Artículo 127. Expone lo relativo al derecho y deber de las generaciones de proteger y mantener el ambiente, también expresa que toda persona tiene derecho individual y colectivo a disfrutar de una vida y de un ambiente seguro, sano y ecológicamente equilibrado. Que es una obligación fundamental del Estado proteger el ambiente, la diversidad biológica y demás áreas de especial importancia ecológica. Así mismo que el Estado, con la activa participación de la sociedad, pueda garantizar que la población se desenvuelva en un ambiente libre de contaminación, en donde el aire, el agua, los suelos, las costas, el clima, la capa de ozono, las especies vivas, sean especialmente protegidos.

El Artículo 128. Refiere que el Estado desarrollará una política de ordenación del territorio según sean las realidades ecológicas, geográficas, poblacionales, sociales, culturales, económicas, políticas, de acuerdo con las premisas del desarrollo sustentable.

El Artículo 129. Menciona que todas las actividades susceptibles de generar daños a los ecosistemas deben ser previamente acompañadas de estudios de impacto ambiental y sociocultural: También señala la obligación de conservar el equilibrio ecológico y de restablecer el ambiente a su estado natural si éste resultare alterado.

2.2.2 Ley Orgánica del Ambiente (2006).

Tiene por objeto establecer las disposiciones y desarrollar los principios rectores para la gestión del ambiente en el marco del desarrollo sustentable como derecho y deber fundamental del Estado y de la sociedad, para contribuir a la seguridad del Estado y al logro del máximo bienestar de la población y al sostenimiento del planeta en interés de la humanidad. De igual forma establece las normas que desarrollan las garantías y derechos constitucionales a un ambiente seguro, sano y ecológicamente equilibrado. Promulgada en Gaceta Oficial de la República de Bolívar de Venezuela Extraordinaria No. 5.833 del 22 de diciembre de 2006. (Deroga la Ley Orgánica del Ambiente publicada en Gaceta Oficial de la República de Venezuela No. 31.004 del 16 de junio de 1976).

En el artículo 3, define a la gestión ambiental, como todas aquellas actividades administrativas, que determinen y desarrollen las políticas, objetivos y responsabilidades ambientales y su implementación, a través de la planificación, el control, la conservación y

el mejoramiento del ambiente. Asimismo, en el artículo 3 establece diferentes definiciones. A los efectos de la presente Ley, se entenderá por:

Contaminación: Liberación o introducción al ambiente de materia, en cualquiera de sus estados, que ocasione modificación al ambiente en su composición natural o la degrade.

Contaminante: Toda materia, energía o combinación de estas, de origen natural o antrópico, que al liberarse o actuar sobre la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier otro elemento del ambiente, altere o modifique su composición natural o la degrade.

Evaluación de impacto ambiental: Es un proceso de advertencia temprana que opera mediante un análisis continuo, informado y objetivo que permite identificar las mejores opciones para llevar a cabo una acción sin daños intolerables, a través de decisiones concatenadas y participativas, conforme a las políticas y normas técnicas ambientales.

Impacto ambiental: Efecto sobre el ambiente ocasionado por la acción antrópica o de la naturaleza.

Estudio de impacto ambiental y sociocultural: Documentación técnica que sustenta la evaluación ambiental preventiva y que integra los elementos de juicio para tomar decisiones informadas con relación a las implicaciones ambientales y sociales de las acciones del desarrollo.

Restablecer: Aplicación de un conjunto de medidas y acciones a objeto de restaurar las características de los elementos del ambiente que han sido alteradas o degradadas, por un daño ambiental de origen antrópico o natural

Por su parte en el artículo 4 en el numeral 6, hace énfasis en la educación ambiental como parte fundamental en la conservación de un ambiente sano, seguro y ecológicamente equilibrado, cuya aplicación debe ser un valor ciudadano y se debe incorporar en todos los niveles educativos formales o no. En este mismo artículo en el numeral 2, establece la prevención como la medida que debe prevalecer sobre cualquier otro criterio en la gestión ambiental.

Adicionalmente el Artículo 61 La gestión integral del suelo y del subsuelo orientada a la conservación para garantizar su capacidad y calidad

2.2.3 Ley Penal del Ambiente (2012).

Tiene por objeto tipificar como delitos los hechos atentatorios contra los recursos naturales y el ambiente e imponer las sanciones penales. Asimismo, determinar las medidas precautelativas de restitución y de reparación a que haya lugar y las disposiciones de carácter procesal derivadas de la especificidad de los asuntos ambientales. Promulgada en Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela No. 39.913 Extraordinario del 02 de mayo de 2012.

2.2.4 Ley Forestal de Suelos y de Aguas (1966).

Rige la conservación, fomento y aprovechamiento de los recursos naturales que en ella se determinan y los productos que de ella se derivan. Gaceta Oficial de la República de Venezuela No. 997 Extraordinario del 08 de enero de 1966. (Gaceta Oficial de la República de Venezuela No. 1.004 Extraordinario del 26 de enero de 1966, donde se

reimprime por error en el original). Resolución No. 078 de fecha 08-03-66, emanada del Ministerio de Agricultura y Cría, por la cual téngase por oficial la edición de la Ley Forestal de Suelos y de Aguas. Gaceta Oficial de la República de Venezuela No. 27.981 del 09 de marzo de 1966.

2.2.5 Ley de Aguas (2007).

Tiene por objeto establecer las disposiciones que rigen la gestión integral de las aguas como elemento indispensable para la vida el bienestar humano y el desarrollo sustentable del país y es de carácter estratégico e interés de Estado. Plantea la gestión integral de las aguas y de las cuencas hidrográficas a través del manejo del suelo. Promulgada en la Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 38.595 de fecha 02 de enero de 2007.

2.2.6 Decreto No. 2.220 Normas para regular las actividades capaces de provocar cambios de flujo, distribución de cauces y problemas de sedimentación (1992).

De fecha 23 de abril de 1992, por el cual se dictan las Normas para Regular las Actividades Capaces de Provocar Cambios de Flujo, Obstrucción de Cauces y Problemas de Sedimentación. Gaceta Oficial de la República de Venezuela No. 4.418 Extraordinario del 27 de abril de 1992.

2.2.7 Resolución No. 56 Normas sobre recaudos para la evaluación ambiental de programas y proyectos mineros y de exploración y producción de hidrocarburos (1996).

De fecha 04 de julio de 1996, emanada del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, por la cual se dictan las normas sobre recaudos para la evaluación ambiental de programas y proyectos mineros y de exploración y producción de hidrocarburos. Promulgado en la Gaceta Oficial de la República de Venezuela No. 5.079.

2.2.8 Norma Internacional ISO 14001 requisitos de los sistemas de gestión ambiental con orientación para su uso (2015).

La Organización Internacional de Normalización establece mediante esta norma los requisitos de los sistemas de gestión ambiental con orientación para su uso Esta Norma Internacional especifica los requisitos para un sistema de gestión ambiental, destinados a permitir que una organización desarrolle e implemente una política y unos objetivos que tengan en cuenta los requisitos legales y otros requisitos que la organización suscriba, y la información relativa a los aspectos ambientales significativos. Se aplica a aquellos aspectos ambientales que la organización identifica que puede controlar y aquellos sobre los que la organización puede tener influencia. No establece por sí misma criterios de desempeño ambiental específicos.

2.2.9 Convenios internacionales suscritos y ratificados por Venezuela.

2.2.9.1 Convenio de Estocolmo sobre contaminación orgánica persistente (2004).

El convenio de Estocolmo sobre contaminantes Orgánicos persistente, que entró en vigor en el 2004, tiene como objetivo proteger la salud humana y el medio ambiente de contaminantes orgánicos persistentes (COPs). El convenio requiere que las partes tomen

medidas para eliminar o reducir la producción, utilización, importación, exportación y emisión al medio ambiente de COPs e incluye deposiciones en cuanto al acceso a la información, la sensibilización y formación del público y la participación en el desarrollo de planes de aplicaciones.

2.2.9.2 Convenio de Rotterdam (2004).

Para la aplicación del procedimiento de consentimiento fundamentado previo a ciertos plaguicidas y productos químicos peligrosos objeto de comercio internacional.

Entro en vigor desde 2004, tiene por objeto promover la responsabilidad compartida y los esfuerzos conjuntos de las partes en la esfera del comercio internacional de ciertos productos químicos peligrosos a fin de proteger la salud humana y el medio ambiente frente a posibles daños. El convenio establece un procedimiento de consentimiento previo informado (CPI) para la importación de productos químicos peligrosos.

2.2.9.3 Protocolo de Kioto del Convenio de la convención de marco sobre el cambio climático (2005).

El protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio Climático aprobado el 11 de diciembre de 1997 y con entrada en vigor de 16 febrero de 2005 luego de ser ratificado por partes de la convención, estableciendo como metas vinculantes la reducción de las emisiones de gases de efectos invernaderos para los países industrializados, identificando que son los principales responsables de los elevados niveles de emisiones que hay actualmente en la atmosfera y bajo el principio de las responsabilidades comunes pero diferenciadas.

2.3 Bases Conceptuales.

2.3.1 Suelo.

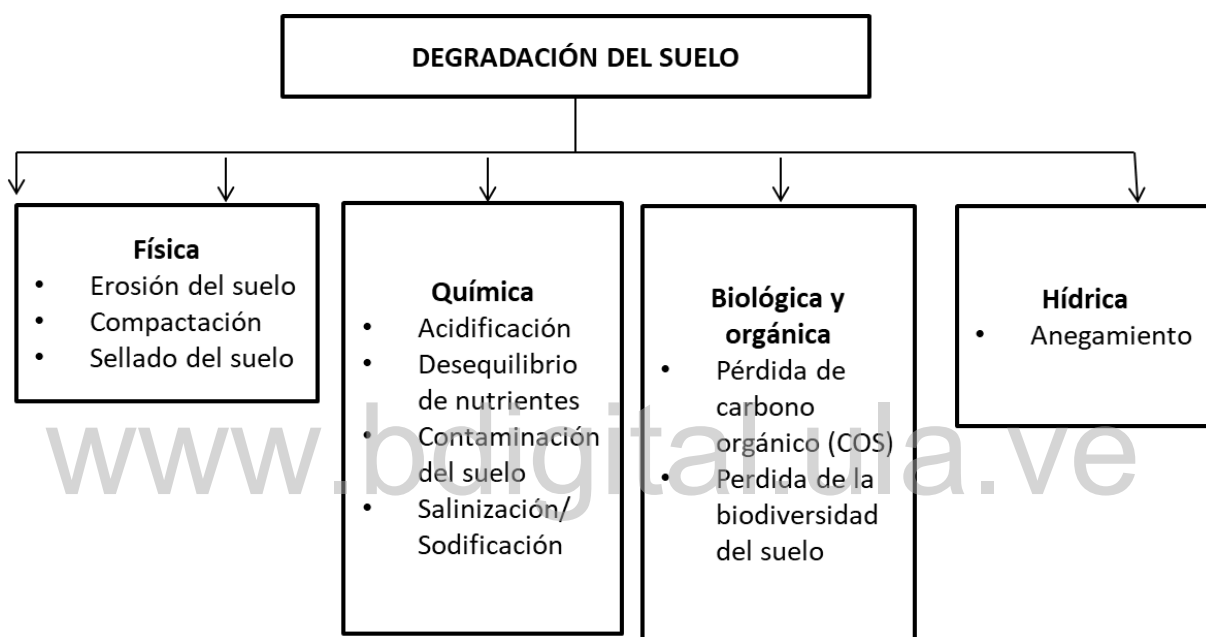
Según Flores et al (2004), constituye la capa superficial del manto, cuya profundidad es variable. Está compuesto por partículas minerales, organismos vivos, materia orgánica, agua y sales. La mayoría de los componentes provienen de la meteorización de rocas, descomposición de restos vegetales, y la acción de microorganismos descomponedores. El suelo constituye uno de los recursos naturales más importantes. Desde el punto de vista de servicios ecosistémicos, contribuye directa e indirectamente al bienestar humano. El suelo cumple así servicio de abastecimiento: de alimento y materias primas; también servicios de regulación: en cuanto a la calidad del aire y del agua, mitigación del cambio climático, protección y formación de suelo. Finalmente, los servicios culturales: recreativos, estéticos, espirituales igualmente fundamentales para el bienestar humano.

2.3.2 Degradación del suelo.

La degradación del suelo, es la pérdida de su productividad y utilidad actual o potencial, que implica el desmejoramiento del suelo en su capacidad inherente para producir bienes y servicios y para realizar sus funciones de regulación ambiental. En este sentido, los múltiples servicios ecosistémicos del suelo como producción de alimentos, purificación del agua, reciclaje de nutrientes, regulación del clima y conservación de la biodiversidad son una parte fundamental para el bienestar de la vida en todo el planeta. Así pues, cualquier alteración que afecte o disminuya la funcionalidad de dichos servicios se verá reflejada en la propia calidad de vida. En otras palabras, La degradación involucra cambios adversos

en las propiedades del suelo que reducen su habilidad para llevar a cabo sus servicios (Lal (1998) en López (2002)).

En el mismo orden de ideas, a partir informe sobre el Estado Mundial del Recurso Suelo (SWSR) publicado por la FAO y la Alianza Mundial por el Suelo (GSP) en 2016, se identificaron 10 amenazas principales que degradan las funciones del suelo a nivel global. El mismo establece cuatro tipos principales de degradación de suelos: La primera de ellas física, debido al desplazamiento del suelo y alteración de su estructura; la segunda: química respecto a la alteración de su composición, por su parte la tercera está relacionada a la degradación biológica por pérdida de carbono orgánico y finalmente la degradación hídrica representada por el comportamiento del agua en el perfil del suelo. El resumen de estos procesos de degradación asociados puede observarse en la Figura 2.1.



Fuente: FAO y GTIS. (2016).

Figura 2.1. Principales tipos de degradación del suelo.

2.3.4 Erosión del suelo.

La erosión es el proceso de desprendimiento y arrastre del suelo y/o fragmentos de roca por acción del agua, el viento, el hielo o la gravedad (SCSA 1982 en López 2002). De acuerdo a si existe o no la influencia de la acción del hombre, en el desarrollo de los procesos de erosión, pueden distinguirse dos clases generales de erosión: la geológica o natural asociada a un proceso lento e imperceptible, es el desgaste natural de la superficie terrestre sin la intervención del hombre; contribuyendo a la formación del relieve, a los procesos de meteorización de las rocas y a la formación de los suelos.

Por otra parte, la acelerada o antrópica es inducida por la actuación del hombre que interfiere y rompe el equilibrio existente entre los suelos, la vegetación, el agua y el viento, lo cual da lugar a formaciones terrestres erosivas y otras condiciones anormales, como son las cárcavas o zanjas, los subsuelos descubiertos por la erosión laminar, los derrumbes, las carreteras socavadas, los lagos y reservorios colmatados y los cauces de

los ríos obstruidos por sedimentos. Considerándolo como proceso de degradación el término erosión hace referencia a la erosión acelerada.

El viento y el agua son los principales agentes generadores de la erosión, y de acuerdo al agente erosivo actuante que se distinguen dos formas generales de erosión: erosión eólica y erosión hídrica.

2.3.4.1 Erosión eólica.

Dondequiera que el suelo sea débilmente agregado, seco, la superficie lisa y desnuda y los vientos sean fuertes, habrá propensión a la erosión eólica. De hecho, las zonas más severamente afectadas por este proceso de degradación son aquellas de climas áridos y semiáridos. Sin embargo, la erosión eólica es también severa en algunas regiones húmedas, donde los vientos fuertes pueden desarrollarse moviendo dunas en las zonas costeras (Donahue et al (1983) en López (2002)).

Así mismo García 1967 en López 2002 menciona que el proceso de la erosión eólica puede representarse como un ciclo que involucra al conjunto de los procesos de estabilización, inestabilización y erosión ocasionada por el viento, con la inclusión de las condiciones que resultan de dichos procesos. Asociados al ciclo de la erosión eólica se presentan los procesos de formación y remoción del suelo. Cuando se trata de controlar la erosión, los esfuerzos deben ser orientados en el sentido de modificar los procesos que afectan a la remoción del suelo para que la intensidad de las pérdidas que lo afectan no exceda la tasa de su formación.

2.3.4.2 Erosión hídrica.

La erosión hídrica es un proceso continuo que consiste en la separación de las partículas y agregados de la masa del suelo, su transporte y sedimentación, siendo el agente activo el agua. se inicia cuando las gotas de lluvia golpean terrones y agregados en la superficie de un suelo desnudo, causando el movimiento de las partículas más finas como sedimento en suspensión en el flujo del agua, el cual en su movimiento cuesta abajo, va abriendo surcos a lo largo de la vía (López (2002)). La denudación del suelo, condición que propicia el desarrollo de los procesos de erosión, ocurre al remover la cobertura vegetal protectora por el laboreo del suelo para el cultivo, la quema de residuos de cosecha, el sobrepastoreo, la deforestación excesiva, y por la disturbación drástica del suelo por el uso de maquinaria pesada en la construcción de vías, obras de infraestructura y minería en superficie y en labores agrícolas y forestales (Donahue et al (1983) en López (2002)).

Según Gómez y Alarcón (1975), Gásperi (1978) y Hudson (1981) en López (2002) se pueden distinguir las siguientes formas de erosión hídrica:

2.3.4.2.1 Erosión hídrica pluvial o por salpicadura.

Es la erosión causada por el impacto de las gotas de lluvia al caer sobre el suelo desnudo. Las gotas de lluvia caen con velocidades y energía variables de acuerdo a su diámetro, siendo capaces de desprender y dispersar partículas de los agregados del suelo. Las partículas más finas son arrastradas en suspensión en las aguas de escorrentía, iniciándose así otras formas de erosión. Evidencias que denotan la ocurrencia de erosión pluvial son las salpicaduras de partículas de suelo encontradas en el follaje más bajo de la vegetación, y la formación de costras una vez que el suelo se

seca. Actualmente se considera la salpicadura por acción del impacto de las gotas de lluvia como parte de los procesos de la erosión entre surcos.

2.3.4.2.2 Erosión hídrica pluvial o por escurrimiento.

Erosión laminar: arrastre más o menos uniforme y poco perceptible de delgadas capas de suelo superficial por acción del agua en flujo laminar. Los procesos responsables de esta forma de erosión, son actualmente considerados de manera conjunta con la salpicadura para integrar la erosión entre surcos.

Erosión en surcos: arrastre de material producido por la escorrentía concentrada en filetes líquidos, formando pequeños canales en la superficie del terreno.

Erosión en cárcavas: ocurre cuando hay una mayor concentración del escurrimiento, y la topografía del terreno permite la unión de surcos formándose zanjas de gran tamaño denominadas cárcavas. Las mismas pueden también provenir de pequeños canales que aumentan su tamaño con rapidez. En ancho de las cárcavas crece por socavación y desmoronamiento de sus paredes. En longitud, las cárcavas crecen de manera regresiva o remontante hasta llegar, en ocasiones, a la cima de las laderas.

2.3.4.2.3 Erosión hídrica por movimientos de masa.

Se debe, en términos generales y bajo condiciones particulares, a la acción del agua que se infiltra en el suelo, al desequilibrio del suelo ante dicha acción, y al efecto de la gravedad. Los movimientos de masa pueden ser de flujo lento (v.g. solifluxión) o de flujo rápido (v.g. derrumbes). Entre los principales tipos se tienen los siguientes:

Deslizamientos: ocurren debido a una saturación y aumento de peso de la masa del suelo en superficie. La existencia de una capa impermeable, a poca profundidad, impide la percolación del agua a estratos más profundos, y propicia la formación de un plano sobresaturado, que actúa como lubricante, sobre el cual se desliza la masa suprayacente a favor de la pendiente, por acción de la gravedad.

Derrumbes: son desmoronamientos progresivos, por acción del agua y la fuerza gravitacional, de las capas superficiales de los terrenos ubicados en zonas pendientes, que resultan en desplazamientos violentos de masas considerables de suelo. Este tipo de movimiento es frecuente en los cortes de carreteras y en los taludes de los ríos, debido al desbalance de las laderas por el socavamiento de sus bases.

Coladas de barro: movimiento del material causado por sobresaturación de la capa superior de los suelos delgados, que sobrepasa el límite líquido en terrenos muy pendientes, dando lugar a un movimiento o flujo rápido en forma de lodo.

Solifluxión: flujo muy lento de suelo o detritus saturados con agua, en el sentido de la pendiente, sobre un sustrato impermeable. Es ocasionado por flujos de agua internos provenientes de infiltración o de aguas subterráneas. Se hace evidente por la ocurrencia de postes inclinados, hundimientos suaves que forman terracetas que avanzan varios centímetros por año, con el potencial de destruir terrenos, construcciones, carreteras.

2.3.4.2.4 Erosión hídrica en túnel, sufusión.

Formación de túneles o canales continuos internos. Ocurre cuando el agua se infiltra en el suelo y se mueve hacia abajo hasta que se encuentra una capa de baja permeabilidad. El

agua entonces fluye lateralmente sobre la capa menos permeable, arrastrando las partículas finas del suelo más poroso. En la medida en que el flujo incrementa, el túnel se agranda, a tal punto, que puede conllevar al derrumbe del techo, dando lugar a un surco abierto o cárcava.

2.3.4.2.5 Erosión hídrica entre surcos.

Puede ser descrita como el proceso de separación y transporte del suelo por el impacto de las gotas de lluvia y por el flujo superficial. Sobre una misma pendiente, la erosión entre surcos se mantiene constante mientras las propiedades del suelo y la superficie se mantengan constantes. Ocurre generalmente a una distancia aproximada a 1 m del punto de impacto de la gota de lluvia, y descarga considerable cantidad de material a los canales vecinos.

2.3.4.2.6 Erosión hídrica en canales.

Es el proceso de desprendimiento y transporte de suelo debido al flujo del agua en el escurrimiento concentrado; incluye la erosión en surcos y en cárcavas. La erosión en canales es distinta y visiblemente diferente que la erosión entre surcos, pero la distinción se torna a veces confusa en los límites entre las áreas donde ambos procesos ocurren. En términos generales, casi toda la erosión que es visible es debida a erosión en canales. Para las pendientes cortas, la mayor parte de la erosión puede ser erosión entre surcos. En la medida en que las pendientes se incrementan en inclinación y longitud, la erosión en canales comienza a dominar. Los suelos, aparentemente, varían en un amplio rango en cuanto a su susceptibilidad

2.3.5 Conceptos petroleros de interés.

En torno a las actividades propias de los proyectos petroleros es necesario establecer las bases conceptuales que guardan relación con las actividades, productos e impactos asociados a los mismos. Para ello, en primer lugar, se mencionan los diferentes tipos de hidrocarburos recuperados o refinados y seguidamente las diferentes fases de la cadena de valor de los hidrocarburos. El comienzo de un proyecto petrolero marca la ejecución de trabajos preliminares, seguido de la perforación de un pozo para la extracción del recurso, posterior almacenamiento, transporte y refinación. Todo el proceso conlleva impactos que aparecen con la intervención inicial y pueden mantenerse a lo largo de la vida del proyecto, desencadenado riesgos potenciales si no se cuentan con las medidas de control apropiadas.

2.3.5.1 Tipos de Hidrocarburos.

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos constituidos principalmente por carbono e hidrógeno y que se encuentran en el subsuelo en forma sólida, líquida o gaseosa. La mezcla de diferentes tipos de hidrocarburos da como resultado el petróleo crudo contenido en yacimientos.

Químicamente, el petróleo es una mezcla muy heterogénea de hidrocarburos, aunque también presenta otros tipos de elementos minoritarios como azufre, oxígeno y nitrógeno, así como trazas de metales. La complejidad y variedad de hidrocarburos que se conocen derivan de la capacidad que tiene el átomo de carbono de formar enlaces, lo que puede dar lugar a moléculas lineales o cíclicas más o menos complejas.

Según Rodríguez (2013), los hidrocarburos pueden clasificarse en función de su estructura química en cinco grupos:

2.3.5.1.1 Hidrocarburos saturados.

Incluyen a los alcanos que son cadenas lineales (acíclicas) de carbono unidas por enlaces sencillos. Los alcanos son la familia más numerosa en el petróleo crudo y se conocen como parafinas. Estos pueden ser lineales o ramificados y su longitud varía de 1 a 40 átomos de carbono, aunque se han logrado detectar cadenas de hasta de 60 átomos de carbono. Cuando estas cadenas forman estructuras cíclicas dan lugar a los cicloalcanos o cicloparafinas, los cuales son componentes minoritarios del petróleo crudo.

2.3.5.1.2 Hidrocarburos insaturados.

Incluyen a los alquenos y alquinos que son cadenas lineales de Carbono unidas por enlaces dobles y triples, respectivamente.

2.3.5.1.3 Hidrocarburos aromáticos.

Los compuestos aromáticos son derivados del benceno, ciclos donde los átomos de carbono se unen por medio de enlaces simples y dobles alternados. Los anillos pueden encontrarse fusionados entre sí, dando lugar a los compuestos policíclicos aromáticos (PHA), constituyendo entre el 10 y 25 % del petróleo crudo y son las fracciones más pesadas. Por sus características fisicoquímicas resultan de más impacto hacia la salud humana y ambiental. Se les llama aromáticos debido a que muchos compuestos de esta serie tienen olores intensos y casi siempre agradables.

El investigador Miguel Antonio Flores del Instituto Mexicano de Transporte, señala en Flores (2004), que este tipo de hidrocarburos en su mayoría generan actividad carcinogénica en humanos y animales, de tal suerte que la presencia de estas sustancias químicas en suelos, y en yacimientos de agua de consumo humano representa un peligro enorme a la salud de quienes tengan contacto con sitios contaminados con hidrocarburos, ya que se trata de sustancias no metabolizables para el individuo, es decir, que el cuerpo humano no las puede degradar, pero tampoco desechar, de modo que son absorbidas por algún tejido principalmente en el adiposo de cualquier organismo por ser los hidrocarburos solubles en grasa, provocando la mutación de sus células dando como resultado diferentes tipos de cáncer.

2.3.6.1.4 Hidrocarburos resinicos.

Agregados con una multitud de grupos del tipo sulfóxido, amida, tiofenos, piridinas, quinolinas y carbazones.

2.3.6.1.5 Hidrocarburos asfálticos.

Están formados por agregados de poliaromáticos, ácidos naftalénicos, sulfuros, compuestos polifenólicos, ácidos grasos y metaloporfirinas. Estos últimos son a menudo considerados como no biodegradables o escasamente biodegradables

2.3.6 Etapas de la cadena de valor de los hidrocarburos e impactos ambientales asociados.

Con el fin de contextualizar la etapa en la que se suscriben las actividades relacionadas a los proyectos de refinación petrolera se expone la cadena de valor hidrocarburífera. Vargas (2020) plantea que está desarrollada en cuatro etapas principales. Estas etapas son la extracción del petróleo crudo desde su búsqueda, el transporte, el procesamiento y la distribución de los subproductos finales derivados del petróleo. En la Tabla 2.1 se muestra cada una de las etapas, con sus respectivas actividades y una breve descripción.

Tabla 2.1. Etapas de la cadena de valor de hidrocarburos.

ETAPA	ACTIVIDADES	DESCRIPCIÓN
EXTRACCIÓN	Exploración, perforación y producción	Etapa desde la búsqueda de crudo hasta la producción del mismo
TRANSPORTE	Transporte en oleoductos y gasoductos	Traslado desde el pozo hacia las plantas procesadoras
PROCESAMIENTO	Separación y refinación	Separación de hidrocarburos y refinación para obtener productos de uso final
COMERCIALIZACIÓN	Distribución y ventas	Se distribuyen los subproductos obtenidos en el mercado interno o se exporta

Fuente: Vargas (2020).

2.3.6.1 Exploración.

Para Ramos (2010) et al, la fase de exploración comprende la prospección y reconocimiento científico de yacimientos petroleros, que incluye estudios cartográficos y sísmicos. El primer paso es la adquisición de imágenes satelitales de la zona en la cual potencialmente se puede hallar hidrocarburos, para luego realizar exploración sísmica y perforación exploratoria, actividades con las cuales se tendrá total certeza de la existencia de yacimientos petrolíferos. La sísmica es un proceso mediante el cual se producen temblores artificiales a través de la detonación de explosivos subterráneos a intervalos regulares. Estas actividades generan fuertes impactos negativos en el medio ambiente ya que intervienen directamente sobre él. Los principales son: desestabilización de los suelos, deforestación, que trae como consecuencia erosión, pérdida de biodiversidad, ruido, con el que se ahuyentan los animales silvestres, pérdidas de nacientes de agua, contaminación de aguas por las explosiones y por los desechos domésticos de los campamentos, contaminación de aire (Almeida (2002) en Ramos et al (2010)).

2.3.6.2 Perforación.

Consiste en realizar en el subsuelo un hueco vertical, inclinado u horizontal, para alcanzar profundidades que van en promedio de 3 a 6 km de extensión con el objetivo de llegar a sitios conocidos como formaciones posiblemente productoras que pueden tener hidrocarburos (crudo, gas, condensados o una mezcla de estos). El hueco (pozo

petrolero) deja abierto el canal para extraer el crudo que contiene en emulsión agua de formación y gas natural, y el cual es analizado para determinar si la cantidad de petróleo es suficiente para la explotación del pozo (Salas (1980) en Ramos et al (2010)). Para el proceso de perforación se utilizan lubricantes o lodos de perforación que son mezclas preparadas con gran cantidad de aditivos químicos. Los componentes más utilizados incluyen: arcillas, baritina, bentonita y aditivos químicos tales como lignosulfonatos, goma xántica, sales, etc. Muchos de los aditivos son altamente tóxicos y pueden incluir biocidas, bactericidas, anticorrosivos, espesantes y sustancias químicas para controlar el pH.

Los desechos producidos por los lodos de perforación pueden hallarse mezclados con petróleo y sales provenientes del pozo y pueden ser sumamente alcalinos. Finalmente, se construyen las vías de acceso a los pozos; luego se procede a la instalación de plataformas, helipuertos y campamentos; montaje de los equipos necesarios, la captación de agua y la preparación del sitio para la disposición de materiales de perforación. Al borde de cada plataforma, las compañías excavan una 'piscina o fosa' la cual sirve de recipiente de desechos. Los impactos ambientales de esta fase son: deforestación, erosión, ruido, pérdida de biodiversidad, creación de estancamiento de aguas y represas, contaminación de las aguas de los ríos, lagunas y esteros con desechos químicos, crudo y desechos domésticos de los campamentos; filtración de tóxicos a través del suelo y por consiguiente contaminación de aguas freáticas o del subsuelo, poniendo en peligro a las napas de agua dulce y a las aguas superficiales vecinas (Ramos et al (2010)).

Se registra también contaminación de aire por la quema del gas en los mecheros y por la quema del crudo en las fosas, contaminación de suelos por posibles fugas que se producen en esta fase, por desbordamiento de fosas o por el crudo que colocan en las carreteras, que con la lluvia arrastra las sustancias tóxicas a los suelos y ríos.

2.3.6.3 Explotación.

Después de descubierto y determinado el tamaño del yacimiento, los pozos exploratorios que resultaron productores sirven para extraer el petróleo. En el campo petrolero se perforan otros pozos llamados de avanzada o de desarrollo. En cada campo petrolero se habilita una superficie para las instalaciones de producción, vías de acceso, fuentes de materiales, tratamiento y disposición de desechos. La principal instalación de producción constituye las estaciones de separación y bombeo. El crudo de los diferentes pozos es conducido a las estaciones de separación a través de líneas de flujo secundarias. En la estación se procede a separar el crudo del agua de formación que se encuentra en forma de emulsión, e inhibir la formación de espuma para lo cual se utilizan sustancias químicas demulsificantes, antiespumantes, antioxidantes, etc., la mayoría de estas derivadas del benceno (Barberii (1985) en Ramos et al (2010)).

El gas proveniente de los pozos es quemado en las estaciones como desperdicio en mecheros. Las fosas de desechos de las estaciones reciben las aguas de producción, que provienen de las formaciones geológicas y que se obtienen normalmente durante la extracción de petróleo, así como las aguas superficiales que fueron inyectadas. Estas aguas de producción contienen diferentes cantidades de sales como calcio, magnesio, sodio, y de gases disueltos como monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico y otros, además de sólidos suspendidos que pueden contener trazas de metales pesados y posiblemente un nivel excesivo de radiación causado por la presencia de estroncio y radio, minerales altamente radiactivos así como también niveles inaceptables de crudo suspendido o emulsificado en ellas (Salas (1980) en Ramos et al

(2010)) Las fosas constituyen hoy en día el principal pasivo ambiental generado por la industria petrolera.

En la fase de producción se generan cantidades enormes de desechos tóxicos tanto en los sitios de los pozos como en las estaciones de separación. Todo esto trae como consecuencia que el principal impacto ambiental de esta fase sea la contaminación de los cuerpos de agua tanto superficiales como subterráneos con las aguas de formación que son sumamente tóxicas y, en general, con todos los desechos producidos en esta fase. La contaminación de los cuerpos de agua implica la afectación a especies vegetales y animales principalmente acuáticas través del ingreso de los tóxicos a las diferentes cadenas alimenticias y a la bioacumulación que se produce en varias especies, afectando en última instancia al ser humano.

Además, la contaminación del aire por la quema de gas es generada por la producción de combustiones incompletas, lo cual provoca que gases tóxicos como óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, óxidos de carbono, gas sulfhídrico, metano, etano, propano, butano, etc., generen lluvias ácidas que afectan seriamente la vegetación de la zona. En esta fase también se produce compactación y contaminación de los suelos provocados por las frecuentes fugas de crudo y de aguas de formación y por la práctica de regar crudo y desechos de crudo en las carreteras para darles mantenimiento (Ramos et al (2010)).

2.3.6.4 Transporte y almacenamiento.

Ramos et al (2010), plantea que los productos brutos son transportados mediante oleoductos y gasoductos, camiones y vagones cisternas, o bien por vía fluvial o marítima; requiriéndose para todas estas formas de transporte una infraestructura especial. En cada campo petrolero los pozos están conectados por tuberías a la estación de separación y cada estación a su vez se conecta por tuberías con los tanques de almacenamiento para finalmente transportar el crudo por el oleoducto. El almacenamiento se realiza en tanques dispuestos en la superficie del terreno, depósitos subterráneos, cavernas o estratos porosos subterráneos. Los elementos principales que se asocian con los oleoductos o gasoductos son: la tubería misma, los caminos de acceso o mantenimiento, estaciones de recepción, despacho y control, y las estaciones de compresores o bombeo.

Los principales efectos ambientales asociados al transporte y almacenamiento de petróleo y gas natural son: interferencia con actividades agropecuarias, erosión, escurrimiento y sedimentación como resultado de la construcción de oleoductos y movimientos de tierra para caminos de acceso, subestaciones y depósitos, alteración de los patrones hidrológicos (drenaje y levantamiento de capas freáticas), remoción de suelos y vegetación, pérdida de hábitats de organismos por el derecho de vía de los oleoductos/ gasoductos, interrupción de corredores ecológicos, conflictos de uso de la tierra, ruido, deforestación, la contaminación de aguas y suelos y pérdida de biodiversidad debido a fugas (Almeida (2002) en Ramos (2010)).

2.3.6.5 Refinación.

El proceso de refinación consiste en separar los diferentes hidrocarburos de los que se compone el petróleo, sea individualmente o en conjuntos similares. La refinación se realiza mediante los procesos de destilación, desintegración y purificación. El petróleo refinado se convierte en productos que se usan como combustibles, lubricantes, aceites y grasas y se consiguen materias primas para la industria petroquímica.

Freeman (1979) en Ramos et al (2010), señala que las fuentes de desechos del proceso de refinación pueden clasificarse de la siguiente manera: pérdida de hidrocarburos debido al arrastre, emulsificación y en menor medida a la disolución de los mismos en la fase acuosa de operaciones que implican que estos entren en contacto con el agua, así como por las fugas inadvertidas del equipo y de la tubería. Otros desechos mencionados son aquellos que se originan por el consumo de materiales auxiliares de insumo como catalizadores, absorbentes, sólidos, soluciones que absorben líquidos para la limpieza de gases (soluciones diaminas y de Streeford), cáusticos, ácidos minerales, fluidos para la transferencia de calor, lubricantes, sustancias químicas para el tratamiento de aguas, etc.

Los principales impactos ambientales generados durante la fase de refinación son la contaminación de los recursos hídricos (freáticos y superficiales) debido a los efluentes y aguas de enfriamiento o al escurrimiento de las pilas de desechos que pueden contener aceites y grasas, amoníaco, compuestos fenólicos, sulfuros, ácidos orgánicos, cromo y otros metales; disminución de reservas locales de agua por altos requerimientos de agua para los procesos; remoción de suelos y vegetación; contaminación atmosférica causada por emisiones gaseosas (hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de azufre y nitrógeno, partículas, etc.); producción de grandes cantidades de desechos sólidos (lodos, finos de coque, sulfuro de hierro, partículas catalíticas, etc.); emisión de ruidos y olores fuertes durante los procesamientos; peligros causados por fugas, explosiones e incendios (BMZ (1993) en Ramos et al (2010).

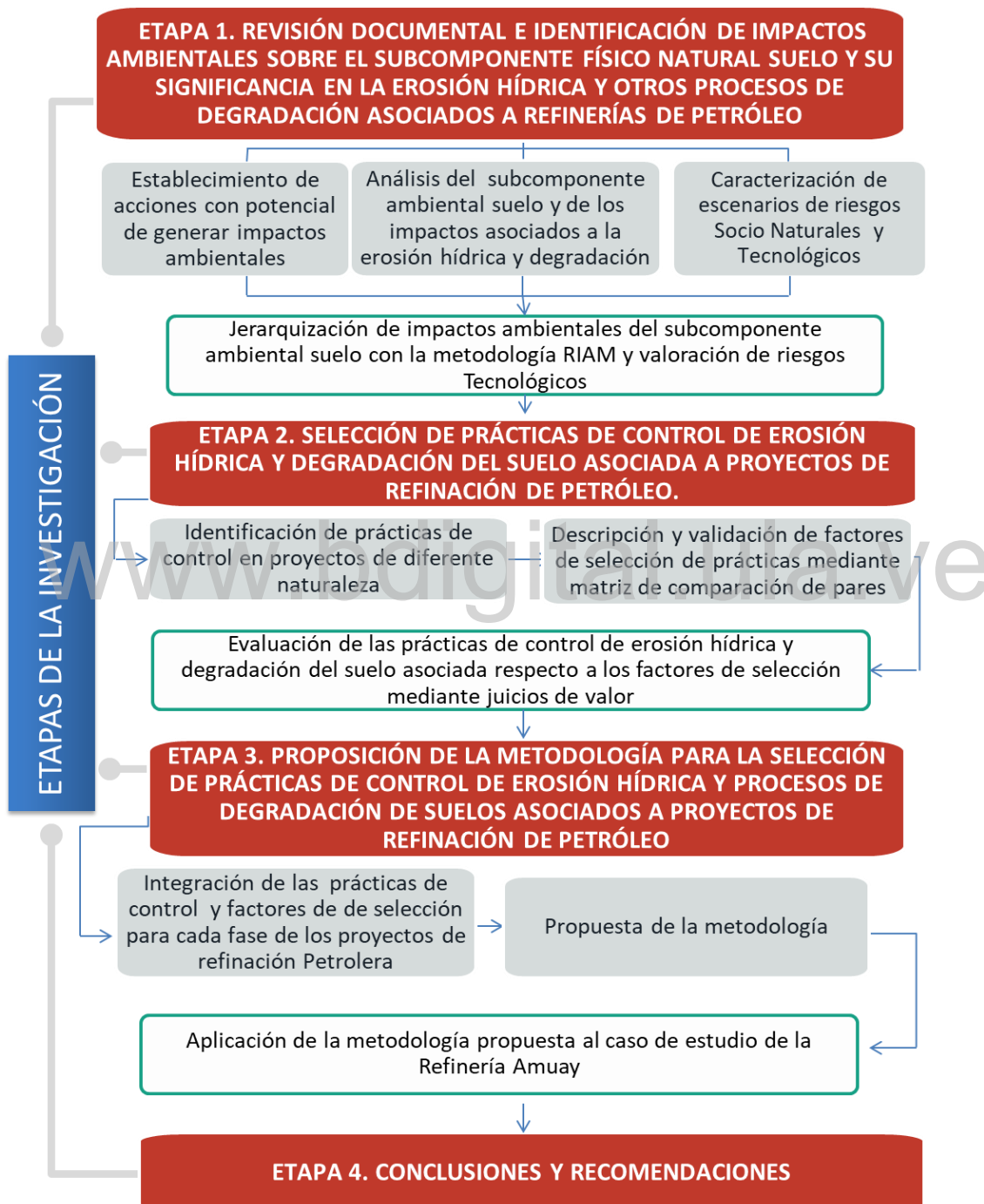
CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO.

En esta investigación se buscó desarrollar una metodología para la selección de prácticas de control de erosión hídrica de suelos en proyectos de refinación de petróleo, como herramienta de gestión ambiental. Para ello, se llevó a cabo inicialmente la identificación de los daños más resaltantes del recurso suelo en los proyectos de refinación petrolera, mediante un análisis de los impactos ambientales asociados a la implantación de las refinerías. Seguidamente, se realizó una revisión bibliográfica para profundizar en las prácticas de control de erosión hídrica de suelos existentes para proyectos de diferentes índoles, de tal manera que permitiera derivar una metodología adaptada específicamente a proyectos de refinación. Siendo posteriormente aplicada al caso de estudio de la Refinería Amuay. Con la finalidad de cumplir con los objetivos antes planteados, se diseñó un esquema de trabajo dividido en 4 etapas:

- **Etap 1.** Revisión documental e identificación de impactos ambientales sobre el subcomponente físico natural suelo y su significancia en la erosión hídrica en refinerías de petróleo.
- **Etap 2.** Selección de prácticas de control de erosión hídrica del suelo para proyectos de refinación de petróleo.
- **Etap 3.** Proposición de la metodología para la selección de prácticas de control de erosión hídrica de suelos en proyectos de refinación de petróleo y aplicación al caso de estudio de la refinería Amuay.
- **Etap 4.** Conclusiones y recomendaciones.

Cada una de las etapas antes planteadas, previó un conjunto de actividades dentro del ámbito de investigación y desarrollo científico para dar lugar al cumplimiento de los objetivos planteados.

En la Figura 3.1 se muestra el esquema sobre el cual se desarrolló este trabajo, incluyendo cada una de las etapas que serán descritas posteriormente.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.1. Esquema metodológico de la investigación.

3.1 Descripción de las etapas de la investigación.

3.1.1 Etapa 1. Revisión documental e identificación de impactos ambientales sobre el subcomponente físico natural suelo y su significancia en la erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo asociados a refinerías de petróleo.

Para iniciar con la investigación se realizó una revisión profunda de documentos y bibliografía, que apoye la descripción del problema y los objetivos planteados. Estando las bases teóricas del estudio bien definidas se procederá entonces con las siguientes fases:

3.1.1.1 Establecimiento de acciones con potencial de generar impactos ambientales.

Mediante el análisis de las actividades propias de las plantas de refinación de petróleo se buscó identificar las posibles acciones capaces de generar impactos ambientales potenciales. Teniendo en cuenta desde los trabajos preliminares necesarios para el emplazamiento de su infraestructura, construcción, operación y mantenimiento. No obstante, como el interés principal de la investigación radicó en caracterizar específicamente al recurso suelo, el establecimiento de dichas acciones estuvo directamente enfocado en el componente físico químico, subcomponente suelo. Como lo plantean Márquez y Pérez (2013) entre los aspectos básicos a considerar en la identificación de impactos ambientales potenciales de un proyecto se encuentran:

3.1.1.1.1 Deforestación. Esta actividad se refiere a la remoción y limpieza de la vegetación de cualquier tipo, como árboles, arbustos, matorrales, pastizales, cultivos, raíces y restos vegetales. Las zonas sujetas a la deforestación se consideran como los lotes de terreno destinados al emplazamiento de los distintos componentes del proyecto.

3.1.1.1.2 Extracción. Se relaciona con los requerimientos industriales provistos por los bienes ambientales del área de influencia del proyecto y que son necesarios para la ejecución de las actividades del mismo

3.1.1.1.2 Modificación del paisaje. Comprende el cambio perceptual del medio, por variaciones en sus atributos físicos y estéticos.

3.1.1.1.3 Modificación del régimen hídrico. Referida a la alteración de las variables de hidrología superficial o subterránea que implica una afectación por aumento o disminución en la humedad.

3.1.1.1.4 Alteración mórfica del suelo. Comprende los trabajos de excavación y remoción de suelos, para construir asiento de los terraplenes del proyecto o inundación para el caso del vaso de almacenamiento de embalses. También se relaciona con cambios en el recurso que se traducen en cambios en sus propiedades y en consiguiente disminución de su potencial.

3.1.1.1.5 Construcciones. Se refiere al vaciado y emplazamiento de las estructuras que componen el proyecto.

3.1.1.1.6 Movilidad. Comprende todas las actividades necesarias que se deben efectuar para la movilización y desmovilización de todos los equipos, materiales y herramientas y personal requeridos para el desarrollo de los trabajos del proyecto.

3.1.1.2 Análisis del subcomponente ambiental suelo y de los impactos asociados a la erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo.

Una vez definidas las actividades de las diferentes etapas de los proyectos de refinación petrolera y con ello las acciones capaces de generar impactos, se analizó la afectación del subcomponente ambiental suelo. Con esto se obtuvo un panorama completo de los impactos ambientales relacionados a los procesos de erosión hídrica en el entorno de las refinerías de petróleo. En la Tabla 3.1 se muestra un ejemplo de la matriz empleada, la misma relaciona las actividades con potencial de generar impactos; con las acciones capaces de degradar el recurso suelo y los impactos que podrían generar erosión del suelo.

3.1.1.3 Caracterización de escenarios de riesgos socio naturales y tecnológicos.

Si bien los accidentes operacionales y riesgos naturales no se incluyen dentro del análisis de los impactos ambientales, deben ser tomados en cuenta debido a su capacidad de generar eventos que afecten el desarrollo del proyecto. En este caso, se consideraron impactos del medio sobre el proyecto y sus trabajadores, quienes pueden estar involucrados en la construcción y operación del mismo. Aunque no tuvieron una relación directa con el subcomponente de interés para la investigación, si jugaron un papel importante al momento de establecer los criterios de selección de las prácticas de control de erosión de suelo correspondientes a la metodología a diseñar. Para el caso de las refinerías fue de especial atención evaluar los riesgos tecnológicos asociados a los procesos de erosión hídrica que podrían generar incendios, explosiones y fugas; dadas las características de alta inflamabilidad de los materiales y productos que se manejan.

En este sentido, los riesgos son todos aquellos procesos que se dan en la superficie terrestre de diferente magnitud y característica que afectan de forma directa o indirecta las actividades humanas, estos riesgos pueden ser provocados o desencadenados por el hombre al interferir con la naturaleza y modificar sus condiciones. Para la valoración de estos riesgos se identificaron inicialmente los riesgos del medio sobre el proyecto, asociando directamente los componentes de riesgos ambientales con los procesos de erosión hídrica desarrollados.

A continuación, se jerarquizaron los riesgos de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia y a los daños que pueden ocasionar los mismos. Para la valoración los riesgos tecnológicos presentes se empleó la metodología planteada por Arboleda y Zuluaga (citados por Grupo- EPM, 2008, tomado de Documento de Respuesta a las Observaciones del EIASC del Proyecto construcción de viviendas “Complejo Habitacional Terrazas del Ángel, 2017) dada por la ecuación:

$$F.R = A \times V = P \times I \quad \text{(Ecuación 3.1)}$$

Dónde:

F.R = factor de riesgo, corresponde al valor cualitativo del riesgo.

P= Probabilidad de ocurrencia de la amenaza (A).

I= Intensidad o severidad de consecuencias potenciales o vulnerabilidad (V).

Tabla.3.1. Matriz de evaluación del subcomponente ambiental suelo relacionando las actividades con potencial de generar impactos; con las acciones capaces de degradar el recurso y los impactos que podrían generar erosión del suelo y otros procesos de degradación.

Actividades con potencial de generar impactos en proyectos de refinación petrolera	Acciones capaces de degradar el recurso suelo	Impactos primarios que podrían generar erosión hídrica y otros procesos de degradación	Impactos secundarios que podrían generar erosión hídrica y otros procesos de degradación
Trabajos Preliminares	Transporte de personal		
	Transporte de insumos materiales y equipos		
	Extracción y transporte de material de préstamo		
	Remoción de la Capa Vegetal		
	Disposición y compactación de material de préstamo		
Construcción	Transporte del personal		
	Transporte de insumos materiales y equipos		
	Excavaciones		
	Fundaciones		
	Instalación de tuberías		
	Almacenamiento de residuos		
	Emplazamiento de estructura y obras civiles		
Operación y Mantenimiento	Transporte de personal		
	Transporte de insumos materiales y equipos		
	Operación de los componentes		
	Manejo y disposición de efluentes		
	Almacenamiento de residuos		

Fuente: Elaboración propia.

La amenaza se calificó teniendo en cuenta los criterios definidos en la Tabla 3.2, que se basa en la probabilidad de ocurrencia del evento. Mientras que, para evaluar la vulnerabilidad, se consideraron las consecuencias que se pueden causar sobre el ambiente y las personas (Tabla 3.3).

Tabla 3.2. Criterios de evaluación de la Amenaza.

Categoría	Descripción	Puntos
Frecuente	Cuando puede suceder una vez cada año durante la vida útil del proyecto	5
Probable	Cuando puede suceder una vez cada 5 años	4
Ocasional	Cuando puede suceder una vez cada 10 años	3
Remota	Cuando puede suceder una vez cada 25 años	2
Improbable	Cuando puede suceder una vez cada 50 años	1

Fuente: Arboleda y Zuluaga (2017).

Tabla 3.3. Criterios de evaluación de la vulnerabilidad.

Categoría	Descripción	Puntos
Insignificantes	Genera consecuencias de baja intensidad, puntuales, fugaces, de efecto secundario y recuperable de manera inmediata o reversible en el corto plazo. No se producen lesiones personales incapacitantes	1
Leves	Genera consecuencias de mediana intensidad, puntuales, temporales, de efecto directo y recuperable o reversible en el mediano plazo. Ocasionalmente lesiones leves o incapacidad temporal a las personas	2
Graves	Genera consecuencias de alta intensidad, extensas, temporales, de efecto directo, mitigable o reversible en el largo plazo. Generan lesiones graves o incapacidad parcial permanente a las personas	3
Catastróficas	Genera consecuencias de muy alta intensidad, muy extensas, permanentes, de efecto directo, irrecuperable e irreversible. Generan muerte o incapacidad total o permanente a las personas	4

Fuente: Arboleda y Zuluaga (2017).

Una vez ponderados los riesgos en cuanto a la amenaza y la vulnerabilidad se comparó con la matriz de riesgo (Tabla 3.4).

Finalmente clasificándose el riesgo como:

Riesgos aceptables (1 – 4): los cuales no representan una amenaza significativa para el ambiente y sus consecuencias son menores.

Riesgos tolerables (5 - 9): aquellos que pueden ocasionar daños más significativos al ambiente, por lo que requieren el diseño de planes de atención.

Riesgos críticos (10 - 20): pueden ocasionar daños graves sobre el ambiente y requieren planes de atención prioritarios y a corto plazo, con alta disponibilidad de recursos y con un monitoreo intenso.

Tabla 3.4. Criterios de evaluación del factor de riesgo.

	Factor de Riesgo						
Vulnerabilidad	Catastrófica	4	4	8	12	16	20
	Grave	3	3	6	9	12	15
	Leve	2	2	4	6	8	10
	Insignificante	1	1	2	3	4	5
		1	2	3	4	5	
		Improbable	Remota	Ocasional	Probable	Frecuente	

	Riesgo aceptable
	Riesgo tolerable
	Riesgo crítico

Fuente: Arboleda y Zuluaga (2017).

3.1.1.4 Jerarquización de impactos ambientales del subcomponente ambiental suelo con la metodología RIAM.

Una vez evaluados los impactos ambientales relacionados a los procesos de erosión hídrica en el entorno de las refinerías de petróleo para el recurso suelo. Se empleó la metodología RIAM (Matriz de Evaluación Rápida de Impacto) para jerarquizar los parámetros y variables más influyentes en la afectación del suelo, considerando desde la implantación hasta la puesta en funcionamiento del proyecto. Con esto se buscó establecer los impactos más significativos a ser abordados dentro de la metodología diseñada. Para desarrollar RIAM se siguieron los siguientes pasos:

3.1.1.4.1 Evaluar Impactos ambientales empleando la metodología VIAPS (valor del impacto ambiental potencial a seleccionar).

Identificados los impactos ambientales sobre el suelo, asociados a la erosión hídrica en las plantas de refinación, se procedió a utilizar la metodología VIAPS, con la cual, mediante parámetros cualitativos y cuantitativos, se seleccionaron aquellos impactos que generan mayor cambio negativo para el ambiente en el área de estudio.

Los parámetros cualitativos empleados en VIAPS son: naturaleza del impacto, efecto, momento, periodicidad y recuperabilidad. Asignando también valores numéricos para cada parámetro que permiten, por medio de fórmulas, seleccionar los impactos que poseen mayor relevancia.

Naturaleza: define por medio de signos, positivo (+) el impacto es beneficioso, mejora la calidad ambiental y negativo (-) si el impacto es perjudicial, desmejora en la calidad

ambiental. Para el estudio se tienen únicamente impactos negativos, pues se buscó enfatizar el daño de la erosión hídrica sobre el suelo y sus consecuencias.

Efecto: Se refiere a la relación causa efecto. Es decir, acción y cambio en el parámetro ambiental. Si es directa, entonces el efecto del impacto es primario. Mientras que es secundario si el impacto se genera como consecuencia de un impacto primario. En la Tabla 3.5, se muestra la relación causa efecto y la valoración para cada caso.

Tabla 3.5. Relación causa efecto.

Relación causa efecto	Valor
Indirecta o secundaria	1
Directa o primaria	4

Fuente: Márquez (2015).

Momento: tiempo que ocurre entre la aparición de la acción y la aparición del impacto sobre el parámetro ambiental considerado (Tabla 3.6).

Tabla 3.6. Momento para cada impacto.

Plazo de manifestación	Valor
Inmediato	4
Menor a 1 año (corto plazo)	3
Entre 1 – 10 años (mediano plazo)	2
Mayor a 10 años (largo plazo)	1
Crítico*	+1 a +4

Fuente: Márquez (2015).

Periodicidad: regularidad de manifestación del efecto, bien sea de manera continua (las acciones que los producen están constantes en el tiempo) o discontinua (las acciones que lo producen actúan de manera regular pero no constantes en el tiempo). La periodicidad discontinua puede ser periódica, cíclica o intermitente cuando los plazos de manifestación son regulares y con una cadena establecida. Así también, La periodicidad puede ser aperiódica o irregular cuando la manifestación discontinua del impacto se repite de una manera irregular en el tiempo. La Tabla 3.7 expresa la regularidad de la manifestación y su ponderación en cada caso.

Tabla 3.7. Regularidad de la manifestación.

Regularidad de la manifestación	Valor
Irregular (aperiódico y esporádico)	1
Periódico o regularidad intermitente	2
Continuo	4

Fuente: Márquez (2015).

Recuperabilidad: posibilidad de restauración total o parcial del parámetro ambiental afectado por una acción. Indicado en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Tiempo de retorno a condiciones antes de la acción.

Tiempo de retorno a condiciones antes de la acción	Valor
t = 0 Inmediato	1
t < 1 año Corto plazo	2
1 < t < 10 años Medio plazo	3
10 < t < 15 años Largo plazo	4
t > 15 años Irrecuperable	8

Fuente: Márquez (2015).

Cálculo y Normalización del VIAPS.

Para el cálculo del VIAPS se realizó la sumatoria de los valores asignados a los parámetros efecto, momento, periodicidad y recuperabilidad para cada uno de los impactos ambientales definidos. El parámetro naturaleza define el signo positivo o negativo en el cálculo del VIAPS.

Para la normalización del VIAPS se definieron los valores de VIAPS máximo y VIAPS mínimo de los valores negativos y positivos respectivamente. Estos valores se incluyeron en la siguiente fórmula junto con el VIAPS calculado:

$$VIAPS \text{ normalizado} = + \frac{(VIAPS \text{ calculado} - VIAPS \text{ min})}{(VIAPS \text{ máx} - VIAPS \text{ min})}$$

(Ecuación 3.2)

El signo + o – depende del VIAPS calculado, es decir, + si beneficioso o – si es perjudicial. Para el propósito del estudio todos tuvieron signo negativo (–) de acuerdo a su naturaleza. Cabe destacar que generalmente se consideran impactos relevantes negativos aquellos con VIAPS normalizado $\geq -0,4$. Sin embargo, en este caso todos los impactos negativos se incluyeron dentro de la evaluación de RIAM para ser considerados posteriormente en el diseño de la metodología de prácticas de control.

3.1.1.4.2 Evaluar Impactos ambientales empleando RIAM.

Al obtener la significancia de los impactos sobre el recurso suelo asociados a la erosión hídrica mediante el uso de VIAPS, fue momento de jerarquizar dichos impactos con RIAM. La aplicación de esta metodología se divide en los siguientes grupos:

Grupo A, el cual está constituido por los criterios mostrados en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Criterios Grupo A.

GRUPO	CRITERIO	ESCALA DE VALORES
GRUPO A	IMPORTANCIA DE LA CONDICIÓN A1	4: De importancias Nacional/ interés internacional
		3: De importancia Regional / interés nacional
		2: Importancia para áreas inmediatas fuera de las condiciones locales
		1: Importancia solo para la condición local
		0: Sin importancia
	MAGNITUD DEL CAMBIO O EFECTO A2	+3: Mayor beneficio positivo
		+2: Mejora significativa del status inicial
		+1: Mejora en el status inicial
		0: Sin cambios
		-1: Cambio negativo del status inicial
		-2: Desmejora o cambio negativo significativo
		-3: Desmejora o cambio mayor

Fuente: Márquez (2015).

Grupo B: integrado por los criterios de la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Criterios Grupo B.

GRUPO	CRITERIO	ESCALA DE VALORES
GRUPO B	PERMANENCIA B1	1: Sin cambios / No aplica
		2: Temporal
		3: Permanente
	REVERSIBILIDAD B2	1: Sin cambio / No aplica
		2: Reversible
		3: Irreversible
	ACUMULATIVO B3	1: Sin cambio / No aplica
		2: No acumulativo / Simple
		3: Acumulativo / Sinérgico

Fuente: Márquez (2015).

Una vez valorado cada impacto se procedió a implementar las siguientes ecuaciones con el fin de definir el rango al cual pertenece cada impacto:

$$A_1 \times A_2 = A_T \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

$$B_1 + B_2 + B_3 = B_T \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

$$A_T \times B_T = ES \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

Obtenidos los valores correspondientes al Puntaje o por sus siglas en inglés *Environmental Score* (ES) se empleó la Tabla 3.11, para conocer el rango de cada impacto.

Tabla 3.11. Rango correspondiente para los puntajes *Environmental Score* (ES).

PUNTAJE (ES)	RANGO	INTERPRETACIÓN
+72 a +108	+E	Cambios/impactos positivos mayores
+36 a +71	+D	Cambios/impactos positivos significativos
+19 a +35	+C	Cambios/impactos positivos moderados
+10 a +18	+B	Cambios/impactos positivos
+1 a +9	+A	Cambios/impactos ligeramente positivos
0	N	Sin cambios o importancia
-1 a -9	-A	Cambios/impactos ligeramente negativos
-10 a -18	-B	Cambios/impactos negativos
-19 a -35	-C	Cambios/impactos negativos moderados
-36 a -71	-D	Cambios/impactos negativos significativos
-72 a -108	-E	Cambios/impactos negativos mayores

Fuente: Pastakia (1988) en Márquez (2015).

3.1.2 Etapa 2. Selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo asociadas a proyectos de refinación de petróleo.

Mediante la revisión ambiental hecha al recurso suelo previamente, se logró establecer los impactos ambientales más significativos relacionados con la erosión hídrica concentrada y algunos procesos de degradación del suelo asociados. Se pasó entonces al análisis detallado de las prácticas de control empleadas en otro tipo de proyectos y su posterior validación para aquellos relacionados a la refinación petrolera mediante dos etapas:

3.1.2.1 Identificación de prácticas de control de erosión hídrica en proyectos de diferente naturaleza.

Mediante la revisión de las prácticas de control de erosión hídrica y degradación del suelo ya existentes para proyectos de distinta naturaleza, se establecieron las causas principales de este tipo de erosión dentro de dichos proyectos y como se abordaron, con la finalidad de prevenir, y mitigar los impactos ambientales.

3.1.2.2 Descripción y validación de factores de selección de prácticas mediante matriz de comparación de pares.

Considerando las interacciones entre las prácticas de control de erosión hídrica y los proyectos analizados durante la identificación de prácticas para proyectos de distinta

naturaleza, se establecieron los factores de selección de prácticas de control de erosión hídrica para proyectos de refinación petrolera. Seguidamente, se procedió a la validación de los criterios con la ayuda de juicios de expertos. Para ello se empleó de una matriz de comparación por pares (Tabla 3.12), siguiendo la metodología desarrollada por Saaty (1977) en Trimarchi (2018). Para el establecimiento de la importancia relativa o peso de cada factor se realizó una consulta a un grupo de expertos, que tuvieron la función de asignar un valor según la relevancia relativa entre dos alternativas.

Una vez aplicada la matriz de comparación, se calculó el peso de cada variable por cada uno de los expertos consultados, a través de la siguiente formula:

$$Pv = \frac{Fv}{Nt} \quad \text{(Ecuación 3.6)}$$

Dónde:

Pv: peso de cada variable por cada uno de los expertos consultados.

Fv: frecuencia con la que se repite cada variable dentro de la matriz.

Nt: corresponde al número total de decisiones o juicios hechos por el experto, el cual viene dada como $n(n-1)/2$; donde n es el número de variables que en este caso es 10.

Para calcular el peso total de cada variable, se hizo de la siguiente manera:

$$PTV = \frac{\sum_{i=1}^m Pv}{m} \quad \text{(Ecuación 3.7)}$$

Dónde:

PTv: peso total de cada variable.

Pv: peso de cada variable por cada uno de los expertos consultados.

m: corresponde al número total de expertos consultados.

Por último, se determinó el índice de consistencia (IC), el cual tiene como finalidad corroborar que los resultados obtenidos de la matriz son consistentes al estudio y se obtuvo por la siguiente ecuación:

$$IC = \frac{\sum_{i=1}^m Pv}{100} \quad \text{(Ecuación 3.8) (Trimarchi (2018))}$$

Dónde:

IC: índice de consistencia.

Pv: peso de cada variable por cada uno de los expertos consultados.

100: valor real mayor de la matriz de comparación por pares.

Si el índice de consistencia es mayor a 1 ($IC > 1$), la matriz de comparación por pares es inconsistente es decir es ineficaz para el estudio y debería ser replanteada; si por el contrario es menor a 1 ($IC < 1$), la matriz es eficaz para el estudio (Trejo (2015) en Trimarchi (2018)).

Tabla 3.12. Matriz de comparación para ponderación de los criterios de selección.

Criterios de Selección		Costo de implementación de la práctica	Periodicidad y costo de mantenimiento	Rapidez de implementación de la práctica de control	Tipo de tecnología y mano de obra requerida para la implementación	Disponibilidad de materiales e insumos para implementar la práctica	Efectividad de la práctica en el control de erosión y/o degradación	Vida útil de la práctica de control	Armonía de la práctica con el paisaje	Beneficios a largo plazo de las prácticas	Participación comunitaria
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Costo de implementación de la práctica	1										
Periodicidad y costo de mantenimiento	2										
Rapidez de implementación de la práctica de control	3										
Tipo de tecnología y mano de obra requerida para la implementación	4										
Disponibilidad de materiales e insumos para implementar la práctica	5										
Efectividad de la práctica en el control de erosión y/o degradación	6										
Vida útil de la práctica de control	7										
Armonía de la práctica con el paisaje	8										
Beneficios a largo plazo de las prácticas	9										
Participación comunitaria	10										

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2.3 Evaluación de las prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación al respecto a los factores de selección mediante juicios de valor.

Se establecieron juicios de valor como una herramienta clave para la selección de prácticas de control de erosión, permitiendo transformar la evaluación cualitativa en un sistema de puntuación objetivo. El objetivo fue asignar un valor numérico a cada práctica, basándose en su rendimiento frente a factores críticos como la efectividad, los costos y la seguridad. Esto facilitó la comparación y la toma de decisiones, garantizando que la práctica seleccionada no solo fuera técnicamente viable, sino también la más adecuada para el entorno específico de una refinería petrolera.

Este proceso se basó en una matriz que evaluó cada práctica frente a los factores de selección más relevantes, establecidos mediante la comparación de pares. A cada factor se le asignó un valor del 1 al 4, donde cada número corresponde a un rango de valoración:

- **1: Factor no adecuado:** La práctica no es efectiva, puede agravar el problema o es inviable para el entorno de una refinería debido a altos riesgos, costos o complejidad.
- **2: Factor Moderadamente Adecuado:** La práctica es parcialmente efectiva, con beneficios limitados o que requieren de su combinación con otras prácticas para lograr un control efectivo. Sus beneficios son a corto plazo.
- **3: Factor Adecuado:** La práctica es efectiva y ofrece beneficios a largo plazo. Es de fácil implementación y los materiales son de producción local o se encuentran fácilmente en el mercado nacional.
- **4: Factor Muy Adecuado:** La práctica es altamente efectiva, ofrece beneficios significativos y a largo plazo. Requiere tecnología y mano de obra básicas. Los materiales son de fácil acceso, incluso pueden ser de origen local.

La puntuación final de cada práctica se obtuvo sumando los valores asignados a cada factor. Esta puntuación total permitió una comparación directa y cuantitativa entre las distintas opciones.

3.1.3 Etapa 3. Propuesta de la metodología para la selección de prácticas de control de erosión hídrica de suelos en proyectos de refinación de petróleo.

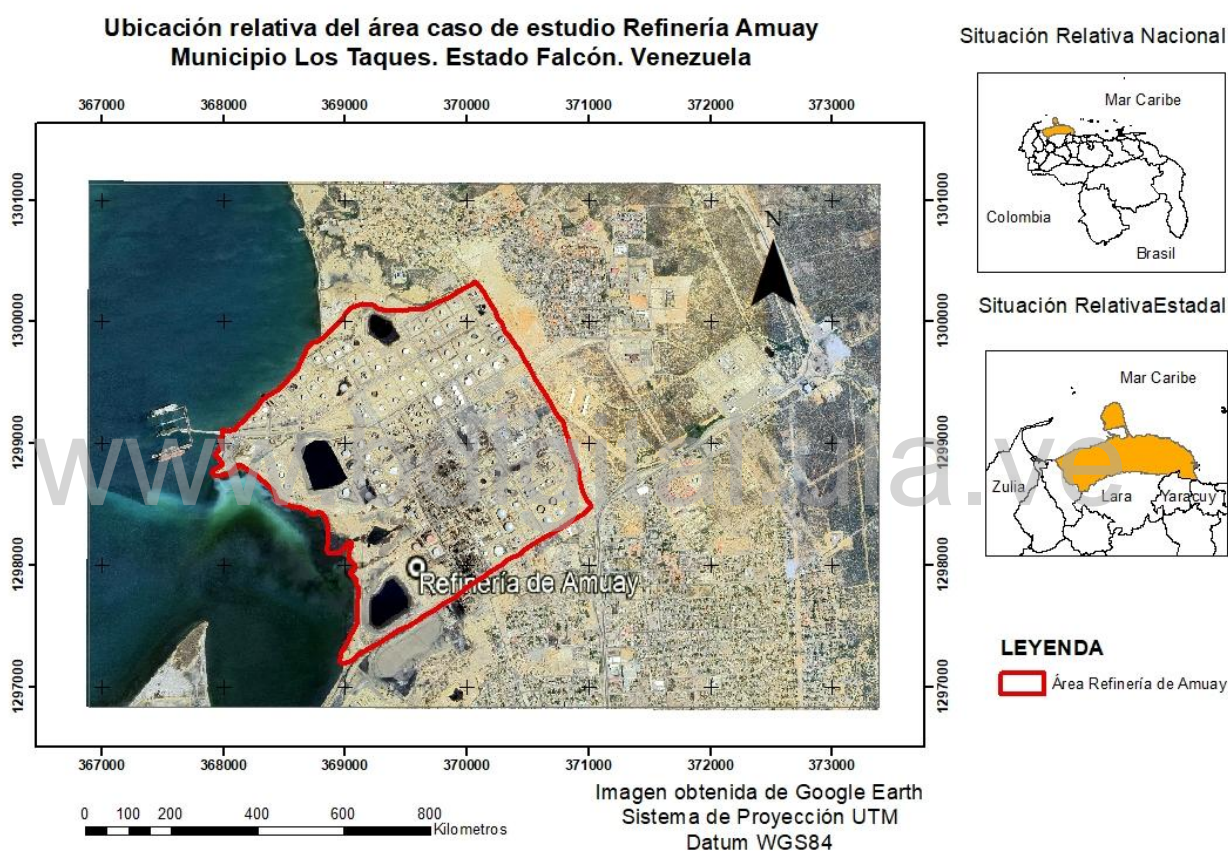
Durante esta etapa se efectuó la integración de todos los datos obtenidos a lo largo del estudio. Retomando los impactos jerarquizados con RIAM para considerar las afectaciones más resaltantes a ser solucionadas. Razonando los factores de selección de control erosión hídrica establecidos y ponderados por los expertos según el grado de importancia y los riesgos tecnológicos a evitar en el escenario planteado. Además de la evaluación de las prácticas de control de erosión hídrica respecto a los factores de selección mediante juicios de valor. Finalmente se propuso a partir de ellos una metodología para la selección de dichas prácticas como una herramienta de gestión ambiental, dando respuesta así al objetivo fundamental de la investigación.

3.1.4 Aplicación al caso de estudio de la Refinería Amuay.

Con el propósito de poner en práctica la metodología planteada en esta investigación, se aplicó al caso de estudio de la Refinería Amuay (Figura 3.2). Es importante destacar que la escala de trabajo se centró exclusivamente en el sub componente ambiental suelo

dentro de las instalaciones de los proyectos de refinación, por lo tanto, el área geográfica no es considerablemente extensa y se encuentra restringida a los límites propios de la refinería. Se buscó con esto desarrollar una prueba piloto que sirva como base para futuras implementaciones de la metodología.

Asimismo, conviene aclarar que no se realizaron visitas técnicas a la refinería para la recolección de datos. En consecuencia, se usó como base para la información estudios previos, especialmente el de Semprun (2017), quién logró tipificar los procesos de erosión hídrica dentro del C.R.P “Centro de Refinación Paraguaná”, por lo tanto, es el indicador base para la puesta en práctica de la metodología.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.2. Ubicación relativa del área caso de estudio correspondiente a la Refinería Amuay, Municipio Los Tanques. Estado Falcón. Venezuela.

3.1.4.1 Caracterización del área de estudio.

A continuación, se presenta una descripción a grandes rasgos de las características físico- naturales propias del área de estudio. Con el objeto de comprensión del comportamiento de los elementos y variables que componen y definen la dinámica del territorio.

3.1.4.1.1 Localización.

La Refinería de Amuay está localizada en la costa occidental de la Península de Paraguaná, específicamente en las afueras de la ciudad de Judibana, Municipio Los Taques del Estado Falcón, en una zona clasificada como área industrial para la Industria Petrolera en el Plan Rector de Desarrollo Urbano para el eje metropolitano Punto Fijo – Los Taques, vigente desde 1982 en consecuencia está ubicado en el llamado perímetro urbano (PDVSA (2015) en Semprun (2017)).

3.1.4.1.2 Geología.

Las características geológicas del área de estudio le confieren una gran diversidad de ambientes geológicos. El Complejo Refinador se ubica sobre la formación geológica Paraguaná, la cual tiene su origen en el Plioceno Temprano. Según Hunter y Bartok (1974) en Semprun (2017), corresponde a las lutitas arcillosas y calizas miocenas que yacen discordantemente y con suave buzamiento sobre las unidades más antiguas de la Península de Paraguaná, como las “lutitas Arcillosas de Punto Fijo”.

Se distinguen dos miembros de la Formación. El miembro inferior, El Hato, cuya base no se encuentra aflorando, se caracteriza por una lutita marina, color crema, rica en foraminíferos, que baja rápidamente a capas más limosas. Este miembro está constituido, en su mayor parte, por una secuencia bandeada de limonitas color gris que se alteran con finas arcillitas y limonitas ferruginosas. Por su parte el miembro superior Amuay está representado por un intervalo carbonatito, muy fosilífero, en ocasiones con influencia clástica elevada, que forma la cobertura casi total de la superficie de la Península de Paraguaná. El miembro Amuay aflora en un 85 % de la Península de Paraguaná en tres formas diferentes: Formando escarpes (sin exponer su base en la mayoría de los casos), muy fragmentado sobre colinas arcillosas y formando el piso de extensas planicies costaneras (PDVSA (2015) en Semprun (2017)).

3.1.4.1.3 Geomorfología.

La Península de Paraguaná no fue parte de los procesos orogénicos y de evolución geomorfológica que ocurrieron en el resto del estado Falcón. El borde oriental de la Península de Paraguaná fue parcialmente levantado por la tectónica del Pleistoceno antiguo que dio origen a las Serranías de Falcón. La expresión geomorfológica de estos levantamientos está hoy representada por las formas de acumulación marinas de tipo de terrazas, levantadas por tectónica de fallas, en el eje El Vínculo – Maicara – Miraca (PDVSA (2015) en Semprun (2017)).

Rivas (2017) expone que el sector oriental de la Península es más elevado que el sector occidental. Desde la población de El Vínculo, al norte, hasta la población de Buena Vista, al sur, se extiende un paisaje acolinado, representado por la fila Monte Cano a 455 msnm y la montaña de Buena Vista a 460 msnm. La mayor altitud la registra el Cerro Santa Ana a 830 msnm. En esta unidad se localiza la más importante concentración de la población del estado, conformado por el eje Punto Fijo - Los Taques, influenciado directamente por las actividades de refinación petrolera

El área de influencia del proyecto está ubicada en el Municipio los Taques, la misma presenta un paisaje de ablación correspondiente a una llanura suavemente inclinada (altiplanicie tabular), edificada por la abrasión marina durante la regresión del mar en la era terciaria. Relieve plano a semi - plano con pendientes muy bajas entre 1 y 2 %

además de desniveles cuyas alturas o taludes superan los cinco metros (acantilados inmediatos a la bahía de Amuay), presentando modificaciones en las áreas asociadas a la Refinería de Amuay. (INE (2011)).

3.1.4.1.4 Suelos.

Los suelos de la Península de Paraguaná son poco desarrollados y con texturas arcillosas, el pH va de neutro a extremadamente alcalino, debido a la presencia de acumulaciones salinas; en algunos lugares se encuentran texturas livianas. En estos suelos se presentan problemas de erosión laminar, erosión en surcos y erosión eólica; siendo esta última la más marcada, ya que los vientos alisios del noreste inciden con mayor frecuencia y velocidad que en el resto del estado (MINTUR (2009) en Rivas (2016)).

Los suelos de los medios deposicionales de litoral marino, especialmente hacia los bordes occidentales y orientales de la Península, influidos, en alguna forma, por las aguas del mar, poseen altos contenidos de limo, arcilla y sales y, por lo general, se encuentran saturados de agua en forma casi permanente. En términos de la descripción de textura, carbono orgánico, profundidad, pedregosidad, salinidad y calidad del suelo Mogollón, et al (2015) y Rivas (2016) exponen que:

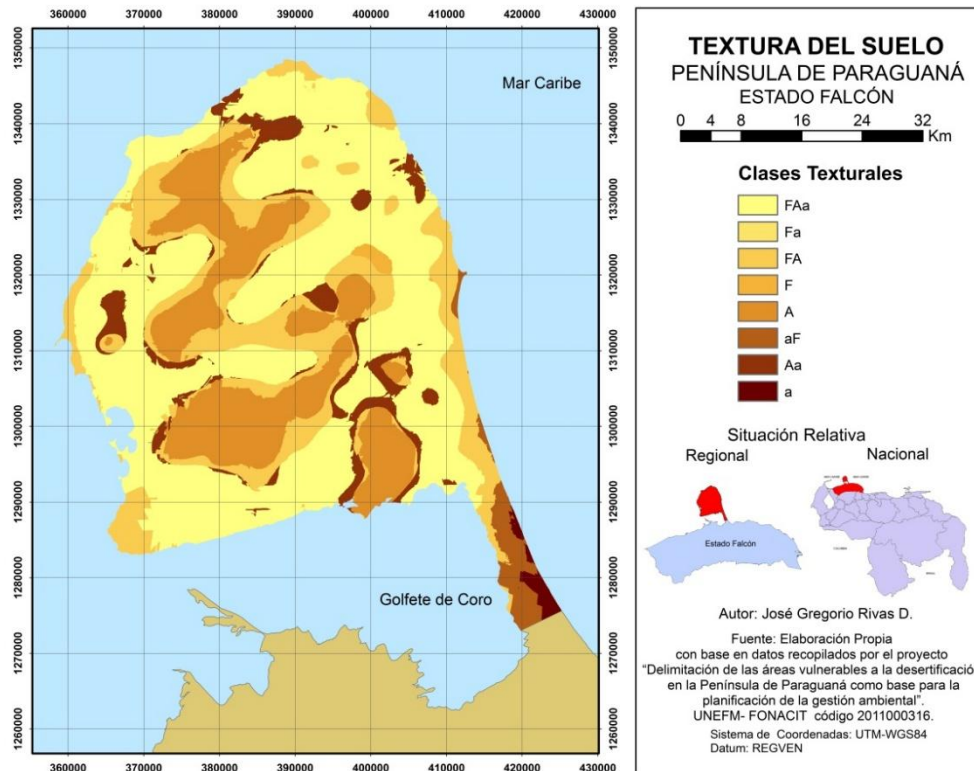
Porcentaje de carbono orgánico (CO): los suelos del Municipio Los Taques área de emplazamiento del Complejo refinador presentan valores de CO entre bajos (< 1 %) y medios (1,10 a 2,0 %), siendo los valores bajos más frecuentes.

Textura del suelo: En el mapa de textura del suelo (Figura 3.3), se aprecia la presencia de texturas gruesas, medianas y finas. Distribuidas a lo largo de península de Paraguaná, encontrándose la mayor concentración de texturas medianas y finas en las áreas circundantes a la línea de costa. El área de emplazamiento de la Refinería Amuay, se encuentra dominada por texturas Franco Arenosas con pequeñas proporciones de arcillas (FAa), este tipo de suelo presenta condiciones moderadas de riesgo de erosión.

Pedregosidad del suelo: en la Península de Paraguaná predominan los suelos poco pedregosos. Sin embargo, en la costa occidental de la península ubicación de la refinería se encuentran suelos de moderada pedregosidad.

Calidad del Suelo: El de área de la refinería corresponde a suelos de baja calidad, con valores de Índice de calidad del suelo entre 1,88 a 2,54. Este tipo de suelos representa serias restricciones para el manejo de la infiltración del agua y la fertilidad.

Salinidad: la salinidad del suelo del área de influencia del proyecto presenta variaciones que pueden ir de ligeramente salinos (0,8 -1,6 ds/m) a fuertemente salino (3,2 – 6,4 ds/m).



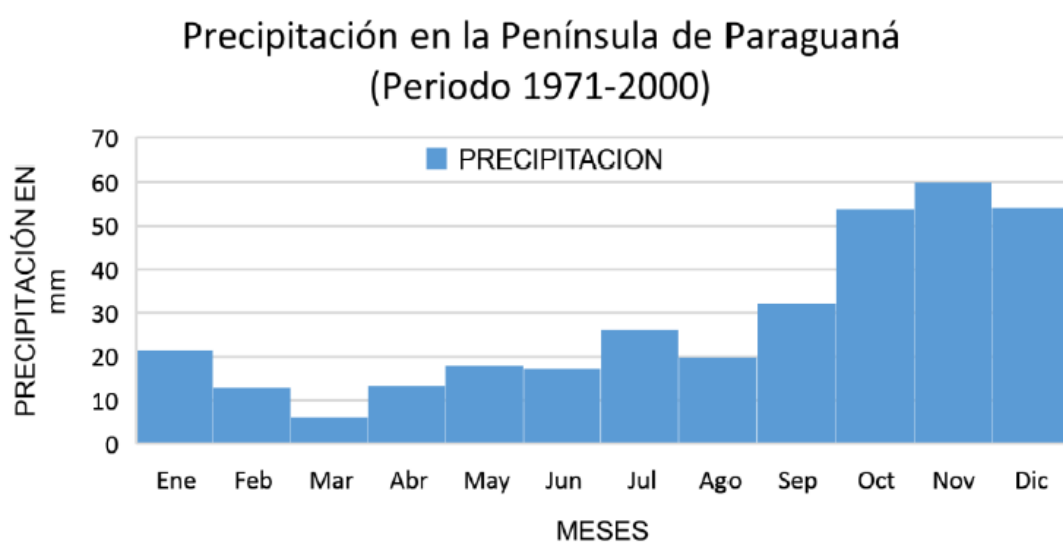
Fuente: Rivas (2016).
Figura 3.3 Mapa de textura del suelo de la península de Paraguaná.

3.1.4.1.5 Clima.

Según el MINTUR (2009) en Rivas (2016), de acuerdo a la clasificación de Holdridge el área de estudio pertenece a una de las regiones más secas del país, correspondiendo con la zona de vida denominada Monte Espinoso Tropical (me-T), que se distribuye desde el nivel del mar, hasta unos 200 msnm, y donde la evaporación supera permanentemente los valores de precipitación durante todo el año y según Thornwaite, el clima característico del área es árido mega térmico o cálido, sin ningún exceso de agua. La evaporación promedio anual es de 2.500 mm y la temperatura promedio de 28°C con pequeñas variaciones en las estribaciones del Cerro Santa Ana. Según Silva (2010) la península de Paraguaná se clasifica climáticamente en dos regiones. La costa oeste con clima muy cálido y seco ($\geq 26,0$ °C y < 300 mm/año). El centro y la costa este con clima muy cálido y escasamente lluvioso ($\geq 26,0$ °C y 300 a 699 mm/año).

3.1.4.1.6 Precipitación.

La precipitación de la península obedece a un régimen unimodal con una marcada estacionalidad donde se pueden diferenciar siete (7) meses secos y cinco (5) húmedos (Figura 3.4). Siendo los meses de febrero a agosto los más secos, presentando un ligero aumento en el mes de julio que no sobrepasa el promedio para crear un pico que convierta el régimen en bimodal. El mínimo de precipitación para el periodo seco se observa en el mes de marzo. Asimismo, se evidencia que en los meses de septiembre a enero se presentan mayores precipitaciones alcanzando el máximo en el mes de Noviembre (Rivas (2016)). El área de emplazamiento del proyecto presenta por su parte una precipitación media anual de 270 a 300 mm.



Fuente: Rivas, 2016.

Figura 3.4. Gráfico de precipitación media mensual en la península de paraguaná en el periodo 1971-2000.

3.1.4.1.7 Hidrografía.

Dada a las características pluviométricas de la región, la Península presenta drenajes naturales de carácter intermitente que permanecen secos durante gran parte del año, cuyas escorrentías se ven incrementadas con el aumento en el volumen de las precipitaciones durante la época de lluvias, particularmente en el mes de noviembre (MINTUR (2009) en Rivas, (2016)). En el área donde se ubica la Refinería Amuay no existen fuentes de agua, pero se encuentra a unos metros de la línea costera que la une a Bahía de Amuay la cual forma parte de la cuenca del Golfo de Venezuela (PDVSA (2015) en Semprun (2017)).

3.1.4.1.8 Vegetación.

El área de estudio se caracteriza por ser un ambiente xerófilo donde escasamente en el año caen 400 mm de lluvia y la tasa de evaporación supera en 4 a 8 veces la precipitación, por esta razón las especies vegetales que allí se desarrollan se han adaptado a estas condiciones climáticas presentando modificaciones en su morfología externa y en sus procesos fisiológicos. Entre las adaptaciones más visibles es la sustitución de hojas por espinas, hojas pequeñas (foliolillos) y hojas carnosas o suculentas. La cobertura vegetal en el área de influencia del proyecto es casi nula ya que predomina infraestructura industrial y urbana, la vegetación existente lo conforman malezas perennes de porte herbáceo y en algún caso arbustivo que se desarrollan en áreas sin uso o en abandono. Entre las especies más comunes dentro del ámbito del proyecto se tiene el Algodón de Seda (*Calotropis procera*), Cují (*Prosopis juliflora*), Bretonica morada (*Melochia tomentosa*), Cadillo bobo (*Cenchrus ciliaris*), Corozo (*Cyperus rotundus*), Verdolaga (*Portulaca oleracea*), Vinagrillo (*Crotalaria retusa*), Bledo (*Amaranthus sp*), Abrojo (*Tribulus cistoides*), entre otras especies de malezas (PDVSA, 2015 en Semprun, 2017).

3.1.4.1.9 Fauna.

En el área de estudio predomina un hábitat totalmente intervenido por la actividad antropogénica. Las especies de mayor predominio en el área de estudio son las aves, en especial el Chuchube (*Mimus gilvus*), el Tordo negro (*Quiscalus lugubris*), Paloma común (*Columba sp*), Gorrión común (*Passer domesticus*), Tortolitas (*Columbina passerina*). Entre los reptiles se pueden encontrar Iguanas (*Iguana iguana*), Lagartijas (*Ameiva sp*) y (*Cnemidophorus lemniscatus*) (PDVSA (2015) en Semprun (2017)).

3.1.4.2 Identificación de procesos de erosión dentro de la Refinería Amuay.

Semprun (2017) caracterizó las condiciones de los diques y taludes de la refinería por medio de la interpretación de fotografías aéreas y visitas de reconocimiento. El trabajo se centró en procesar la información recabada junto con las curvas de nivel del área, cobertura del suelo y ángulos de fricción a través del uso del SIG (Sistemas de información geográfica). Obteniendo como resultado el mapa del modelo digital del terreno, mapa de diques y taludes (con tipo de erosión) y mapa de pendientes. Algunos de estos elementos serán analizados a continuación con el objeto de estudiar los procesos de erosión que requieren control dentro de las instalaciones.

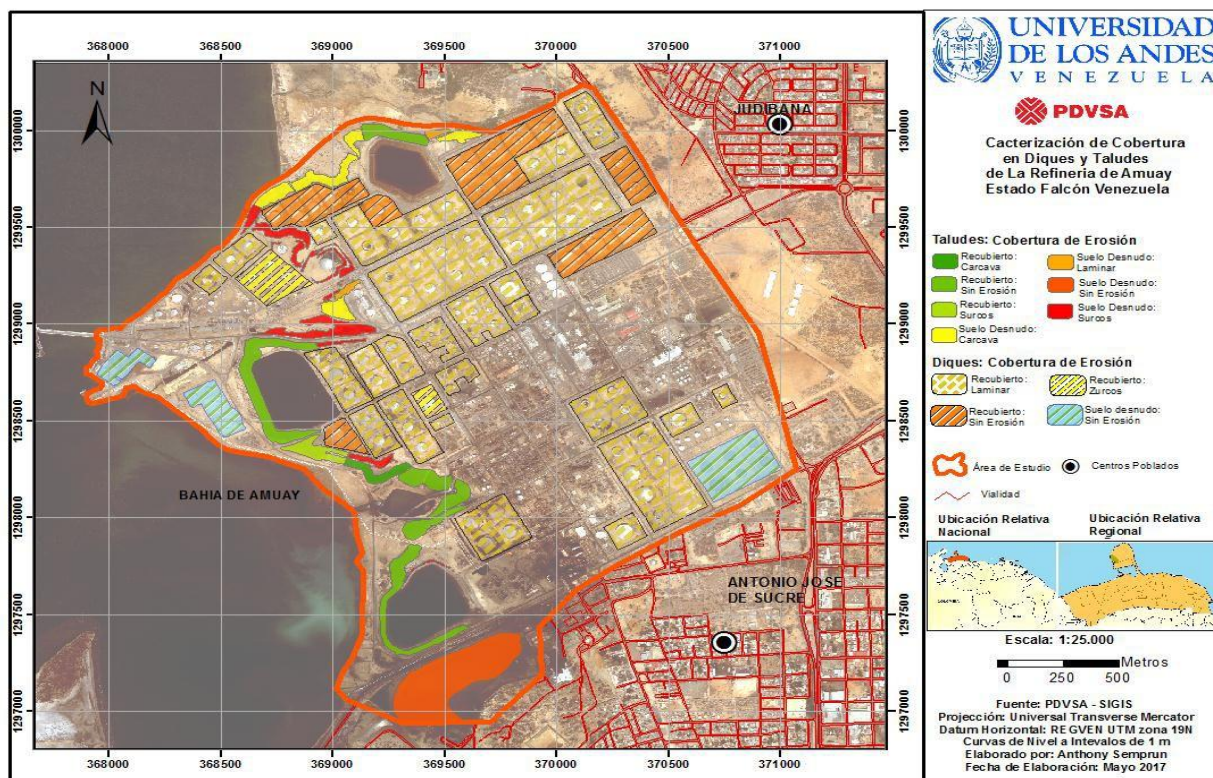
4.6.2.1 Mapa de diques y taludes.

A partir del mapa de diques y taludes (Figura 3.5) generado por Semprun (2017) es posible identificar las zonas que requieren prácticas de control de procesos de erosión hídrica. Según datos proporcionados por el estudio, el área total de la refinería corresponde a 568,96 ha; de las cuales 231,9 ha son ocupadas por diques y taludes. En este sentido; 187,14 ha representan los diques y 44,76 ha los taludes.

Del área total de la refinería 24,93 % se encuentra afectada por erosión hídrica correspondiendo a 141,81 ha. Subdividiendo entre los tipos de erosión, la erosión laminar representa el 21,01 %, la erosión en surcos 2,72 %, y la erosión en cárcavas 1,19 %.

Adicionalmente, para los diques de los patios de almacenamiento se identificó un área afectada por la erosión 125,40 ha, representando un 67 % del área total de los diques, donde 63,51 % corresponde a erosión laminar, 3,49 % a erosión en surcos y el otro 33 % son áreas sin erosión. Por su parte, el área de taludes afectada por la erosión corresponde a 16,42 ha; lo cual constituye 36,67 % del área total de diques, distribuyéndose en 19,92 % erosión en surcos, 15,31 % erosión en cárcavas y 1,61 % erosión laminar, el 63,33 % restante son áreas sin erosión. Con propósito de una compresión más clara en la Tabla 3.13 se expone la información condensada.

En la Figura 3.5 también se muestra la identificación de zonas que aun estando cubiertas presentan erosión. En este sentido los diques poseen en mayor proporción la erosión laminar para áreas recubiertas, mientras que en los taludes se ubica mayor dominio en la erosión en surco. El material empleado por PDVSA para cubrir los diques en la refinería es el asfalto RC-250, por lo tanto, es importante considerar que su función impermeabilizante no está surtiendo el mejor efecto o se encuentra en estado de deterioro.



Fuente: Semprun (2017).

Figura 3.5. Mapa de diques y taludes Refinería Amuay.

Tabla 3.13. Datos de erosión en áreas de la Refinería Amuay.

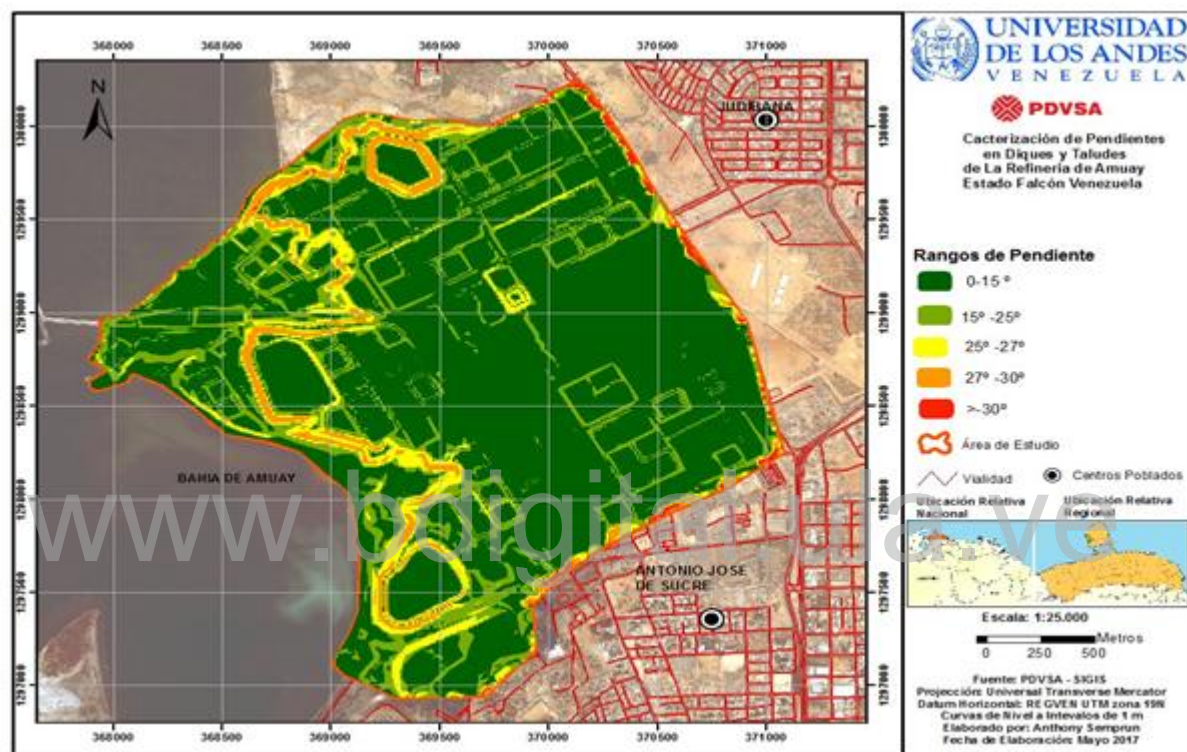
Área	Área Total (ha)	Área afectada por la erosión (ha)	%	Tipo de erosión	%
Área total del proyecto	568,96	141,81	24,93	Laminar	21,01
				Surcos	2,72
				Cárcavas	1,19
Diques de patios de almacenamiento	187,14	125,4	67	Laminar	63,51
				Surcos	3,49
Área de taludes	44,76	16,42	36,67	Laminar	1,61
				Surcos	19,92
				Cárcavas	15,13

Fuente: elaboración propia con datos de Semprun (2017).

4.6.2.2 Mapa de pendientes.

La investigación de Semprun (2017) también obtuvo como resultado un mapa de pendientes (Figura 3.6) a partir de la digitalización del material cartográfico, determinando que dentro de la Refinería Amuay existen valores de pendiente superiores a los 30° teniendo como máximo 53,73°. Mediante el mapa se pueden identificar las mayores pendientes en la zona perimetral de la refinería con valores >30° especialmente en el

contacto entre la Bahía de Amuay y el área de emplazamiento, en esta zona se identifican a través del mapa de diques y taludes (Figura 3.5), suelos desnudos con procesos de erosión laminar. Adicionalmente, se observan valores altos entre 27 y 30° de pendiente en el borde de las piscinas de tratamiento de residuos, donde se enfatizan en el mapa de diques y taludes el desarrollo de cárcavas en los taludes. Para el material del suelo presente en la refinería, correspondiente a franco arenoso con proporciones de arcillas altamente meteorizadas, las pendientes mayores a los 20° entran en categorías de pendientes susceptibles a la inestabilidad al superar el ángulo de fricción interna de este tipo de material.



Fuente: Semprun (2017).

Figura 3.6. Mapa de caracterización de pendientes de la Refinería Amuay.

3.1.4 Etapa 4. Conclusiones y Recomendaciones.

Como último paso se integraron las etapas previas de la metodología propuesta, obteniendo las conclusiones y recomendaciones de la investigación

CAPÍTULO 4. RESULTADOS.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos a partir del estudio de la información conforme a la metodología establecida en el marco metodológico. Los resultados se muestran ordenados según las fases constituyentes de la metodología aplicada.

4.1. Identificación de impactos ambientales sobre el subcomponente físico natural suelo y su significancia en la erosión hídrica en refinerías de petróleo.

Al considerar las operaciones propias de las plantas de refinación, se identificaron las posibles acciones capaces de generar impactos ambientales potenciales, teniendo en cuenta desde los trabajos preliminares; necesarios para el emplazamiento de su infraestructura, construcción, operación y mantenimiento. Asimismo, como fue planteado en el marco metodológico se caracterizó específicamente el subcomponente físico natural suelo, asociando las posibles acciones con los impactos ambientales sobre el suelo y los procesos de erosión hídrica, así como otros escenarios de degradación acarreada por ellos. En la Tabla 4.1, se observa la matriz para identificación de impactos asociados en la etapa de trabajos preliminares.

De igual manera se consideraron los impactos asociados a la erosión hídrica y degradación del suelo en la etapa de construcción de la refinería, estos son mostrados en la Tabla 4.2 Finalmente, en la identificación de los impactos asociados se consideró la etapa de operación y mantenimiento de la refinería, donde se asume la operatividad de la planta. Los impactos se muestran en la Tabla 4.3.

Con esto se expuso el panorama completo de las afectaciones sobre el suelo que genera el desarrollo de planes de refinación petrolera. Cabe destacar que el importante grupo de impactos identificados en la revisión ambiental, no solo permitió develar la erosión como problema fundamental; adicionalmente se identificaron otros tipos de degradación entre ellas: contaminación, sellado, compactación y anegamiento del suelo; formando cinco de las diez amenazas que entorpecen la consecución de la gestión sostenible del suelo. En otras palabras, la erosión debe tratarse como factor desencadenante de más amenazas y por tanto su abordaje debe ser de manera integral. En este sentido, al hacer un recuento de los impactos identificados para todas las fases del proyecto, es posible separarlos en dos grandes grupos: ocho (8) impactos identificados que pueden generar erosión del suelo y quince (15) impactos asociados a la erosión hídrica del suelo y degradación en consecuencia de la misma (Tabla 4.4 y 4.5 respectivamente). Ambos grupos representaron la base de los problemas a tratar al momento de seleccionar las prácticas de control que se sometieron a la Jerarquización por RIAM, pero también constituyeron el factor desencadenante de los riesgos tecnológicos evaluados dentro del estudio.

Tabla 4.1. Impactos asociados a la erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en la etapa trabajos preliminares para la implantación de una refinería.

Actividades con potencial de generar impactos en proyectos de refinación petrolera	Acciones capaces de degradar el recurso suelo	Impactos primarios que podrían generar erosión hídrica y otros procesos de degradación	Impactos secundarios que podrían generar erosión hídrica y otros procesos de degradación
Trabajos Preliminares	Transporte de personal	- Alteración de la capa superficial del suelo debido al paso de vehículos de transporte.	- Erosión hídrica debido al transporte de partículas sueltas por pérdida de la capa superficial del suelo.
	Transporte de insumos materiales y equipos	- Alteración de la capa superficial del suelo debido al paso de vehículos de transporte. - Alteración de la estructura del suelo debido a la presencia de materiales de construcción. - Compactación del suelo por el peso de la maquinaria de carga pesada.	- Sellado del suelo debido a la disipación de partículas sueltas de suelo y materiales de construcción que disminuyen la tasa de infiltración. - Erosión hídrica laminar y en surcos debido a la compactación del suelo.
	Extracción y transporte de material de préstamo	- Inestabilidad del suelo y laderas debido a la remoción de material de préstamo.	- Erosión hídrica del suelo en surcos debido a la inestabilidad de los materiales en las laderas. - Erosión hídrica laminar por arrastre de sedimentos expuestos del suelo. - Movimientos de masa tipo derrumbes debido al socavamiento de bases y de laderas. - Modificación del régimen de escorrentía natural por acumulación anómala de sedimentos provenientes de la erosión. - Movimientos de masa tipo coladas de barro acarreadas por el aumento excesivo de la saturación de agua en laderas.

Continuación Tabla 4.1. Impactos asociados a la erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en la etapa trabajos preliminares para la implantación de una refinería.

Actividades con potencial de generar impactos en proyectos de refinación petrolera	Acciones capaces de degradar el recurso suelo	Impactos primarios que podrían generar erosión hídrica y otros procesos de degradación	Impactos secundarios que podrían generar erosión hídrica y otros procesos de degradación
	Remoción de la Capa Vegetal	- Alteración de la estructura del suelo por pérdida de la capa superficial.	- Sobresaturación del suelo e inestabilidad por pérdida de la capa superficial. - Modificación del régimen de escorrentía natural por acumulación anómala de sedimentos provenientes de la erosión.
	Disposición y compactación de material de préstamo	- Inestabilidad del suelo por aumento de la presión en su capacidad de carga. - Compactación del suelo producto de la disposición de material de préstamo.	- Modificación del régimen de escorrentía natural por acumulación anómala de sedimentos provenientes de la erosión. - Movimientos de masa tipo coladas de barro y deslizamientos de taludes debido a la generación de planos sobresaturados de suelo. - Movimientos de masa tipo subsidencia del terreno.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2. Impactos asociados a la erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en la etapa de construcción para la implantación de una refinería.

Actividades con potencial de generar impactos en proyectos de refinación petrolera	Acciones capaces de degradar el recurso suelo	Impactos primarios que podrían generar erosión hídrica y otros procesos de degradación	Impactos secundarios que podrían generar erosión hídrica y otros procesos de degradación
Construcción	Transporte del personal	-Alteración de la estructura original del suelo debido a la pérdida de partículas superficiales por el paso de vehículos de transporte.	- Erosión hídrica laminar debido a la pérdida de la capa superficial del suelo.
	Transporte de insumos materiales y equipos	- Alteración de la capa superficial del suelo debido al paso de vehículos de transporte. - Alteración de la estructura del suelo debido a la presencia de fragmentos de materiales de construcción. - Compactación del suelo debido al peso de la maquinaria de carga pesada.	- Erosión laminar debido a la pérdida de la capa superficial del suelo - Erosión laminar selectiva por obstrucciones causadas por macrofragmentos. - Erosión laminar y en surcos por disminución de la tasa de infiltración debido a la pérdida de permeabilidad por compactación.
	Excavaciones	-Alteración de la estructura del suelo por remoción de material.	- Movimientos de masa tipo coladas de barro por aumento excesivo de la saturación del suelo en las zonas excavadas. - Erosión concentrada en cárcavas al acentuarse la exposición del suelo en las zonas excavadas (incluyendo canales de desahogo).
	Fundaciones	- Degradación del suelo por disposición de materiales como concreto, mallas y cabillas.	- Erosión hídrica por escurrimiento debido a la alteración del régimen natural de escorrentía. - Movimientos de masa tipo deslizamiento debido a la inestabilidad del suelo por desequilibrio en la infiltración.
	Instalación de tuberías	- Alteración de la estructura del suelo por disposición de tuberías y oleoductos.	- Erosión hídrica concentrada en cárcavas en torno a tuberías por obstrucción de la escorrentía.

Continuación Tabla 4.2. Impactos asociados a la erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en la etapa de construcción para la implantación de una refinería.

Actividades con potencial de generar impactos en proyectos de refinación petrolera	Acciones capaces de degradar el recurso suelo	Impactos primarios que podrían generar erosión hídrica y otros procesos de degradación	Impactos secundarios que podrían generar erosión hídrica y otros procesos de degradación
	Almacenamiento de residuos y desechos	- Alteración de la calidad del suelo por infiltración de productos lixiviados.	- Sellado del suelo debido a la presencia de productos lixiviados pudiendo producirse niveles impermeables y movimientos de masa de tipo deslizamiento.
	Emplazamiento de estructura y obras civiles	- Aumento en la capacidad de carga del suelo por emplazamiento de la estructura.	- Erosión hídrica laminar y en surcos por disminución de la tasa de infiltración debido a la compactación. - Erosión en surcos en las tapadas de seguridad (diques de tierra) debido a la denudación de los suelos.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3. Impactos asociados a la erosión hídrica del suelo y otros procesos de degradación en la etapa de operación y mantenimiento de una refinería.

Actividades con potencial de generar impactos en proyectos de refinación petrolera	Acciones capaces de degradar el recurso suelo	Impactos primarios que podrían generar erosión hídrica y otros procesos de degradación	Impactos secundarios que podrían generar erosión hídrica y otros procesos de degradación
Operación y Mantenimiento	Transporte de personal	- Alteración de la capa superficial del suelo debido al paso de vehículos de transporte.	- Erosión laminar por pérdida de la capa superficial del suelo.
	Transporte de insumos materiales y equipos	- Alteración de la capa superficial del suelo debido al paso de vehículos de transporte y carga pesada.	- Sellado del suelo debido a la disipación de partículas sueltas de suelo que disminuyen la tasa de infiltración. - Erosión hídrica laminar por compactación.
	Operación de los componentes	- Detrimento de la calidad del suelo por vertido de materiales de producción y/o funcionamiento que pueden contener aceites, grasas, amoníaco, compuestos fenólicos, sulfuros, ácidos orgánicos, cromo y otros metales.	- Sellado del suelo debido al vertido de fluidos pudiendo producirse movimientos de masa de tipo deslizamiento debido a niveles impermeables. - Erosión en surcos en las tapadas de seguridad (diques de tierra) debido a la denudación de los suelos.
	Manejo y disposición de efluentes	- Degradación del suelo por fugas de efluentes y aguas de enfriamiento.	- Movimientos de masa por solifluxión causado por la sobresaturación del suelo debido a fuga de fluidos de manera superficial o por tuberías subterráneas.
	Almacenamiento de residuos	- alteración de la calidad del suelo debido al vertido de desechos sólidos (lodos, finos de coque, sulfuro de hierro y partículas catalíticas).	- Erosión hídrica laminar selectiva debido a la presencia de desechos que acarrear la generación de macrofragmentos y niveles impermeables.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.4. Resumen de impactos primarios que pueden generar erosión hídrica del suelo y otros procesos de degradación en refinerías.

No	Impactos primarios asociados a la erosión hídrica del suelo y otros procesos de degradación
1	Inestabilidad del suelo y laderas debido a la remoción de material de préstamo.
2	Alteración de la estructura del suelo por pérdida de la capa superficial.
3	Inestabilidad del suelo por aumento de la presión en su capacidad de carga.
4	Compactación del suelo (por paso de vehículos, maquinarias y distribución de material de préstamo).
5	Alteración de la estructura del suelo debido a la disposición de materiales de construcción.
6	Alteración de la estructura del suelo por disposición de tuberías y oleoductos.
7	Detrimiento de la calidad del suelo por fugas de materiales de producción y funcionamiento que pueden contener aceites, grasas, amoníaco, compuestos fenólicos, sulfuros, ácidos orgánicos, cromo y otros metales.
8	Alteración de la calidad del suelo debido al vertido de desechos líquidos y sólidos (lodos, finos de coque, sulfuro de hierro, partículas catalíticas y lixiviados).

Tabla 4.5. Resumen de impactos secundarios que pueden generar erosión hídrica del suelo y otros procesos de degradación en refinerías.

No	Impactos secundarios asociados a la erosión hídrica del suelo y otros procesos de degradación
1	Erosión hídrica debido al transporte de partículas sueltas por pérdida de la capa superficial del suelo.
2	Sellado del suelo debido a la disipación de partículas sueltas de suelo y materiales de construcción.
3	Erosión hídrica del suelo en surcos debido a la inestabilidad de los materiales en las laderas.
4	Erosión hídrica que ocasiona acumulación anómala de sedimentos y modificación del régimen de escorrentía natural.
5	Movimientos de masa tipo coladas de barro y deslizamientos acarreadas por la generación de planos sobresaturados de suelo.
6	Movimientos de masa tipo subsidencia del terreno.
7	Erosión hídrica laminar selectiva debido a la presencia de desechos que acarrearán la generación de macrofragmentos y niveles impermeables.

Continuación Tabla 4.5. Resumen de impactos secundarios que pueden generar erosión hídrica del suelo y otros procesos de degradación en refinerías.

No	Impactos secundarios asociados a la erosión hídrica del suelo y otros procesos de degradación
8	Movimientos de masa tipo coladas de barro por aumento excesivo de la saturación del suelo en las zonas excavadas.
9	Erosión hídrica concentrada en cárcavas y surcos al acentuarse la exposición del suelo en las zonas excavadas (incluyendo canales de desahogo).
10	Erosión hídrica concentrada en cárcavas en torno a tuberías por obstrucción de la escorrentía.
11	Sellado del suelo debido a la presencia de productos lixiviados y fuga de fluidos de operación, pudiendo producirse niveles impermeables y movimientos de masa de tipo deslizamiento.
12	Erosión hídrica laminar y en surcos por disminución de la tasa de infiltración debido a la compactación.
13	Movimientos de masa tipo derrumbes debido al socavamiento de bases y de laderas.
14	Erosión hídrica en surcos en las tapadas de seguridad (diques de tierra) debido a la denudación de los suelos
15	Movimientos de masa por solifluxión causado por la sobresaturación del suelo debido a fugas de fluidos de manera superficial o por tuberías subterráneas.

4.2. Caracterización de escenarios de riesgos socio naturales y tecnológicos

Una vez identificados todos los impactos ambientales sobre el suelo que se relacionan con los procesos de erosión hídrica concentrada y otras degradaciones asociadas, se prosiguió a caracterizar los escenarios de riesgos socio – naturales dentro del entorno de las refinerías. Como se explicó anteriormente, estos impactos se consideraron impactos del medio sobre el proyecto y sus trabajadores, que pueden afectar directamente los componentes estructurales del proyecto en cualquiera de sus etapas. Por tal motivo pueden acentuar súbitamente los problemas identificados sobre el suelo. Dentro de los escenarios de riesgo socio naturales se analizaron en primer lugar los componentes de riesgos geodinámica externo que incluyen los procesos de erosión hídrica en surcos y cárcavas y los movimientos de masa por considerarse los de mayor afectación. Adicionalmente, el geodinámico interno correspondiente a los sismos. También los atmosféricos climáticos representados por eventos extremos de sequía e inundaciones y por último los hidrológicos relacionados al aumento o disminución del caudal de los cursos de agua superficial. Los resultados de esta indagación se observan en la Tabla 4.6.

De la misma forma se evaluaron los riesgos tecnológicos asociados a los impactos ambientales generados por la erosión previamente identificados, a fin de deducir el papel que juegan dichos impactos como factor desencadenante a posibles accidentes. Para el análisis se tomaron en cuenta exclusivamente los impactos dentro del componente

Tabla 4.6. Caracterización de los escenarios de riesgo Socio- Naturales relacionados con la erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en refinerías de petróleo.

Riesgos Componente	Evento	Desencadenante	Efecto	Impactos asociados
Geodinámico externo	Movimientos de masa tipo deslizamiento	- Desarrollo de niveles impermeables.	- Movimiento de masa tipo deslizamiento.	- Desplazamiento de material del suelo sobre planos impermeables.
	Movimientos de masa tipo subsidencia	- Aumento de descargas de fluidos por fugas de tuberías superficiales y subterráneas.	- Movimientos de masa tipo subsidencia.	- Desplazamiento lento de material por solifluxión. - Ausencia de oxigenación del suelo y desequilibrio de nutrientes - Subsidencia del terreno.
	Erosión hídrica concentrada en surcos	- Pérdida de permeabilidad por compactación.	- Erosión hídrica concentrada en surcos.	- Compactación del suelo (paso de vehículos y carga pesada, disposición de material de préstamo, aumento de la capacidad de carga).
	Movimientos de masa tipo derrumbes	- Socavación de bases y laderas Extracción de material de préstamo.	- Movimientos de masa tipo derrumbes.	- Desplazamiento de material en taludes y laderas con velocidad lenta y/o abrupta.
	Movimientos de masa tipo coladas de barro	- Exposición del suelo en zonas excavadas.	- Movimientos de masa tipo coladas de barro.	- Sobresaturación del suelo. - Desplazamientos de flujos rápidos en forma de lodo.
	Erosión hídrica concentrada en surcos y cárcavas	- Obstrucción de escorrentía por presencia de tuberías y exposición del suelo en zonas excavadas.	- Erosión hídrica concentrada en surcos y cárcavas.	- Modificación morfológica abrupta del suelo - Acumulación excesiva de agua en zonas selectivas.

Continuación Tabla 4.6. Caracterización de los escenarios de riesgo Socio- Naturales relacionados con la erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en refinerías de petróleo.

Riesgos Componente	Evento	Desencadenante	Efecto	Impactos asociados
Geodinámico interno	Sismos	- Movimientos de placas tectónicas.	- Sismos.	- Aumento en la probabilidad de daños de la estructura. - Mayores probabilidades de colapso de taludes y laderas.
Atmosféricos Climáticos	Transgresión marina	- Ascenso del nivel del mar.	- Transgresión marina.	- Daños a instalaciones. - Aumento en la probabilidad de pérdidas humanas.
	Disminución en la precipitación	- Sequías prolongadas.	- Disminución en la precipitación.	- Mayores probabilidades de incendios.
Hidrológicos	Cambio en el régimen hídrico	- Aumento del caudal de cursos de agua superficial.	- Cambio en el régimen hídrico.	- Daños a instalaciones. - Aumento en la probabilidad de pérdidas humanas.
		- Disminución del caudal de cursos de agua superficial.	- Disminución de la disponibilidad de agua.	- Daño a maquinaria y equipo. - Retraso en los procesos de la planta.

Fuente: Elaboración propia.

geodinámico externo pues corresponden a los procesos de erosión y degradación. Este análisis se observa en la Tabla 4.7.

4.2.1. Valoración de riesgos Tecnológicos

Luego de reconocer los riesgos tecnológicos que pueden afectar al proyecto y sus trabajadores debido al desarrollo de procesos de erosión hídrica del suelo en las refinerías, se pasó a valorar su significancia según la probabilidad de ocurrencia de la amenaza “A” y la vulnerabilidad “V” o intensidad de los daños que pueden ocasionar los mismos. Para calificar la amenaza se dispuso de la Tabla 3.1; mientras que para calificar la vulnerabilidad se manejó la tabla 3.2. De igual forma para valorar el factor de riesgo “F.R” se empleó la ecuación 3.1. Cabe recordar que las ecuaciones y tablas se encuentran planteadas en el marco metodológico. En la Tabla 4.8 se encuentra el resultado de la valoración.

Por último, se tomaron los riesgos tecnológicos ya ponderados y se compararon con la matriz de evaluación de riesgo correspondiente a la Tabla 3.3 de la metodología. A razón de esta ponderación se muestran en la Tabla 4.8 los riesgos tolerables de color amarillo y los riesgos críticos de color rojo. En este estudio no se consiguieron riesgos aceptables por lo cual no se observa ninguno de color verde. A partir de ello se determinó como mayores escenarios de riesgos el declive de la estructura, colapso, fracturamiento o sepultamiento de tanques y unidades de procesos, hundimiento de bases de los elementos estructurales; así como también, la exposición de tapadas de seguridad en donde se circunscriben los diques de tierra construidos entorno al patio de tanques

www.bdigital.ula.ve

Tabla 4.7. Riesgos Tecnológicos asociados a la erosión hídrica y otros procesos de degradación en refinerías de petróleo.

Impactos sobre el suelo asociados	Riesgos tecnológicos asociados a la erosión hídrica		
	Evento	Efecto	Efecto sobre operatividad del proyecto
Movimientos de masa tipo deslizamiento	Declive de la infraestructura	Destrucción total o parcial de instalaciones (bodegas, talleres, plantas, sanitarios, almacenes).	Pérdida de operatividad. Disminución de la producción. Contaminación por vertido de petróleo y combustibles. Pérdida de vidas.
Erosión hídrica concentrada en surcos (por compactación)	Congestión de colectores de agua	Inundación de predios.	Parada parcial de la planta. Problemas de accesibilidad. Desgaste de Equipos. Pérdida de vidas.
Movimientos de masa tipo solifluxión	Colapso por fracturamiento y/o sepultamiento de tanques y unidades de procesos	Liberación rápida al ambiente de gases y fluidos. Pérdida de instalaciones y unidades de proceso. Obstrucción de vías comunicación y suministro. Incendios por oxidación rápida de material combustible. Explosiones por liberación de gases a alta presión y despresurización de tanques.	Contaminación por fuga de sustancias tóxicas. Retraso en respuestas a situaciones de emergencia. Pérdida de vidas.
	Accidentes químicos	Fugas de agentes químicos. Incendios por ignición de material inflamable. Incendios por oxidación rápida de material combustible. Explosiones por liberación de gases a alta presión.	Pérdidas económicas. Pérdida de vidas. Detrimento de la calidad de aire por fugas de gases y vapores.
	Desgaste de redes de distribución	Desarrollo de puntos de fuga de productos como gasolina, nafta y aguas residuales. Incendios por oxidación rápida de material combustible.	Alteración de la calidad del suelo. Disminución de la calidad del agua. Pérdida de vidas. Pérdidas económicas por gastos en reparaciones.

Continuación Tabla 4.7. Riesgos Tecnológicos asociados a la erosión hídrica y otros procesos de degradación en refinerías de petróleo.

Impactos sobre el suelo asociados	Riesgos tecnológicos asociados a la erosión hídrica		
	Evento	Efecto	Efecto sobre operatividad del proyecto
Movimientos de masa tipo solifluxión	Rotura de ductos	Fuga de fluidos. Explosiones por liberación de gases y vapores a alta presión.	Pérdida de productos y económicas. Contaminación de cursos de agua. Disminución de la calidad de vida Pérdida de vidas.
	Hundimiento de bases de los elementos estructurales	Inestabilidad de estructuras. Salida de funcionamiento de áreas y equipos.	Reducción de la producción. Pérdidas económicas.
Erosión hídrica concentrada en surcos y cárcavas	Desarrollo de montículos de sedimentos en zonas selectivas	Interrupción de canales de comunicación y suministros. Acumulación excesiva de agua en torno a los montículos.	Retraso en el desarrollo de las actividades de producción. Dificultad para operaciones de mantenimiento. Aumento de probabilidad de inundación por áreas de operaciones.
	Exposición de tapadas de seguridad (Diques de tierra)	Pérdidas de la demarcación de perímetros de seguridad. Fuga de fluidos de producción y operación. Aumento en la entrada de aguas de escorrentía a zonas operacionales.	Pérdida de vidas. Inhabilitación de instalaciones. Pérdidas económicas por gastos en reparaciones. Pérdidas económicas por retraso en la producción.
Movimientos de masa tipo coladas de barro	Dispersión de lodos	Pérdida de equipos y material.	Retraso en el desarrollo de las actividades de producción. Pérdidas económicas.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.8. Evaluación de los riesgos tecnológicos asociados a la erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en refinerías.

Evento	Análisis	Amenaza	Vulnerabilidad	Factor de riesgo
Declive de la infraestructura	La erosión pluvial generada por la remoción de la capa superficial del suelo modifica el patrón natural de escorrentía haciendo que el suelo sea sometido a sobresaturación, esto puede acarrear desestabilización del terreno y por ende destrucción total o parcial de instalaciones (bodegas, talleres, plantas, sanitarios, almacenes).	4	4	16
Congestión de colectores de agua	El establecimiento del proyecto requiere desde las etapas preliminares el desmonte y remoción de la capa superficial, antes estas condiciones cualquier cambio por pequeño que sea de pendiente acentúa la presencia de erosión por escurrimiento. Las partículas sueltas son dispersadas generando sellado del suelo y por tanto disminución de la tasa de infiltración, el excedente de agua que escurre puede sobrepasar la capacidad de los colectores de agua y traer consigo inundación de predios.	4	2	8
Colapso por fracturamiento y/o sepultamiento de tanques y unidades de procesos	Las etapas de construcción y operación donde se comprenden actividades que generan: 1) Compactación debido al uso de maquinaria pesada y como paso necesario luego del corte del terreno para el establecimiento de plataformas y terraplenes 2) Desarrollo de niveles impermeables debido a posibles fugas de fluidos. En ambos casos se originan niveles sobresaturados de suelo que dan lugar a movimientos de masa. Estos movimientos generan el desplazamiento de porciones de terreno considerables que pueden hacer colapsar la infraestructura e incluso sepultarla. Como consecuencia se tiene el fracturamiento de tanques y unidades de procesos causando liberación rápida al ambiente de gases y fluidos, obstrucción de vías comunicación y suministro, incendios y explosiones.	4	4	16
Accidentes Químicos	Las descargas de fluidos por fugas tanto de tuberías superficiales como subterráneas promueven movimientos de masa por solifluxión al desarrollar flujos lentos del suelo. Estos movimientos pueden generar peso excesivo de tuberías y acentuar escapes de agentes químicos que ocasionan incendios y explosiones.	2	4	8
Desgaste de redes de distribución	La presencia de materiales de construcción y residuos genera en el suelo macrofragmentos que dan lugar al desarrollo de erosión laminar selectiva al reducir la tasa de infiltración. La erosión puede remover así las partículas del suelo dejando desprovistas de apoyo las tuberías superficiales, esto puede acarrear desgaste en la red y desarrollar puntos de fuga de productos como gasolina, nafta y aguas residuales. La disminución de la calidad del suelo y fuentes de aguas superficiales sería prácticamente inmediata y aumentaría las posibilidades de incendios.	3	3	9
Rotura de ductos	La implantación de todos elementos estructurales del proyecto genera aumento en la capacidad de carga del suelo. Este aumento trae consigo la compactación del suelo que al disminuir su tasa de infiltración por reducción de porosidad y permeabilidad es sometido erosión laminar y en surco haciéndose cada vez más inestable. El suelo puede colapsar en partes específicas generando rotura de los ductos responsables del transporte de gases y fluidos. en consecuencia, la fractura de ductos causaría liberación de sustancias capaces de generar incendios y explosiones.	3	4	12

Continuación Tabla 4.8. Evaluación de los riesgos tecnológicos asociados a la erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en refinerías

Evento	Análisis	Amenaza	Vulnerabilidad	Factor de riesgo
Hundimiento de bases de los elementos estructurales	La implantación del proyecto requiere que se realicen cortes de terreno con fines de extraer material de préstamo que permitan rellenar las plataformas y definir taludes. Este procedimiento deja expuesta una superficie importante de material que es sometida a erosión hídrica capaz de socavar las bases de las laderas. La inestabilidad desarrollada en las bases da lugar a derrumbes que pueden generar hundimiento de la estructura y la paralización de áreas y equipos. Adicionalmente, un derrumbe es capaz de poner en riesgo vidas humanas.	4	4	16
Desarrollo de montículos de sedimentos en zonas selectivas	El material suelto que se encuentra expuesto en taludes puede ser transportado por erosión laminar, un cambio de pendiente puede promover el depósito de dichas partículas generando montículos en zonas específicas. Las acumulaciones pueden generar interrupción entre canales de comunicación y suministros, así como acumulación de excesiva de agua en torno a los montículos.	3	2	6
Exposición de Tapadas de Seguridad (Diques de Tierra)	La erosión en surcos y cárcavas que se desarrolla sobre la superficie del suelo al estar desprovista de la capa superficial promueve el transporte del material suelto que puede dejar en exposición las zonas con recubrimiento de seguridad como perímetros de aislamiento y quiebre diques de tierra alrededor del patio de tanques. Esto puede aumentar los accidentes operacionales como fugas de fluidos de operación y producción y arriesgar vidas.	4	3	12
Dispersión de lodos	El desarrollo de las instalaciones lineales como oleoductos requiere excavaciones donde el material del suelo es expuesto a la sobresaturación. En estas condiciones el suelo puede sobrepasar su límite líquido dando lugar a coladas de lodo que podrían inundar las instalaciones y retrasar las operaciones de la planta, así como generar afectaciones al personal.	3	2	6

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Jerarquización de impactos ambientales del subcomponente ambiental suelo con la metodología RIAM.

Para la Jerarquización de los impactos ambientales se retomaron aquellos que fueron identificados previamente en el análisis sobre la erosión hídrica del suelo y otros procesos de degradación asociados en proyectos de refinación petrolera. El resumen de los impactos primarios y secundarios fue presentado en las Tablas 4. 4 y 4.5. La categorización de los impactos se llevó a cabo siguiendo lo planteado en el marco metodológico de la siguiente manera:

4.3.1 Evaluación Impactos ambientales empleando la metodología VIAPS (valor del impacto ambiental potencial a seleccionar).

Mediante la valoración de los impactos ambientales sobre el suelo asociados a la erosión hídrica con la metodología VIAPS fue posible identificar los impactos que poseen mayor cambio negativo para el ambiente, considerando para ello valores de naturaleza “N” negativa para todos, efecto “E” (Tabla 3.4), momento “M” (Tabla 3.5), periodicidad “P” (Tabla 3.6) y recuperabilidad “R” (Tabla 3.7). Como último paso dentro de la aplicación de VIAPS, se calculó el VIAPS normalizado (Ecuación 3.2), a partir de este valor, se evidenció que la mayoría de los impactos poseen un VIAPS normalizado $\approx 0,4$, número que representa criterio de selección de un impacto negativo a tratar dentro de las prácticas de control. Todo el trabajo descrito se expone en la Tabla 4.9.

4.3.2 Aplicación de RIAM.

Finalizada la evaluación a través de VIAPS se consiguió establecer la significancia de los impactos sobre el recurso suelo asociados a la erosión hídrica y otros procesos de alteración. Como paso a continuar se jerarquizaron los impactos mediante RIAM. Para iniciar la evaluación se ordenaron los impactos de mayor a menor según el valor obtenido en VIAPS. Posteriormente, se asignaron valores para cada uno de los criterios entre ellos: importancia de la condición “A1”, magnitud del efecto “A2” (Figura 3.3), permanencia “B1”, reversibilidad “B2” y acumulativo “B3” (Figura 3.4). De la misma forma se calculó *Environmental Score* (ES) (Ecuación 3.5) y con ello se identificó el rango. Para el estudio se obtiene: tres (3) impactos de rango –A, doce (12) de rango -B, siete (7) de rango –C y dos (2) de rango –D. Siendo los impactos de tipo –C y –D los que demandan mayor necesidad de control. Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 4.10.

Tabla 4.9. Evaluación de impactos relacionados a la erosión hídrica del suelo y otros procesos de degradación asociados a refinerías mediante VIAPS (valor del impacto ambiental potencial a seleccionar).

Impactos potenciales sobre el suelo en las actividades de refinación de petróleo		Naturaleza	Efecto	Momento	Periodicidad	Recuperabilidad	VIAPS	VIAPS Min	VIAPS máx	VIAPS norm
Impactos Primarios	Inestabilidad del suelo y laderas debido a la remoción de material de préstamo.	-	4	4	4	4	16	6	19	- 0,77
	Alteración de la estructura del suelo por pérdida de la capa superficial.	-	4	4	4	2	14	6	19	- 0,62
	Inestabilidad del suelo por aumento de la presión en su capacidad de carga.	-	4	3	4	8	19	6	19	- 1,00
	Compactación del suelo (por paso de vehículos, maquinarias y distribución de material de préstamo).	-	4	3	4	3	14	6	19	- 0,62
	Alteración de la estructura del suelo debido a la disposición de materiales de construcción.	-	4	4	2	1	11	6	19	- 0,38
	Alteración de la capa superficial del suelo por disposición de tuberías y oleoductos.	-	4	4	4	1	13	6	19	- 0,54
	Detrimiento de la calidad del suelo por fugas de materiales de producción y funcionamiento que pueden contener aceites, grasas, amoníaco, compuestos fenólicos, sulfuros, ácidos orgánicos, cromo y otros metales	-	4	4	2	4	14	6	19	- 0,62
	Disminución de la calidad del suelo debido al vertido de desechos sólidos (lodos, finos de coque, sulfuro de hierro y partículas catalíticas).	-	4	4	2	4	14	6	19	- 0,62
Impactos secundarios	Erosión hídrica pluvial debido al transporte de partículas sueltas por pérdida de la capa superficial del suelo.	-	1	3	2	2	8	6	19	- 0,15
	Sellado del suelo debido a la disipación de partículas sueltas de suelo y materiales de construcción.	-	1	3	4	3	11	6	19	- 0,38
	Erosión hídrica del suelo en canales y surcos debido a la inestabilidad de los materiales en las laderas.	-	1	3	2	2	8	6	19	- 0,15

Continuación Tabla 4.9. Evaluación de impactos relacionados a la erosión hídrica del suelo y otros procesos de degradación asociados a refinerías mediante VIAPS (valor del impacto ambiental potencial a seleccionar).

Impactos potenciales sobre el suelo en las actividades de refinación de petróleo		Naturaleza	Efecto	Momento	Periodicidad	Recuperabilidad	VIAPS	VIAPS Min	VIAPS máx	VIAPS norm	
	Erosión hídrica que ocasiona acumulación anómala de sedimentos y modificación del régimen de escorrentía natural.	-	1	2	2	1	6	6	19	-	0,00
	Movimientos de masa tipo coladas de barro y deslizamientos acarreadas por la generación de planos sobresaturados de suelo.	-	1	3	2	8	14	6	19	-	0,62
	Movimientos de masa tipo subsidencia del terreno.	-	1	2	4	8	15	6	19	-	0,69
	Erosión hídrica laminar selectiva debido a la presencia de desechos que acarrear la generación de macrofragmentos y niveles impermeables.	-	1	3	2	2	8	6	19	-	0,15
	Movimientos de masa tipo coladas de barro por aumento excesivo de la saturación del suelo en las zonas excavadas.	-	1	3	2	3	9	6	19	-	0,23
	Erosión hídrica concentrada en cárcavas y surcos al acentuarse la exposición del suelo en las zonas excavadas (incluyendo canales de desahogo).	-	1	3	2	4	10	6	19	-	0,30
	Erosión hídrica concentrada en cárcavas en torno a tuberías por obstrucción de la escorrentía	-	1	3	2	4	10	6	19	-	0,30
	Sellado del suelo debido a la presencia de productos lixiviados y fuga de fluidos de operación, pudiendo producirse niveles impermeables y movimientos de masa de tipo deslizamiento.	-	1	2	2	8	13	6	19	-	0,54
	Erosión hídrica laminar y en surcos por disminución de la tasa de infiltración debido a la compactación.	-	1	3	4	4	12	6	19	-	0,46
	Movimientos de masa tipo derrumbes debido al socavamiento de bases de taludes y de laderas.	-	1	3	2	8	14	6	19	-	0,62
	Erosión hídrica en surcos en las tapadas de seguridad (diques de tierra) debido a la denudación de los suelos.	-	1	4	2	4	11	6	19	-	0,38
	Movimientos de masa por solifluxión causado por la sobresaturación del suelo debido a fugas de fluidos de manera superficial o por tuberías subterráneas.	-	1	3	2	4	10	6	19	-	0,31

Tabla 4.10. Matriz RIAM para los impactos asociados a la erosión hídrica y otros procesos de degradación en los proyectos de refinación petrolera.

Impactos potenciales sobre el suelo en las actividades de refinación de petróleo		VIAPS	A1	A2	B1	B2	B3	ES	RANGO
Impactos primarios	Inestabilidad del suelo por aumento de la presión en su capacidad de carga.	1	1	-2	2	2	2	-12	-B
	Inestabilidad del suelo y laderas debido a la remoción de material de préstamo.	0,77	2	-3	3	3	3	-54	-D
	Alteración de la estructura del suelo por pérdida de la capa superficial.	0,62	1	-2	3	2	3	-16	-B
	Disminución de la calidad del suelo debido al vertido de desechos sólidos (lodos, finos de coque, sulfuro de hierro y partículas catalíticas).	0,62	2	-3	3	3	3	-54	-D
	Compactación del suelo (por paso de vehículos, maquinarias y distribución de material de préstamo).	0,62	1	-2	3	3	2	-16	-B
	Detrimento de la calidad del suelo por fugas de materiales de funcionamiento que pueden contener aceites, grasas, amoníaco, compuestos fenólicos, sulfuros, ácidos orgánicos, cromo y otros metales.	0,62	2	-2	3	3	3	-36	-C
	Alteración de la capa superficial del suelo por disposición de tuberías y oleoducto	0,54	1	-2	3	3	2	-16	-B
	Alteración de la estructura del suelo debido a la disposición de materiales de construcción.	0,38	1	-1	2	2	2	-6	-A
Impactos secundarios	Movimientos de masa tipo subsidencia del terreno	0,69	2	-2	3	3	3	-36	-C
	Movimientos de masa tipo coladas de barro y deslizamientos acarreadas por la generación de planos sobresaturados de suelo.	0,62	1	-3	3	3	3	-27	-C
	Movimientos de masa tipo derrumbes debido al socavamiento de bases de taludes y de laderas.	0,62	1	-3	3	3	3	-27	-C
	Sellado del suelo debido a la presencia de productos lixiviados y fuga de fluidos de operación, pudiendo producirse niveles impermeables y movimientos de masa de tipo deslizamiento.	0,54	1	-3	3	3	3	-27	-C
	Erosión hídrica laminar y en surcos por disminución de la tasa de infiltración debido a la compactación.	0,46	1	-2	3	3	3	-18	-B

Continuación Tabla 4.10. Matriz RIAM para los impactos asociados a la erosión hídrica y otros procesos de degradación en los proyectos de refinación petrolera.

Impactos potenciales sobre el suelo en las actividades de refinación de petróleo		VIAPS	A1	A2	B1	B2	B3	ES	RANGO
	Sellado del suelo debido a la disipación de partículas sueltas de suelo y materiales de construcción.	0,38	1	-2	3	3	3	-18	-B
	Erosión hídrica en surcos en las tapadas de seguridad (diques de tierra) debido a la denudación de los suelos.	0,38	2	-2	2	2	3	-28	-C
	Movimientos de masa por solifluxión causado por la sobresaturación del suelo debido a fugas de fluidos de manera superficial o por tuberías subterráneas.	0,31	1	-3	3	3	3	-27	-C
	Erosión hídrica concentrada en cárcavas y surcos al acentuarse la exposición del suelo en las zonas excavadas (incluyendo canales de desahogo).	0,30	1	-2	3	2	3	-16	-B
	Erosión hídrica concentrada en cárcavas en torno a tuberías por obstrucción de la escorrentía.	0,30	1	-2	3	2	3	-16	-B
	Movimientos de masa tipo coladas de barro por aumento excesivo de la saturación del suelo en las zonas excavadas.	0,23	1	-2	3	3	3	-18	-B
	Erosión hídrica debido al transporte de partículas sueltas por pérdida de la capa superficial del suelo.	0,15	1	-2	3	3	3	-18	-B
	Erosión hídrica del suelo en canales y surcos debido a la inestabilidad de los materiales en las laderas.	0,15	1	-2	3	3	3	-18	-B
	Erosión hídrica laminar selectiva debido a la presencia de desechos que acarrearán la generación de macrofragmentos y niveles impermeables.	0,15	1	-2	3	3	3	-18	-B
	Erosión hídrica que ocasiona acumulación anómala de sedimentos y modificación del régimen de escorrentía natural.	0	1	-1	3	2	3	-8	-A
	Erosión hídrica concentrada en cárcavas en torno a tuberías por obstrucción de la escorrentía.	0	1	-1	2	2	3	-7	-A

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Selección de prácticas de control de erosión hídrica del suelo y otros procesos de degradación para proyectos de refinación de petróleo.

Al culminar la fase de evaluación y jerarquización de impactos sobre el suelo, se prosiguió con la selección de las prácticas de control para los proyectos de refinación petrolera, esto se desarrolló en dos etapas:

4.4.1 Identificación de prácticas de control en proyectos de diferente naturaleza.

Se llevó a cabo la identificación de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación empleadas en proyectos de diferente naturaleza. Para ello se revisaron dieciséis (16) experiencias repartidas en proyectos y manuales de carácter nacional e internacional. El objetivo fundamental de esta exploración fue establecer las causas principales de este tipo de erosión dentro de diversos escenarios y estudiar cómo es controlada, con la finalidad de prevenir, y mitigar los impactos ambientales.

En este contexto se determinó que las prácticas de control de erosión hídrica empleadas en los distintos proyectos se orientan a solucionar cuatro aspectos fundamentales y pueden ser reagrupadas según los mismos, estos son:

1. Control de agua superficial y subterránea: enfocadas en el manejo y la disposición tanto de la escorrentía superficial como del nivel freático del suelo. Su objetivo principal es evitar que el agua se convierta en el agente erosivo principal, canalizándola, desviándola o facilitando su infiltración para que no cause daños. Desde el punto de análisis el agua superficial que escurre sobre suelos desprovistos de cobertura vegetal tiende a ser la responsable de un número considerable de procesos de erosión como la erosión laminar y en surcos. Para mitigar su efecto, se emplean prácticas que reducen su velocidad de escorrentía y la canalizan. Ejemplos de estas técnicas incluyen los canales de desagüe, los canales colectores, los canales de aguas superficiales y las alcantarillas, que están diseñadas para recolectar y transportar el agua de manera segura fuera de las áreas vulnerables. También se utilizan zanjas rellenas filtrantes, que aumentan el porcentaje de infiltración del agua en el suelo, reduciendo el volumen de escorrentía. Por su parte el agua subterránea puede representar el desencadenante de movimientos de masa como soliflucción, deslizamientos, coladas de barro y derrumbes. Para evitar estos eventos, se recurre a prácticas de drenaje subterráneo. Los drenes de penetración y los drenes verticales son técnicas que se utilizan para abatir o rebajar el nivel freático, reduciendo la presión del agua intersticial y aumentando la estabilidad del suelo, un factor crucial en áreas con riesgo de movimientos de masa.

2. Control de sedimentos: pertinente a impedir el desprendimiento de las partículas del suelo, arrastre sobre la superficie por la escorrentía y sedimentación anómala en áreas de cambios de pendiente. Para eludir estos procesos se implementan prácticas diseñadas para atrapar los progresivamente los sedimentos a medida que el agua fluye; como las barreras de piedra. También las técnicas que se implementan con la finalidad de proteger la superficie del suelo de la energía de impacto de la gota de lluvia y reducir la velocidad del flujo del agua, creando una barrera física entre el suelo y el agente erosivo; siendo un ejemplo de ellas las geomantas. Finalmente, estructuras diseñadas para permitir la sedimentación controlada de las partículas, reduciendo la velocidad de flujo y su capacidad de transporte entre ellas las fosas de sedimentación.

3. Estabilización: dirigido a mejorar las condiciones del suelo para dotarlo de mayor resistencia al deslizamiento, quiebre o colapso. Las técnicas de estabilización pueden ser bastante variadas y son cruciales en zonas con pendientes pronunciadas o en áreas

donde se ha alterado el relieve, como taludes o laderas de préstamo. El primer grupo corresponde a medidas del tipo estructural que requieren la implementación de obras fijas como barreras protectoras al deslizamiento, ejemplos incluyen los pilotes y anclajes. El segundo grupo corresponde a implantar técnicas vegetativas para resguardar y asegurar el terreno con el enraizamiento y finalmente el último grupo incluye obras mixtas con características estructurales y vegetativas conocidas como técnicas de bioingeniería una muestra clara de esto son las geoceldas que permiten estabilizar el suelo y, a la vez, crear un entorno propicio para el crecimiento de vegetación. Estas estructuras brindan soporte inmediato, mientras que el enraizamiento de las plantas consolida el terreno de manera natural a largo plazo. Finalmente, se incluyen medidas de modificación controlada del relieve para reducir la pendiente dificultando el desprendimiento de los componentes superficiales del suelo como las terrazas o plataformas. En cualquiera de los casos el objetivo fundamental es contener el movimiento de la masa del suelo.

4. Remediación: relacionado a procesos de degradación que demandan la eliminación y reducción de contaminantes o sustancias tóxicas del suelo mediante métodos de biorremediación al hacer uso del potencial metabólico de macroorganismos como hongos, levaduras y bacterias. Dentro de esta técnica se pueden aplicar prácticas como la bioventilación, que consiste en inyectar aire u oxígeno al subsuelo para estimular la actividad biológica de los microorganismos en las zonas no saturadas del suelo, y el *Landfarming*, donde el suelo contaminado se extiende sobre una superficie y se voltea periódicamente para facilitar la aireación y la biodegradación de los contaminantes. También, por fitorremediación mediante las plantas capaces de acumular, metabolizar y volatilizar contaminantes utilizando su capacidad de absorción para limpiar el suelo de manera natural. Otro grupo corresponde a los tratamientos químicos como inyección de polímeros y finalmente la nanoremediación llevada a cabo con nanomateriales capaces de oxidar y barrer los contaminantes. Este grupo de prácticas se ha vuelto especialmente relevante en entornos industriales como las refinerías, donde las fugas accidentales y la operación a largo plazo pueden comprometer la integridad del suelo. En consecuencia, el enfoque de remediación es crucial en un proyecto de refinación, no solo para restaurar áreas degradadas, sino también para prevenir que los contaminantes se movilicen y causen erosión o dañen el paisaje circundante.

En relación a los cuatro grupos se reclasificaron todas las prácticas de control de erosión identificadas por proyecto y/o manual, de tal manera que pudiera denotarse si la práctica estaba presente o no dentro de cada estudio. La información se muestra en las matrices comparativas correspondientes a las Tablas 4.11, 4.12, 4.13, 4.14. En cada una de las matrices se señala el nombre de todas las revisiones hechas junto con las prácticas de control empleadas respecto a los grupos de control de agua superficial y subterránea, control de sedimentos, estabilización y remediación.

La referencia detallada de los proyectos y manuales consultados con la información pertinente de las prácticas presentes, funcionalidad y características puede ser consultada en el Apéndice A.

Tabla 4.11. Prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación identificadas en el grupo de control de agua superficial y subterránea.

No	Grupo 1: Prácticas de control de agua superficial y subterránea									
	Proyectos y Manuales Revisados (Nacionales e internacionales)	Canales y Obras de Drenaje				Presas y Estructuras de Captación			Drenes y Bombeo	
		Canales de cintura, zanjías, torrenteras, acequias, canales de desviación e infiltración	Cunetas y cunetas de guarda	Bermas de drenaje e intermedias	Canales longitudinales y transversales	Presas de contención y de control de azolves o filtrantes	Reservorios de agua	Diques	Drenes perimetrales y subterráneos	Instalación de bombeo
1	Control de erosión durante la construcción de proyectos mineros- estudio de caso Conococha, Antamina, Perú (2021).			X						
2	Control de la erosión y contaminación de las aguas en la explotación de lignitos de Meirama, España (1989).	X		X		X	X		X	X
3	Restauración de suelos producto de actividades mineras: experiencia en el proyecto minero Mirador, Zamora Chinchipe-Ecuador (2020).	X	X	X	X		X	X		
4	Control de erosión mediante bioingeniería en presas de colas de la industria del níquel. Cuba (2014).	X							X	
5	Control de erosión superficial en planta de beneficio de plata empleando geomanta tridimensional reforzada. México (2020).									
6	Control de erosión en áreas de extracción de petróleo con procesos de evaluación de metodologías de control en el lote 121 sector sur en la zona del Río Napo Loreto – Perú (2014).	X		X	X	X		X		
7	Informe final del Proyecto CJ068 Recuperación y conservación de suelos mediante presas de control de azolves, en la Cuenca de Burgos, México (2007).	X				X				

Continuación Tabla 4.11. Prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación identificadas en el grupo de control de agua superficial y subterránea.

No	Grupo 1: Prácticas de control de agua superficial y subterránea									
	Proyectos y Manuales Revisados (Nacionales e internacionales)	Canales y Obras de Drenaje				Presas y Estructuras de Captación			Drenes y Bombeo	
		Canales de cintura, zanjas, torrenteras, acequias, canales de desviación e infiltración	Cunetas y cunetas de guarda	Bermas de drenaje e intermedias	Canales longitudinales y transversales	Presas de contención y de control de azolves o filtrantes	Reservorios de agua	Diques	Drenes perimetrales y subterráneos	Instalación de bombeo
8	Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización Colombia (2011).							X		
9	Aplicación de nanotecnología para remediación de suelos contaminados por hidrocarburos. Bogotá (2022).									
10	Manual de técnicas estrategia de intervención: “desarrollo rural sostenible, basado en la conservación de suelos y aguas” serie “guía y manuales”, Bolivia (2004).	X	X			X	X	X	X	X
11	Control de la erosión en desmontes originados por infraestructura viaria: aplicación al entorno de Palencia capital. España (2002)	X	X		X	X			X	
12	La nanotecnología en la agricultura y rehabilitación de suelos contaminados México (2010).									
13	Manual de Manejo y Conservación de Suelos y Aguas, Costa Rica (1995).	X	X	X	X		X			
14	Manual de Control de Erosión Chile (2004).	X	X	X	X	X				
15	Manual de Bioingeniería Honduras (2008).									
16	Manual de Bioingeniería Venezuela (2017).	X		X		X		X		

Prácticas presentes en el proyecto

X

Prácticas ausentes en el proyecto

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.12. Prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación identificadas en el grupo de control de sedimentos.

No	Grupo 2: Prácticas de control de sedimentos									
	Proyectos y Manuales Revisados (Nacionales e internacionales)	Estructuras de Retención			Aislamiento de zonas erosionadas	Recubrimientos			Control Químico y Físico	Piscinas y Estructuras de Sedimentación
		Gaviones y muros de rocas	Sacos rellenos lineales y muros	Ataguías	Aislamientos de mallas, madera telas, ramas	Geomantas, biomantas, mantas de coco, telas y geotextiles	Emulsiones asfálticas, espumas, alginato de sodio	Suelo orgánico, Mulch paja, heno	Floculantes y coagulantes	Pozas de sedimentación y trampas de sedimentos
1	Control de erosión durante la construcción de proyectos mineros- estudio de caso Conococha, Antamina, Perú (2021).	X				X			X	X
2	Control de la erosión y contaminación de las aguas en la explotación de lignitos de Meirama, España (1989).									
3	Restauración de suelos producto de actividades mineras: experiencia en el proyecto minero Mirador, Zamora Chinchipe-Ecuador (2020).	X	X			X		X	X	X
4	Control de erosión mediante bioingeniería en presas de colas de la industria del níquel. Cuba (2014).	X				X				X
5	Control de erosión superficial en planta de beneficio de plata empleando geomanta tridimensional reforzada. México (2020).					X				
6	Control de erosión en áreas de extracción de petróleo con procesos de evaluación de metodologías de control en el lote 121 sector sur en la zona del Río Napo Loreto – Perú (2014).	X	X			X		X		
7	Informe final del Proyecto CJ068 Recuperación y conservación de suelos mediante presas de control de azolves, en la Cuenca de Burgos, México (2007).				X					

Continuación Tabla 4.12. Prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación identificadas en el grupo de control de sedimentos.

No	Grupo 2: Prácticas de control de sedimentos									
	Proyectos y Manuales Revisados (Nacionales e internacionales)	Estructuras de Retención			Aislamiento de zonas erosionadas	Recubrimientos			Control Químico y Físico	Piscinas y Estructuras de Sedimentación
		Gaviones y muros de rocas	Sacos rellenos lineales y muros	Ataguías	Aislamientos de mallas, madera telas, ramas	Geomantas, biomantas, mantas de coco, telas y geotextiles	Emulsiones asfálticas, espumas, alginato de sodio	Suelo orgánico, Mulch paja, heno	Floculantes y coagulantes	Pozas de sedimentación y trampas de sedimentos
8	Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización Colombia (2011).					X	X	X		
9	Aplicación de nanotecnología para remediación de suelos contaminados por hidrocarburos. Bogotá (2022).									
10	Manual de técnicas estrategia de intervención: “desarrollo rural sostenible, basado en la conservación de suelos y aguas” serie “guía y manuales”, Bolivia (2004).	X		X						
11	Control de la erosión en desmontes originados por infraestructura viaria: aplicación al entorno de Palencia capital. España (2002).	X		X		X	X	X		
12	La nanotecnología en la agricultura y rehabilitación de suelos contaminados México (2010).									
13	Manual de Manejo y Conservación de Suelos y Aguas, Costa Rica (1995).	X								
14	Manual de Control de Erosión Chile (2004).	X	X							
15	Manual de Bioingeniería Honduras (2008).	X						X		
16	Manual de Bioingeniería Venezuela (2017).	X	X		X	X		X		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.13. Prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación identificadas en el grupo de estabilización.

No	Grupo 3: Prácticas de estabilización									
	Proyectos y Manuales Revisados (Nacionales e internacionales)	Revegetación y Siembra		Bioingeniería		Obras estructurales de soporte		Obras de Modificación del Relieve	Mejoramamiento del suelo	Obras especiales
		Hidrosiembra y siembra manual	Reforestación, plantaciones en contornos y cortafuegos (cortavientos)	Combinan vegetación y estructuras	barreras vivas	Muros de roca, geomallas, geogrillas, pilotes, anclajes atirantados	Muros, cubiertas y bloques (adoquines) de hormigón	Terrazas, plataformas, trincheras de sujeción	Abonos, enmiendas orgánicas y fertilizantes	Revestimiento y muros de neumáticos
1	Control de erosión durante la construcción de proyectos mineros- estudio de caso Conococha, Antamina, Perú (2021).	X	X			X				
2	Control de la erosión y contaminación de las aguas en la explotación de lignitos de Meirama, España (1989).	X				X	X	X		
3	Restauración de suelos producto de actividades mineras: experiencia en el proyecto minero Mirador, Zamora Chinchipe-Ecuador (2020).	X		X		X		X		
4	Control de erosión mediante bioingeniería en presas de colas de la industria del níquel. Cuba (2014).	X		X				X		
5	Control de erosión superficial en planta de beneficio de plata empleando geomanta tridimensional reforzada. México (2020).	X		X				X		
6	Control de erosión en áreas de extracción de petróleo con procesos de evaluación de metodologías de control en el lote 121 sector sur en la zona del Río Napo Loreto – Perú (2014).	X		X		X				

Continuación Tabla 4.13. Prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación identificadas en el grupo de estabilización.

No	Grupo 3: Prácticas de estabilización									
	Proyectos y Manuales Revisados (Nacionales e internacionales)	Revegetación y Siembra		Bioingeniería		Obras estructurales de soporte		Obras de Modificación del Relieve	Mejoramiento del suelo	Obras especiales
		Hidrosiembra y siembra manual	Reforestación, plantaciones en contornos y cortafuegos (cortavientos)	Combinan vegetación y estructuras	Barreras vivas	Muros de roca, geomallas, geogrillas, pilotes, anclajes atirantados	Muros, cubiertas y bloques (adoquines) de hormigón	Terrazas, plataformas, trincheras de sujeción	Abonos, enmiendas orgánicas y fertilizantes	Revestimiento y muros de neumáticos
7	Informe final del Proyecto CJ068 Recuperación y conservación de suelos mediante presas de control de azolves, en la Cuenca de Burgos, México (2007).		X							
8	Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización Colombia (2011).	X		X		X				
9	Aplicación de nanotecnología para remediación de suelos contaminados por hidrocarburos. Bogotá (2022).									
10	Manual de técnicas estrategia de intervención: “desarrollo rural sostenible, basado en la conservación de suelos y aguas” serie “guía y manuales”, Bolivia (2004).	X	X		X	X		X	X	
11	Control de la erosión en desmontes originados por infraestructura viaria: aplicación al entorno de Palencia capital. España (2002).	X	X		X	X	X	X		
12	La nanotecnología en la agricultura y rehabilitación de suelos contaminados México (2010).		X							

Continuación Tabla 4.13. Prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación identificadas en el grupo de estabilización.

No	Grupo 3: Prácticas de estabilización									
	Proyectos y Manuales Revisados (Nacionales e internacionales)	Revegetación y Siembra		Bioingeniería		Obras estructurales de soporte		Obras de Modificación del Relieve	Mejoramiento del suelo	Obras especiales
		Hidrosiembra y siembra manual	Reforestación, plantaciones en contornos y cortafuegos (cortavientos)	Combinan vegetación y estructuras	Barreras vivas	Muros de roca, geomallas, geogrillas, pilotes, anclajes atirantados	Muros, cubiertas y bloques (adoquines) de hormigón	Terrazas, plataformas, trincheras de sujeción	Abonos, enmiendas orgánicas y fertilizantes	Revestimiento y muros de neumáticos
13	Manual de Manejo y Conservación de Suelos y Aguas, Costa Rica (1995).	X	X	X	X			X	X	
14	Manual de Control de Erosión Chile (2004).	X								X
15	Manual de Bioingeniería Honduras (2008).	X	X	X	X					
16	Manual de Bioingeniería Venezuela (2017).	X	X	X	X	X	X	X		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.14. Prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación identificadas en el grupo de remediación.

No	Grupo 4: Prácticas de remediación			
	Proyectos y Manuales Revisados (Nacionales e internacionales)	Aplicación de Nanotecnología	Aplicación de Polímeros y Otros Químicos	Mejoramiento del Suelo (remediación)
		Nanocatalizadores, nanohierro, nanoemulsiones	Inyección de polímeros y materiales bituminosos	Uso de abonos verdes y cultivos para fitorremediación
1	Control de erosión durante la construcción de proyectos mineros- estudio de caso Conococha, Antamina, Perú (2021)			
2	Control de la erosión y contaminación de las aguas en la explotación de lignitos de Meirama, España (1989)			
3	Restauración de suelos producto de actividades mineras: experiencia en el proyecto minero Mirador, Zamora Chinchipe-Ecuador (2020)			
4	Control de erosión mediante bioingeniería en presas de colas de la industria del níquel. Cuba (2014)		X	
5	Control de erosión superficial en planta de beneficio de plata empleando geomanta tridimensional reforzada. México (2020)			
6	Control de erosión en áreas de extracción de petróleo con procesos de evaluación de metodologías de control en el lote 121 sector sur en la zona del Río Napo Loreto – Perú (2014)			
7	Informe final del Proyecto CJ068 Recuperación y conservación de suelos mediante presas de control de azolves, en la Cuenca de Burgos, México (2007)			
8	Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización Colombia (2011)			
9	Aplicación de nanotecnología para remediación de suelos contaminados por hidrocarburos. Bogotá (2022)	X		X
10	Manual de técnicas estrategia de intervención: “desarrollo rural sostenible, basado en la conservación de suelos y aguas” serie “guía y manuales”, Bolivia (2004)			X
11	Control de la erosión en desmontes originados por infraestructura viaria: aplicación al entorno de Palencia capital. España (2002)			
12	La nanotecnología en la agricultura y rehabilitación de suelos contaminados México (2010)	X		X
13	Manual de Manejo y Conservación de Suelos y Aguas, Costa Rica (1995)			X
14	Manual de Control de Erosión Chile (2004)			
15	Manual de Bioingeniería Honduras (2008)			X
16	Manual de Bioingeniería Venezuela (2017)			

Con la finalidad de mostrar una síntesis visual y cuantitativa de la identificación de las prácticas de control de erosión hídrica y de degradación asociada, además de validar la selección de las mismas en la metodología, se calculó el porcentaje de frecuencia de uso de las prácticas igualmente por cada grupo respecto al total de proyectos revisados (dieciséis en total). En consecuencia, se evidenció cuales prácticas son frecuentemente aplicadas por los expertos, pudiendo tener mayor recomendación.

La Tabla 4.15 se aprecia la frecuencia con la que se utilizan las prácticas para el manejo del agua. Como se puede ver, dentro de este grupo las canales y obras de drenaje son las más implementadas en los proyectos, con el 69% de uso.

Tabla 4.15. Frecuencia de uso de prácticas de control de agua superficial y subterránea.

Grupo 1: Control de agua superficial y subterránea		
Práctica	Frecuencia de uso N° de proyectos	Frecuencia de uso (%)
Canales y obras de drenaje	11	69
Presas y estructuras de captación	10	63
Drenes y bombeo	4	25

Por otra parte, observa la popularidad de las prácticas que buscan contener y gestionar los sedimentos. Las estructuras de retención son las más empleadas, con una frecuencia del 63 % (Tabla 4.16).

Tabla 4.16. Frecuencia de uso de prácticas de control de sedimentos.

Grupo 2: Control de sedimentos		
Práctica	Frecuencia de uso N° de proyectos	Frecuencia de uso (%)
Estructuras de retención	10	63
Aislamiento de zonas erosionadas	2	13
Recubrimiento	9	56
Piscinas y estructuras de sedimentación	3	19
Control químico y físico	2	13

En el mismo sentido, se encuentran las prácticas dirigidas a mejorar la estabilidad del suelo. La revegetación y siembra es, por mucho, la práctica más recurrente, presente en más del 90 % de los proyectos. Los resultados se visualizan en la Tabla 4.17.

Tabla 4.17. Frecuencia de uso de prácticas de estabilización.

Grupo 3: Prácticas de estabilización		
Práctica	Frecuencia de uso N° de proyectos	Frecuencia de uso (%)
Revegetación y siembra	15	94
Obras estructurales de soporte	8	50
Bioingeniería	10	63
Obras de modificación del relieve	8	50
Mejoramiento del suelo	2	13
Obras especiales (Neumáticos)	1	6

Respecto al grupo de prácticas de control de erosión hídrica por remediación apreciadas en la tabla 4.18, el porcentaje de frecuencia de uso es mucho menor que en el resto de los grupos, alcanzando solo un 30% el mejoramiento del suelo

Tabla 4.18. Frecuencia de uso de prácticas de remediación.

Grupo 4: Prácticas de remediación		
Práctica	Frecuencia de uso N° de proyectos	Frecuencia de uso (%)
Aplicación de nanotecnología	2	13
Aplicación de polímeros y otros químicos	1	6
Mejoramiento del suelo abonos verdes y fitorremediación	5	31

4.4.2 Descripción y validación de factores de prácticas de control de erosión hídrica del suelo y otros procesos de degradación en proyectos de refinación petrolera a criterio de experto.

Una vez culminada la identificación de las prácticas de control en proyectos de distintas naturalezas, fue posible reconsiderar las interacciones entre los factores desencadenantes de los procesos de erosión y algunos procesos de degradación en las refinerías y los aspectos que pueden facilitar o entorpecer la implementación de las técnicas. En este sentido, los factores de selección fueron fundamentales para incluir dentro de la metodología a diseñar aquellas prácticas que en primer lugar respondan a la demanda de control de la erosión hídrica pero que también posean las características más favorables para adaptarse al escenario.

Mediante el análisis de los parámetros determinantes en el escogimiento de prácticas de control de erosión hídrica en las refinerías se establecieron los siguientes factores de selección:

1) Costo de implementación: referido a los gastos incurridos para ejecutar e instalar la obra material.

2) Periodicidad y costo de mantenimiento: referente a la proyección de los gastos necesarios para mantener la operatividad de las obras instaladas y la frecuencia con la que se deben realizar estas labores por unidad de tiempo.

3) Rapidez de implementación de la práctica de control: concerniente a la velocidad en unidad de tiempo con la que puede instalarse la obra para que entre en funcionamiento.

4) Tipo de tecnología y mano de obra requerida para la implementación: referente al esfuerzo físico y mental que se requiere de los trabajadores para ejecutar la obra. En otras palabras, si la práctica precisa para su implementación mano de obra calificada o especializada con habilidades específicas, o por el contrario mano de obra no calificada con requerimientos más sencillos. Respecto a la tecnología se considera el tipo de equipamiento necesario herramientas, maquinaria, entre otros.

5) Disponibilidad de materiales e insumos para implementar la práctica: relacionado a la accesibilidad de los materiales requeridos para la obra, si están disponibles dentro o fuera del país, así como también si deben ser transportados grandes distancias o por el contrario pueden ser tomados de zonas de préstamo cercanas o incluso de elementos del mismo proyecto.

6) Efectividad de la práctica en el control de erosión y/o degradación: referente a la contribución total en la mitigación y reducción de la erosión hídrica.

7) Vida útil de la práctica de control: respecto a la duración estimada que la obra puede tener cumpliendo correctamente su función.

8) Armonía de la práctica con el paisaje: referida a la integración de la obra con el paisaje de manera armoniosa entre las infraestructuras y la naturaleza.

9) Beneficios a largo plazo de las prácticas: concerniente a los beneficios que puede generar la práctica más allá del control de erosión hídrica de manera inmediata o cercana. Entre ellas preservación de la calidad de agua, mejora de las condiciones físicas químicas del suelo, incremento de la calidad visual del paisaje, aumento de productividad, entre otras.

10) Participación comunitaria: respecto a la acción de tomar en cuenta los pobladores pertenecientes a las comunidades cercanas como recursos de mano de obra que implementen las prácticas y como objeto fundamental de la educación ambiental.

Para la evaluación de la relevancia de cada parámetro se empleó la matriz de comparación por pares a juicio de experto establecida en el marco metodológico Tabla 3.8, siendo sometida a la consideración de diez expertos en el área; entre ellos ingenieros químicos, ingenieros geólogos e ingenieros de petróleo, además de geógrafos. Los resultados de la valoración se muestran en la Tabla 4.19, en la cual se ubican los criterios de selección propuestos en forma numerada del 1 al 10 y el valor de Fv correspondiente a la frecuencia con la que cada variable se repite en la matriz del experto o en otras palabras las veces que votó por cada criterio.

A continuación, se procedió a calcular Pv peso de cada variable por cada uno de los expertos consultados a través de la Ecuación 3.6, dividiendo Fv calculada anteriormente entre Nt número total de decisiones o juicios hechos por el experto en este caso 45. Los resultados se muestran en la Tabla 4.20

Tabla 4.19. Frecuencia de repetición por factor de selección en la matriz de evaluación de cada experto.

Criterios de selección	Experto FV1	Experto FV2	Experto FV3	Experto FV4	Experto FV5	Experto FV6	Experto FV7	Experto FV8	Experto FV9	Experto FV10
1	1	4	2	2	7	4	3	3	5	2
2	3	7	5	5	4	5	5	4	3	7
3	0	3	0	0	6	1	2	2	8	0
4	4	3	8	9	3	6	5	6	3	9
5	7	6	7	2	4	6	9	5	8	2
6	9	8	2	7	8	8	11	9	6	8
7	6	8	6	2	5	2	5	7	2	3
8	4	2	5	5	0	6	1	0	3	4
9	8	4	5	7	7	5	4	8	4	6
10	3	0	5	6	1	2	0	1	3	4

Tabla 4.20. Peso de cada factor de selección por cada experto consultado.

Criterios de Selección	Experto Pv1	Experto Pv2	Experto Pv3	Experto Pv4	Experto Pv5	Experto Pv6	Experto Pv7	Experto Pv8	Experto Pv9	Experto Pv10	Sumatoria Pv
1	0,02	0,09	0,04	0,04	0,16	0,09	0,07	0,07	0,11	0,04	0,73
2	0,07	0,16	0,11	0,11	0,09	0,11	0,11	0,09	0,07	0,16	1,07
3	0,00	0,07	0,00	0,00	0,13	0,02	0,04	0,04	0,18	0,00	0,49
4	0,09	0,07	0,18	0,20	0,07	0,13	0,11	0,13	0,07	0,20	1,24
5	0,16	0,13	0,16	0,04	0,09	0,13	0,20	0,11	0,18	0,04	1,24
6	0,20	0,18	0,04	0,16	0,18	0,18	0,24	0,20	0,13	0,18	1,69
7	0,13	0,18	0,13	0,04	0,11	0,04	0,11	0,16	0,04	0,07	1,02
8	0,09	0,04	0,11	0,11	0,00	0,13	0,02	0,00	0,07	0,09	0,67
9	0,18	0,09	0,11	0,16	0,16	0,11	0,09	0,18	0,09	0,13	1,29
10	0,07	0,00	0,11	0,13	0,02	0,04	0,00	0,02	0,07	0,09	0,56

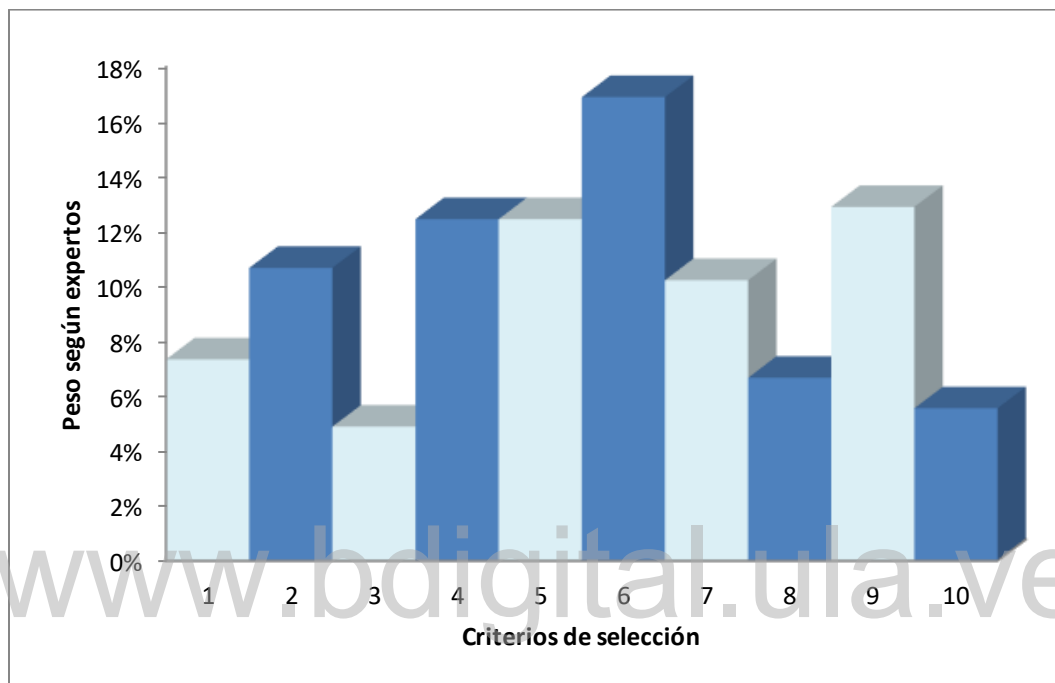
Posteriormente, fue determinado el valor de Ptv peso total de cada factor mediante la Ecuación 3.7, obteniendo los datos en orden de mayor a menor de la Tabla 4.21.

Tabla 4.21. Peso total de cada factor.

Número del Criterio	PTv	Descripción del criterio de selección
6	16,89%	Efectividad de la práctica en el control de erosión y/o degradación
9	12,89%	Beneficios a largo plazo de las prácticas
4	12,44%	Tipo de tecnología y mano de obra requerida para la implementación
5	12,44%	Disponibilidad de materiales e insumos para implementar la práctica
2	10,67%	Periodicidad y costo de mantenimiento
7	10,22%	Vida útil de la práctica de control
1	7,33%	Costo de implementación de la práctica
8	6,67%	Armonía de la práctica con el paisaje
10	5,56%	Participación comunitaria
3	4,89%	Rapidez de implementación de la práctica de control

Continuando el mismo orden de ideas, en el gráfico de barras de la Figura 4.1, se hace visible la preponderancia de cada uno de los factores. En consecuencia, se identificaron

como los factores con mayor relevancia al momento de seleccionar la práctica de control de erosión hídrica dentro de proyectos de refinación petrolera: inicialmente la efectividad de la práctica. Posteriormente, los beneficios a largo plazo; seguido muy de cerca en valores igualitarios el tipo de tecnología y mano de obra requerida para la implementación y la disponibilidad de materiales e insumos para implementar la práctica. Cabe destacar, que dentro de los factores de selección no se incluyó la inflamabilidad de los componentes de la obra pues por las actividades mismas de las refinerías es un aspecto fundamental a considerar en cualquier técnica a implementar.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.1. Relevancia de los factores para la selección de prácticas de control de erosión hídrica y/o degradación a juicio de experto.

Finalmente, se determinó índice de consistencia (IC) usando la Ecuación 3.8 para corroborar que los resultados obtenidos de la matriz fueron consistentes. Para ello se dividió la sumatoria total de Pv entre 100 valor real mayor de la matriz de comparación por pares.

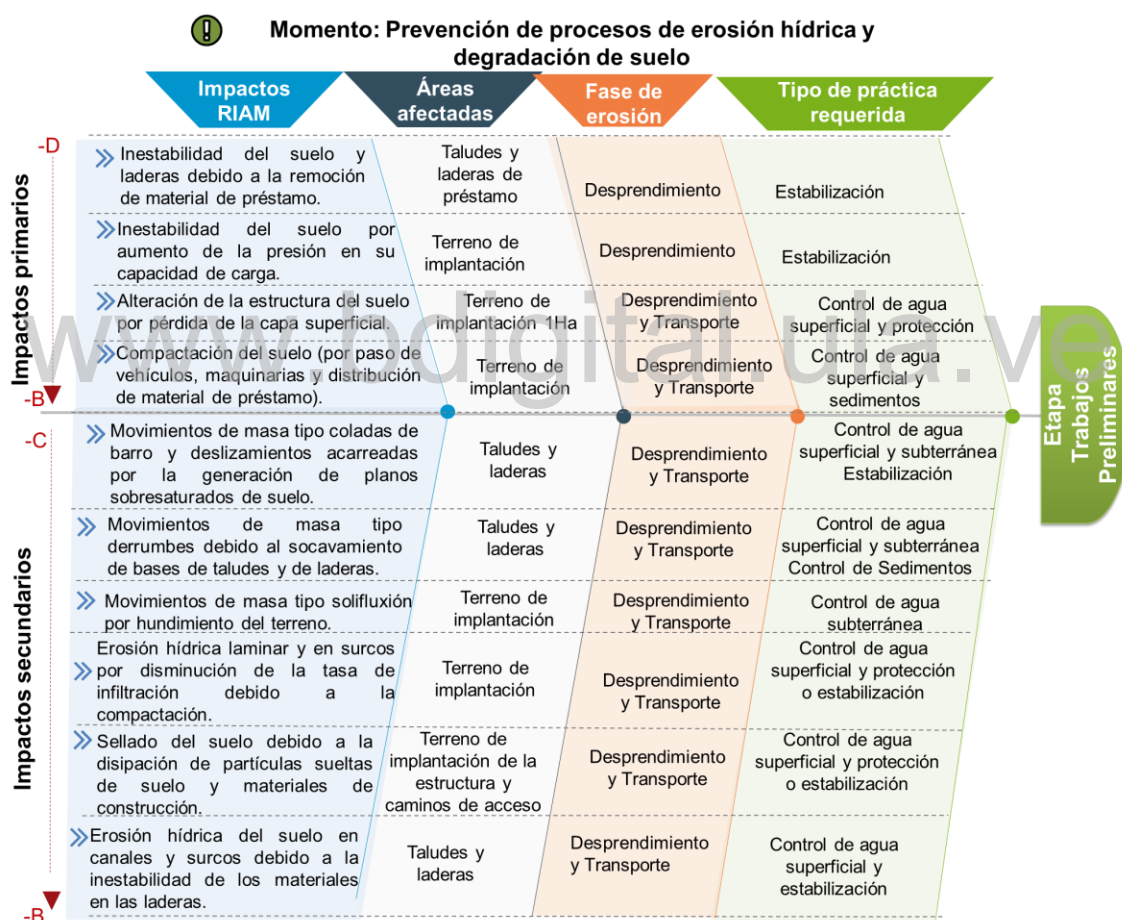
$$IC = \frac{10}{100} = 0,1 \text{ Por lo tanto } IC < 1 \text{ se considera eficaz para el estudio.}$$

4.4.3 Integración de las prácticas de control y factores de selección para cada fase de los proyectos de refinación petrolera.

Con las prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación identificadas y reagrupadas; junto con los factores de selección jerarquizados según la consideración de los expertos. Se prosiguió a seleccionar las prácticas con mayor potencial de adaptación a los escenarios de los proyectos de refinación petrolera. Para mantener el sentido lógico de interpretación establecido por la investigación, se plantearon las prácticas por etapa del proyecto, de la siguiente manera:

4.4.3.1 Prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación para la fase de trabajos preliminares de proyectos de refinación petrolera.

La selección de las prácticas apropiadas para esta etapa parte de la reconsideración de los impactos identificados según las actividades desarrolladas. Adicionalmente, se establecieron las áreas afectadas, la fase de erosión asociada (desprendimiento para la disgregación del material del suelo, transporte para el arrastre de partículas por el agua, sedimentación para la acumulación de partículas en lugares con obstáculos o cambios de pendiente) y el tipo de práctica requerida para su prevención o control. La síntesis de estos aspectos se muestra en el esquema de la Figura 4.2. Es importante acotar que la etapa de trabajos preliminares representa la etapa inicial de intervención, en consecuencia, presenta mayor número de impactos, pero constituye el momento idóneo para consolidar prácticas de carácter preventivo que eviten los procesos de erosión del suelo y degradación en las siguientes etapas del proyecto, reduciendo problemas ambientales y costos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.2 Aspectos para la consideración de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en la fase de trabajos preliminares para el proyecto de refinación de petróleo.

Como se observa en la Figura 4.2 los principales impactos asociados a los procesos de erosión hídrica en la fase de trabajos preliminares se refieren a la inestabilidad de taludes y laderas bien sea por la extracción de material de préstamo o por la remoción de la capa vegetal que aumenta la exposición del suelo al escurrimiento. A estos impactos se asocian fases erosivas de desprendimiento y transporte de partículas, requiriendo métodos de control de agua y sedimentos. Por otro lado, se encuentran los impactos propios a la disminución de la tasa de infiltración por compactación debido a la disipación de partículas de materiales de construcción, además del uso de maquinaria pesada, demandando prácticas de control de agua superficial y subterránea para los casos de planos sobresaturados del suelo, a raíz de esto se proponen las prácticas observadas en la tabla 4.22. Para la descripción precisa de las prácticas referirse al Apéndice B.

Tabla 4.22. Prácticas de control de erosión hídrica y degradación del suelo seleccionadas para la etapa de trabajos preliminares en los proyectos de refinación petrolera.

Etapas del proyecto	Áreas afectadas	Grupo de práctica	Tipo de práctica				
Trabajos preliminares	Taludes y Laderas	Estabilización	Modificación de pendiente	Conformación del terreno			
				Remoción de material			
				Bermas, bancales o terrazas			
		Manejo de aguas superficiales	Canales y obras de drenaje	Canales de desagüe			
				Canales colectores			
				Zanjas rellenas filtrantes			
		Manejo de aguas subterráneas		Drenes de penetración			
				Drenes verticales			
				Control de sedimentos	Protección de la superficie del terreno	Bioingeniería	Barreras de piedras intercaladas con gramíneas de porte bajo
		Revestimiento	Geomantas o Geosintéticos				
			Geomallas o Geogrillas				
			Geoceldas				
	Zonas de material de préstamo	Mixtas	Procedimiento a seguir según: Lugar de préstamo Morfología del entorno Estabilización para la reducción de tiempo de exposición de los materiales Sistemas de drenaje Abandono paulatino				
	Caminos de acceso definitivo	Manejo de aguas superficiales	Canales y Drenes	Canales de aguas superficiales			
				Alcantarillas			
Badenes							
Caminos de acceso temporal	Manejo de aguas superficiales	Canales y Drenes	Reconstitución de la red de drenajes original				
			Control de sedimentos	Recubrimientos	Suelo orgánico		
				Aislamientos	Mallas o material inflamable		

4.4.3.2 Prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo para la fase de construcción de proyectos de refinación petrolera.

La segunda etapa contemplada en la implantación de proyectos de refinación petrolera es la construcción, dentro de esta fase siguen desarrollándose actividades con potencial de generar perturbaciones sobre el suelo, pudiendo verse magnificadas si no fueron aplicadas medidas preventivas de control. En otras palabras, la construcción es momento para mitigar los daños ocasionados con antelación si existiesen y controlar aquellos que puedan surgir a causa de las acciones necesarias para dar continuidad al proyecto. En la Figura 4.3 se muestra la reconsideración de los impactos identificados para la construcción junto con las áreas afectadas, fase erosiva y el tipo de práctica requerida para atender la problemática.

Momento: Mitigar y controlar de procesos de erosión hídrica y degradación de suelo

	Impactos RIAM	Áreas afectadas	Fase de erosión	Tipo de práctica requerida	
Impactos primarios	» Inestabilidad del suelo por aumento de la presión en su capacidad de carga.	Superficie de construcción	Desprendimiento	Estabilización	Etapas Construcción
	» Compactación del suelo (por paso de vehículos, maquinarias y distribución de material de préstamo).	Vías de acceso y caminos	Desprendimiento y transporte	Control de agua superficial y protección	
	» Alteración de la capa superficial del suelo por disposición de tuberías y oleoducto.	Instalaciones lineales cercanas a la planta y dentro de la misma	Sedimentación	Control de agua superficial y sedimentos	
Impactos secundarios	» Movimientos de masa tipo coladas de barro y deslizamientos acarreados por la generación de planos sobresaturados de suelo y exposición de zonas excavadas.	Taludes y laderas	Desprendimiento y Transporte	Control de agua superficial y subterránea Estabilización	
	» Movimientos de masa tipo derrumbes debido al socavamiento de bases de taludes y de laderas.	Taludes y laderas	Desprendimiento y Transporte	Control de agua superficial y subterránea, Control de sedimentos Estabilización	
	» Sellado del suelo debido a la presencia de productos lixiviados, pudiendo producirse niveles impermeables y movimientos de masa de tipo deslizamiento.	Unidades de almacenamiento y de desechos	Proceso de degradación	Control de agua superficial y almacenamiento de materiales y desechos	
	» Erosión hídrica laminar y en surcos por disminución de la tasa de infiltración debido a la compactación.	Terreno de implantación	Desprendimiento y Transporte	Control de agua superficial y protección	
	» Erosión hídrica debido al transporte de partículas sueltas por pérdida de la capa superficial del suelo.	Caminos y vías de acceso	Desprendimiento y Transporte	Control de agua superficial y Protección	
	» Erosión hídrica concentrada en cárcavas y surcos al acentuarse la exposición del suelo en las zonas excavadas (canales de desahogo).	Instalaciones lineales y canales de desahogo	Desprendimiento Transporte y Sedimentación	Control de agua superficial Control de Sedimentos Protección de la cárcava	
	» Erosión concentrada en cárcavas en torno a tuberías por obstrucción de la escorrentía.	Instalaciones lineales cercanas a la planta y dentro de la misma	Transporte y sedimentación	Control de agua superficial	
	» Sellado del suelo debido a la disposición de partículas sueltas de suelo y materiales de construcción.	Terreno de implantación	Proceso de degradación	Control de agua superficial y sedimentos	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.3. Aspectos para la consideración de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación en la fase de construcción para el proyecto de refinación de petróleo.

Como se expone en la Figura 4.3 los impactos más resaltantes son producto de las excavaciones requeridas para la instalación de fundaciones, tuberías, oleoductos y canales de desahogo (canales perimetrales para disponer la escorrentía hasta el mar o cursos de agua superficiales). En este sentido, La excavación altera el nivel de agregación del suelo y expone áreas tanto lineales como concentradas a procesos de erosión donde se involucra el desprendimiento y transporte de partículas, para finalmente producir surcos y cárcavas. Otro grupo de impactos toma lugar debido al manejo dentro de las instalaciones de materiales de construcción y desechos. El esparcimiento de los mismos se relaciona con sellado del suelo y desarrollo de niveles impermeables. Ambos responsables de provocar erosión laminar, en surcos y en casos más graves coladas de barro. Por último, las bases de taludes y laderas pueden estar expuestas a la socavación por escorrentía especialmente si no se realizó ninguna práctica de control de agua superficial y recubrimiento en la etapa preliminar.

Para abordar el control de estos impactos se proponen las prácticas observadas en la Tabla 4.23. La descripción precisa de las prácticas corresponde al apéndice C.

Tabla 4.23. Prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación seleccionadas para la etapa de operación y mantenimiento en los proyectos de refinación petrolera.

Etapas del proyecto	Áreas afectadas	Grupo de práctica		Tipo de práctica		
Construcción	Instalaciones lineales Canales de desahogo Bases de taludes y laderas	Tratamiento de Cárcavas	Control de sedimento	Aislamiento de la cárcava	Estacas metálicas, mallas, alambre	
			Estabilización	Estructura de retención	Ataguía en la corona de la cárcava	
				Modificación de pendiente	Suavización de talud interno de la cárcava	
			Manejo de aguas superficiales y subterráneas	Canales y obras de drenaje	Canales de desviación o corona	En la corona de la cárcava
				Estructuras de captación	Zanjas de infiltración o absorción en laderas	En contorno para evitar el paso de agua a la cárcava
					Presas de contención	Diques en serie en el interior de la cárcava
	Taludes y laderas	Estabilización	Obra especial	Tratamiento lineal con revestimientos de neumáticos		
			Obra estructural de soporte	Muro de sacos rellenos		
				Adoquines articulados		
				Pilotes y anclajes		
				Geocolchones		
		Control de Sedimentos	Estructuras de retención	Tratamiento lineal con sacos rellenos de tierra		
			Recubrimiento	Flexocretos		
				Empedrado		
		Manejo de aguas superficiales	Disipador			
	Unidades de almacenamiento de desechos y materiales de construcción	Supervisión del manejo y almacenamiento de materiales, residuos y desechos				

4.4.3.3 Prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo para la fase de operación y mantenimiento de proyectos de refinación petrolera.

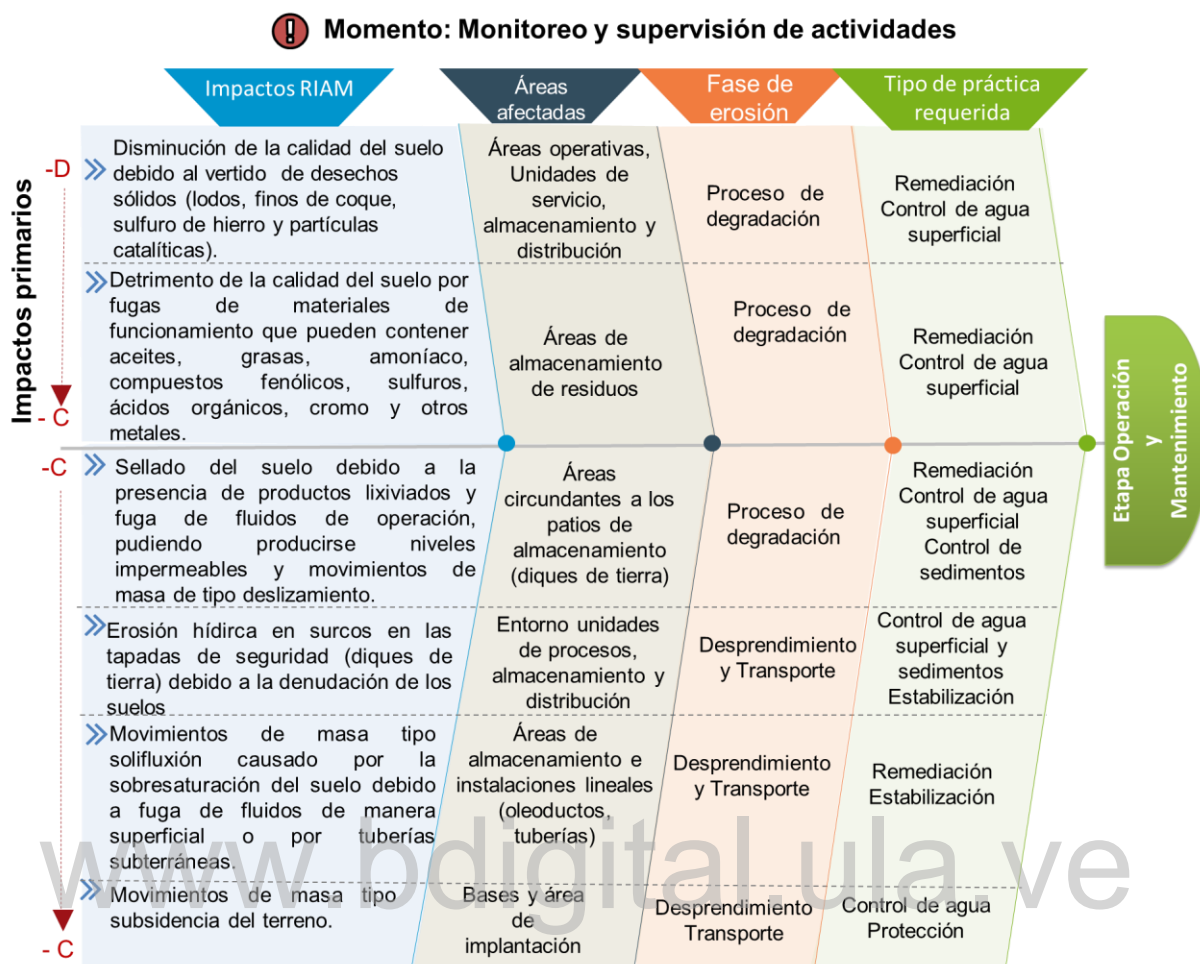
La etapa de operación y mantenimiento corresponde a la fase final de la implantación de los proyectos de refinación petrolera. En este nivel los procesos de erosión hídrica y degradación debieron haber sido abordados mediante las prácticas de control expuestas anteriormente para cada caso. Sin embargo, el funcionamiento de la planta conlleva actividades capaces de generar nuevos escenarios de afectación, además de intensificar aquellos problemas que no fueron tratados con antelación en los trabajos preliminares y la construcción. Por lo tanto, la fase de operación es el momento idóneo para la supervisión de las medidas ya implantadas, así como también de monitoreo de las componentes y unidades de procesos que al colapsar pueden desencadenar erosión.

La identificación de impactos para la fase operativa reveló que la mayoría de los procesos de erosión y degradación pueden originarse como consecuencia de posibles fugas de contaminantes. Dentro de las refinerías se categorizan tres tipos de contaminantes, en primer lugar, los desechos sólidos donde se incluyen lodos, finos de coque, sulfuro de hierro y partículas catalíticas. Por otra parte, se encuentran los materiales de funcionamiento que pueden contener aceites, grasas, amoníaco, compuestos fenólicos, sulfuros, ácidos orgánicos, cromo y otros metales. Por último, los fluidos de operación que corresponden al petróleo y los subproductos como gasoil y gasolina. En cualquier caso, el vertido de estos contaminantes en el suelo se traduce en degradación que además conduce a generación de impermeabilidad y desencadena erosión laminar y en surco en áreas como los diques de tierra o las tapadas de seguridad.

Asimismo, las fugas no solo pueden ocurrir de manera superficial, la pérdida de fluidos en las instalaciones lineales subterráneas (oleoductos y tuberías), acarrear sobrecarga del suelo produciendo potenciales movimientos de masa. De igual forma pueden reiniciarse procesos de erosión en zonas desprovistas de capa superficial que no cuenten con ningún tipo de protección desde estadios previos del proyecto.

Las prácticas requeridas para el control de la erosión hídrica asociada a los impactos descritos se presentan en la Figura 4.4. Efectivamente se observa que las medidas pueden agruparse en las prácticas de remediación de suelos para remover o reducir los contaminantes y las prácticas de control de agua superficial para evitar el desprendimiento del material. Para dar solución a los procesos de erosión y degradación desarrollados en la etapa de operación se proponen medidas de estabilización química del terreno a ser aplicada en áreas más específicas, posteriormente medidas de remediación de suelo y, por último, pero de carácter fundamental la educación ambiental. No obstante, las medidas de manejo de escorrentía y protección de taludes que se han establecido en las fases previas pueden implementarse igualmente en esta etapa en caso de ser necesario, por ello no serán nuevamente planteadas.

Finalmente, las prácticas propuestas para esta fase del proyecto se muestran en la Tabla 4.24. Donde se incluye la educación ambiental como elemento fundamental dentro de la gestión ambiental. Si bien se incluyó en la última etapa puede y debe ser aplicada desde el inicio del proyecto. Partiendo del hecho que la educación tiene la capacidad de modificar conductas, estilos de vida y formas de convivencia, puede convertirse en objeto base de actitudes proambientales en todos los niveles, desde pobladores, trabajadores, directivos e incluso entes gubernamentales relacionados a los procesos petroleros.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.4. Aspectos para la consideración de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación en la fase de operación y mantenimiento para el proyecto de refinerías de petróleo.

En este contexto las primeras etapas educativas suponen una oportunidad para introducir los conceptos iniciales de educación ambiental; no obstante, se requiere de un impulso en todos los momentos de la vida de las personas que les permitan tomar decisiones responsables desde el punto de vista ambiental. Por tal motivo se considera viable la implementación de talleres de educación ambiental tanto en los habitantes de áreas cercanas a las refinerías como trabajadores que forman parte de la misma. Con esto se puede conseguir en primer lugar incorporar a los pobladores en la ejecución de las prácticas, generando empleos además de concienciación de los problemas atendidos. Por otra parte, los trabajadores tendrán mejores herramientas para identificar situaciones de riesgo asociadas a los procesos de erosión y en consecuencia un comportamiento más realista en cuanto a la prevención y mitigación de los impactos ambientales.

Ahora bien, en términos de organización existen otros elementos para velar por una visión proambiental orientada al desarrollo sostenible, esto corresponde a los Sistemas de Gestión Ambiental SGA. Así pues, su implementación parte del conocimiento previo de los impactos ambientales generados por su actividad, para adquirir el compromiso de la protección ambiental según los requisitos legales, aspectos ambientales y el desempeño

de los procesos requeridos para su funcionamiento. Finalmente, la alianza entre la educación de visión proambiental que promueva una toma de decisiones estructurada hacia el desarrollo sostenible, junto con el trabajo organizacional para elegir la optimización de procesos respetando la calidad ambiental, puede generar impactos positivos a nivel individual y social en las personas desde las organizaciones y en la sociedad en la que están inmersas. Para la descripción detallada del resto de las prácticas referirse al apéndice D.

Tabla 4.24. Prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación seleccionadas para la etapa de operación y mantenimiento en los proyectos de refinación petrolera.

Etapa del proyecto	Áreas afectadas	Grupo de práctica		Tipo de práctica	
Operación y mantenimiento	Taludes	Estabilización	Cubiertas de soporte	Cubiertas con asfalto y concreto	
				Cubierta de polímeros	
				Cubierta con nanoformulados	
	Áreas operativas Unidades de servicio Áreas de almacenamiento Áreas de distribución Áreas circundantes a los patios de almacenamiento Unidades de procesos Instalaciones lineales (tuberías, oleoductos)	Remediación	Medidas de remediación in situ y ex situ	Bioventilación (In situ)	
				Extracción de vapores del suelo (In situ)	
				Incineración (Ex situ)	
				Biorremediación por Landfarming (In Situ y Ex Situ)	
				Nanoremediación (In Situ y Ex Situ)	Aplicación del Nanohierro: ZVI (Fe°)
					Aplicación de Nanoemulsiones
					Aplicación de Micro-nanoburbujas
Medidas de educación y sensibilización ambiental					

Fuente: Elaboración propia.

4.5 Evaluación de las prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo asociada respecto a los factores de selección mediante juicios de valor.

Como último paso antes de la proposición de la metodología, se sometió a una evaluación cualitativa las prácticas seleccionadas respecto a los factores de selección a través de juicios de valor. Para esto se comenzó con la descripción de la escala de puntuación para cada factor de selección, los rangos y escalas de puntuación establecidos se encuentran en la Tabla 4.25. Seguidamente, se asignaron puntuaciones a las prácticas según los juicios de valor. Por consiguiente, la evaluación se llevó a cabo por fases del proyecto, manteniendo así el esquema metodológico propuesto. Resultados están visibles en las Tablas 4.62, 4.27 y 4.28 respectivamente.

Tabla 4.25. Rangos de los factores de selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo establecidos para los juicios de valor.

Valoración	Rango	Factores de Selección de prácticas					
		Efectividad de la práctica	Beneficios a largo plazo de las prácticas	Tipo de tecnología y mano de obra requerida para la implementación	Disponibilidad de materiales e insumos para implementar la práctica	Periodicidad y costo de mantenimiento	Inflamabilidad de materiales
1	Factor no adecuado	No tiene efecto sobre el proceso de erosión y/o degradación. Puede incluso agravar la situación o generar fallas.	Beneficio a corto plazo, y los resultados desaparecen poco después de la implementación. No genera ventajas ambientales o económicas duraderas.	Requiere tecnología o equipos altamente especializados, lo que complica su adquisición e implementación. La mano de obra necesaria es escasa o requiere capacitación intensiva y costosa.	Los materiales e insumos son raros, se producen en el extranjero o tienen un alto costo de transporte y logística.	Requiere un mantenimiento constante (semanal o mensual), con altos costos de operación y reemplazo de materiales. La vida útil es muy corta si no se mantiene.	Los materiales utilizados son altamente inflamables o combustibles. Su uso representa un riesgo de incendio inaceptable dentro del entorno de la refinería.
2	Factor moderadamente adecuado	Mitiga parcialmente la erosión y/o degradación, pero su efectividad está limitada a condiciones específicas o requiere la combinación con otras prácticas para lograr un control efectivo.	Beneficios por un tiempo limitado. Si bien puede haber una mejora inicial, no ofrece ventajas sostenibles en el tiempo sin un mantenimiento constante o una intervención adicional.	Necesita tecnología o mano de obra con un grado de especialización que puede encontrarse con dificultad. Requiere un nivel de capacitación moderado para su correcta ejecución.	Los materiales están disponibles en el país, pero pueden ser difíciles de obtener localmente. Requieren un tiempo considerable de espera o una logística compleja.	Necesita un mantenimiento periódico (varias veces al año), con costos moderados. Los trabajos de mantenimiento son complejos y requieren personal especializado.	Los materiales tienen una inflamabilidad baja. Pueden encenderse, pero no propagan el fuego de forma rápida y pueden ser extinguidos fácilmente.
3	Factor adecuado	Controla la erosión y/o degradación de manera efectiva en las condiciones ambientales y de terreno del proyecto. Proporciona una solución robusta y confiable.	Beneficios prolongados en el tiempo. Sus efectos son duraderos, contribuye positivamente al ambiente local y puede generar ahorros económicos en el mediano y largo plazo.	Puede ser implementada con tecnología estándar o de fácil acceso. La mano de obra requerida tiene un nivel de habilidad común, facilitando su ejecución.	Los materiales son de fabricación local o se encuentran fácilmente en el mercado nacional.	Requiere un mantenimiento mínimo (anual o cada varios años) con costos bajos. Las tareas de mantenimiento son sencillas y no requieren personal altamente calificado.	Los materiales no son inflamables. No se encienden fácilmente y no contribuyen a la propagación de un incendio.
4	Factor muy adecuado	Es altamente efectiva y ofrece un control completo de la erosión hídrica y/o degradación. Es una solución probada que garantiza resultados excepcionales.	Beneficios significativos y a largo plazo. Contribuye de forma integral a la recuperación del suelo y ofrece reducción de costos de mantenimiento y una mayor estabilidad del terreno.	Puede implementarse con tecnología o herramientas básicas. La mano de obra puede ser no especializada o de fácil capacitación, reduciendo los costos y el tiempo de implementación.	Los materiales e insumos son de fácil acceso, incluso pueden ser de origen local o reciclados. La disponibilidad no es un problema, y su obtención es rápida y económica.	Es prácticamente autosostenible y no requiere mantenimiento. Los costos son mínimos o nulos una vez que la obra está operativa.	Los materiales son completamente incombustibles. No representan ningún riesgo de incendio en ninguna circunstancia.

Valoración	Puntaje
Factor no adecuado	1-6
Factor moderadamente adecuado	7-12
Factor adecuado	13-18
Factor muy adecuado	19-24

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.26. Juicios de valor realizados a las prácticas de la fase de trabajos preliminares de los proyectos de refinación petrolera.

Prácticas para la fase de trabajos preliminares		Factores de selección de prácticas de control de erosión hídrica y/o degradación en refinerías						
		Efectividad de la práctica	Beneficios a largo plazo de las prácticas	Tipo de tecnología y mano de obra requerida para la implementación	Disponibilidad de materiales e insumos para implementar la práctica	Periodicidad y costo de mantenimiento	Inflamabilidad de materiales	Total
1	Conformación del terreno	2	1	4	4	1	4	16
2	Remoción de material	1	1	4	4	1	4	15
3	Bermas, bancales o terrazas	3	2	4	4	2	4	19
4	Canales de desagüe	3	2	4	4	2	4	19
5	Canales colectores	3	2	4	4	2	4	19
6	Zanjas rellenas filtrantes	3	2	4	4	1	4	18
7	Drenes de penetración	3	3	3	3	3	4	19
10	Drenes verticales	3	3	3	3	3	4	19
11	Barreras de piedras intercaladas con gramíneas de porte bajo	3	3	4	4	3	2	19
12	Geomantas o Geosintéticos	4	3	3	3	4	2	19
13	Geomallas o Geogrillas	3	4	3	3	4	2	19
14	Geoceldas	4	4	3	3	4	2	20
15	Canales de aguas superficiales	3	2	4	4	2	4	19
16	Alcantarillas	3	4	3	3	3	4	20
17	Badenes	3	3	4	4	3	4	21
18	Reconstitución de la red de drenajes original	3	4	3	3	4	4	21
18	Recubrimiento con suelo orgánico	3	2	4	4	2	2	17
20	Aislamiento con mallas metálicas	2	1	3	3	2	4	15

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.27. Juicios de valor realizados a las prácticas de la fase de construcción de los proyectos de refinación petrolera.

Prácticas para la fase de Construcción		Factores de selección de prácticas de control de erosión hídrica en refinerías y/o degradación						Total
		Efectividad de la práctica	Beneficios a largo plazo de las prácticas	Tipo de tecnología y mano de obra requerida para la implementación	Disponibilidad de materiales e insumos para implementar la práctica	Periodicidad y costo de mantenimiento	Inflamabilidad de materiales	
1	Aislamiento de la cárcava con estacas metálicas, mallas metálicas, alambre	2	1	4	4	2	3	16
2	Ataguías en la corona de la cárcava	4	2	3	4	2	4	19
3	Suavización de talud interno de la cárcava	3	2	4	4	2	4	19
4	Canales de desviación o corona	3	2	4	4	2	4	19
5	Zanjas de infiltración o absorción en laderas	3	3	4	4	2	4	20
6	Presas de contención	4	4	2	3	3	4	20
7	Captación de sólidos y líquidos en la parte basal con diques trampas canales de desagües o rampas revestidas	3	4	3	3	3	4	20
8	Tratamiento lineal con revestimientos de neumáticos	2	3	3	3	2	1	14
9	Muro de sacos rellenos	3	2	4	4	2	4	19
10	Adoquines articulados	4	4	2	3	4	4	21
11	Pilotes y anclajes	4	4	1	1	4	4	18
12	Geocolchones	4	4	2	3	4	4	21
13	Tratamiento lineal con sacos rellenos de tierra	2	2	4	4	2	4	18
14	Flexocretos	4	4	1	1	4	4	18
15	Disipador	3	4	2	3	4	4	20
16	Supervisión del manejo y almacenamiento de materiales, residuos y desechos	3	4	4	4	4	4	23

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.28. Juicios de valor realizados a las prácticas de la fase de operación y mantenimiento de los proyectos de refinación petrolera.

Prácticas para la fase de Operación y mantenimiento		Factores de selección de prácticas de control de erosión hídrica y/o degradación en refinerías						Total
		Efectividad de la práctica	Beneficios a largo plazo de las prácticas	Tipo de tecnología y mano de obra requerida para la implementación	Disponibilidad de materiales e insumos para implementar la práctica	Periodicidad y costo de mantenimiento	Inflamabilidad de materiales	
1	Cubiertas con asfalto y concreto	4	4	2	4	4	3	21
2	Cubierta de polímeros	4	3	3	3	3	1	17
3	Cubierta con nanoformulados	4	4	1	1	2	1	13
4	Bioventilación (In situ)	2	4	1	1	1	4	13
5	Extracción de vapores del suelo (In situ)	2	4	1	1	1	4	13
6	Incineración (Ex situ)	3	4	1	1	1	4	14
7	Biorremediación por Landfarming (In Situ y Ex Situ)	3	4	3	4	2	4	20
8	Aplicación del Nanohierro: ZVI (Fe ⁰)	3	4	1	1	2	4	15
9	Aplicación de Nanoemulsiones	2	4	1	1	2	2	12
10	Aplicación de Micro-nanoburbujas	2	4	1	1	2	4	14
11	Medidas de educación y sensibilización ambiental	1	4	4	4	3	4	20

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los juicios de valor se obtuvo que las prácticas para el control de erosión hídrica seleccionadas para las distintas fases del proyecto responden efectivamente a los factores de selección establecidos. De esta manera los resultados arrojan que las prácticas están entre adecuadas a muy adecuadas.

4.6 Propuesta de metodología para la selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación de suelo asociados a proyectos de refinación de petróleo.

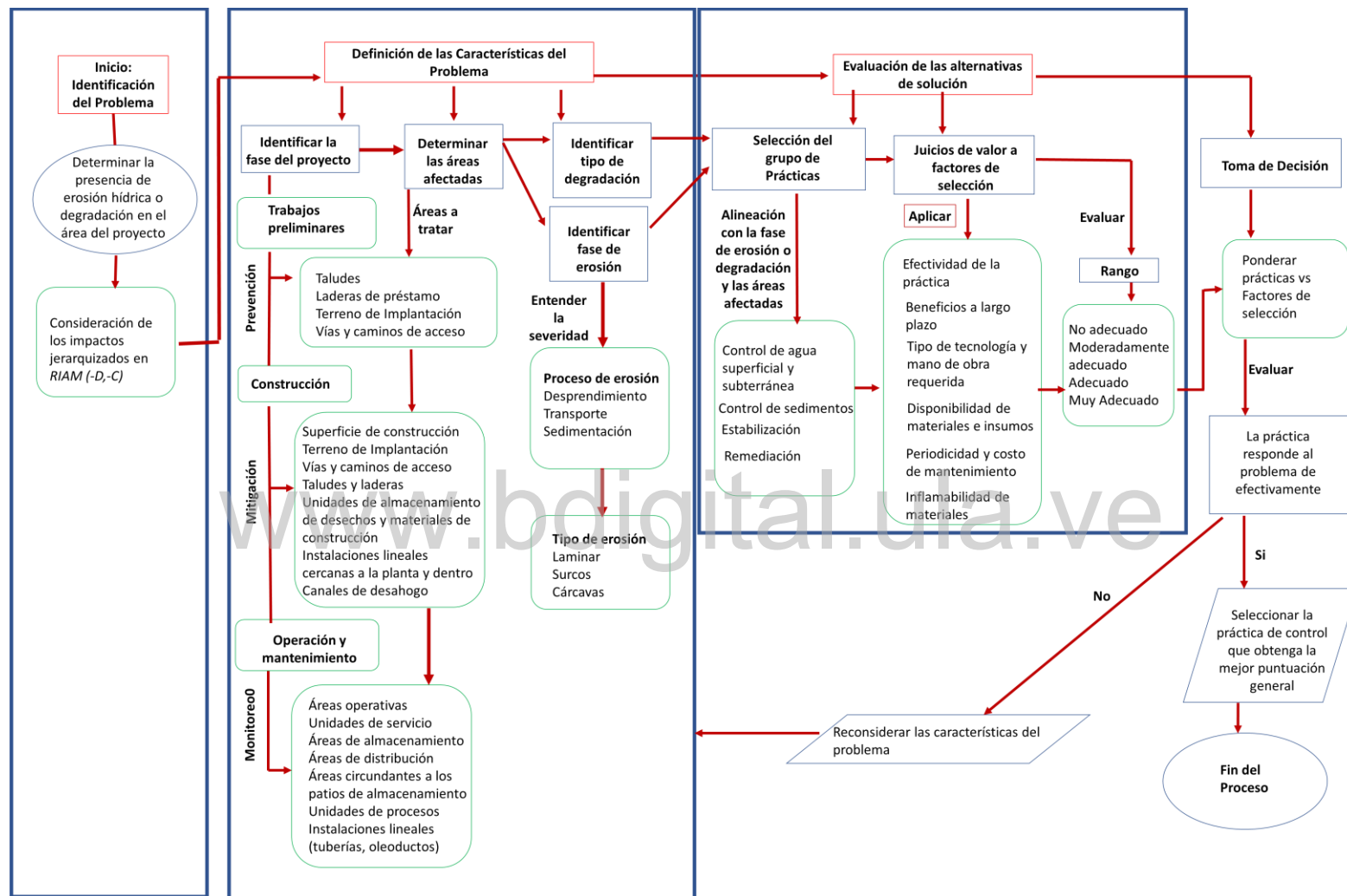
Con base a los análisis realizados siguiendo cada una de las etapas establecidas para la investigación se logró cumplir con los primeros cinco objetivos. En la etapa 1 se identificaron las características de alteración del recurso suelo para cada fase de los proyectos de refinación petrolera, adicionalmente se valoraron los riesgos tecnológicos y su probabilidad de ocurrencia. A continuación, en la etapa 2 se seleccionaron las prácticas de control de erosión hídrica mediante un proceso que incluyó en primer lugar la revisión de prácticas implementadas en proyectos de distinta naturaleza, seguidamente el establecimiento de los factores de selección a juicio de expertos y por último la evaluación de las prácticas seleccionadas por fase del proyecto mediante los juicios de valor. Para dar cumplimiento al último objetivo de la investigación y con este al objetivo principal se planteó para la tercera y última etapa el diseño de la metodología.

El procedimiento para la selección de prácticas de control de erosión hídrica en proyectos de refinación petrolera se muestra en la Figura 4.5. Inicia con la identificación de la erosión hídrica en un área específica. Luego, se definen sus características clave para contextualizar el problema: se identifica la fase del proyecto (trabajos preliminares, construcción, u operación y mantenimiento), las áreas afectadas (ej. taludes o caminos) y la fase erosiva (laminar, en surcos, o cárcavas). A su vez, se consideran los impactos jerarquizados por RIAM, lo que permite determinar la gravedad del problema y priorizar las acciones necesarias.

Como segunda parte, se efectúa la selección y evaluación de las alternativas de solución: una vez definido el problema, la metodología guía la selección del grupo de prácticas que se alineen con la fase erosiva y las áreas afectadas. Cada práctica dentro del grupo seleccionado es sometida a un juicio de valor. Este proceso de evaluación considera factores críticos como la efectividad de la práctica, sus beneficios a largo plazo, el tipo de tecnología y mano de obra requerida, la disponibilidad de materiales, la periodicidad y el costo de mantenimiento, y la inflamabilidad de sus componentes.

Finalmente, se avanza al momento de toma de decisión y aplicación. Para tal motivo se ponderan las puntuaciones obtenidas en los juicios de valor, y se selecciona la práctica de control de erosión que haya demostrado ser la más adecuada y segura para el caso de estudio. Esta elección basada en datos objetivos minimiza riesgos, optimiza recursos y contribuye a la sostenibilidad ambiental del proyecto.

Por otra parte, en la Tabla 4.29 se presenta la ficha técnica en la que se plantean los aspectos para la selección de prácticas de control de erosión hídrica en proyectos de refinación petrolera.



Fuente: Elaboraci3n propia.

Figura 4.5. Procedimiento de selecci3n de pr3cticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradaci3n asociados a proyectos de refinaci3n petrolera.

Tabla 4.29. Ficha técnica para la selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación en proyectos de refinación petrolera.

Selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en proyectos de refinación de petróleo					
1. Identificación y caracterización del problema:					
Fase del proyecto		Fase de erosión		Otros procesos de erosión o degradación:	
☐ Trabajos preliminares		☐ Laminar			
☐ Construcción		☐ Surcos			
☐ Operación y mantenimiento		☐ Cárcava			
Áreas afectadas:					
Impactos sobre el suelo asociados:					
2. Selección y evaluación de la(s) práctica(s):					
Tipo de práctica(s) requerida(s):					
☐ Control de agua superficial y subterránea		☐ Control de sedimentos		☐ Estabilización ☐ Remediación	
Descripción de la(s) práctica(s) (nombre(s), propósito y método de aplicación):					
Juicio(s) de valor de la(s) práctica(s) según factores de selección					
Factor de Selección			Juicio de valor para la práctica (Puntuación 1- 4)		
Efectividad de la práctica en el control de erosión y/o degradación					
Beneficios a largo plazo					
Tipo de tecnología y mano de obra requerida					
Disponibilidad de materiales e insumos					
Periodicidad y costo de mantenimiento					
Inflamabilidad de materiales					
Puntaje Total					
Clasificación de la(s) práctica(s):					

4.6.1 Consideraciones adicionales para la selección de prácticas de control de erosión y otros procesos de degradación en proyectos de refinación petrolera.

Como fue expuesto anteriormente las prácticas de control de erosión abordan aspectos fundamentales respecto al comportamiento del agua superficial y subterránea en el suelo y el desprendimiento o movilización de los sedimentos. No obstante, la adecuación de las prácticas puede variar considerablemente según las condiciones de la zona o el proyecto, al facilitar o dificultar el éxito de implantación. Por lo tanto, antes de ejecutar cualquier obra forzosamente se deben considerar las condiciones de los siguientes factores:

1. Tipo de Suelo: las condiciones físicas de los suelos determinan su susceptibilidad a la erosión. Tomando en cuenta la textura del suelo, aquellos con alto porcentaje de limo son muy susceptibles a la erosión debido a la baja permeabilidad asociada a los poros del suelo. En consecuencia, la capacidad de infiltración disminuye generando mayor escorrentía superficial y daños de erosión. Por su parte, suelos con alto porcentaje de arcilla y por tanto baja capacidad de infiltración son muy susceptibles a la erosión en lluvias intensas. Por el contrario, los suelos arenosos tienen gran capacidad de infiltración absorbiendo la mayor parte del agua sin generar escorrentía. Sin embargo, la poca coherencia entre los agregados del suelo favorece el arrastre de elementos ante lluvias intensas. Por lo tanto, las texturas francas uniformes con predominio único de materiales suponen mayores factores de riesgos de erosión.

Desde el punto de vista de la estructura del suelo se considera que estructuras masivas o de bloques fuertes oponen mayor resistencia al impacto de las gotas de lluvia y arrastre por escurrimiento superficial, mientras que estructuras granulares sueltas son altamente susceptibles a la erosión.

Adicionalmente, la presencia de materia orgánica ofrece mayor resistencia del suelo a la erosión permitiendo mayor capacidad de absorción y retención de agua, además ayudando a la formación de agregados estables. Como resultado mejora la estructura del suelo al elevar la permeabilidad y porosidad.

Finalmente, estas características influyen directamente en la introducción de determinadas prácticas. Suelos altamente degradados requieren mejora de las condiciones iniciales antes de la implementación. Suelos con obstáculos de pedregosidad dominante requieren uso de maquinaria especializada y suelos compactados requieren acondicionamiento previo a la ejecución de la práctica.

2. Clima: las lluvias representan la energía que puede impactar sobre el suelo. En cuanto sea mayor la intensidad de la lluvia mayor será la energía transmitida al terreno. Por lo tanto, la cantidad de lluvia recibida en el área tiene según sus características de intensidad y duración mayor o menor capacidad de erosión. Además, las precipitaciones establecen la disponibilidad o falta de agua en el área según las zonas semiáridas o húmedas, en consecuencia, deben ser consideradas las épocas de lluvia y sequía para la implementación de las prácticas. Otro aspecto importante del estudio de la intensidad, duración y épocas de lluvias es el diseño de las prácticas físicas según el volumen de agua que deben manejar a lo largo de la vida útil de la obra.

3. Topografía: a medida que aumenta el grado de la pendiente y su longitud, la velocidad y el volumen de agua de escorrentía crece junto con su poder de erosión. Esto se debe a que cuanto mayor es la pendiente, existe la tendencia de que la intensidad de muchos factores aumente, entre ellos la erosión de los factores externos, la inclinación o desviación de la dispersión de las partículas y la fuerza de transporte de las mismas. Por

otra parte, la cantidad de erosión aumenta según la regularidad de la superficie de la pendiente. Es mayor en superficies regulares y se reduce hacia pendientes con concavidades; pues en pendientes planas la velocidad de escurrimiento que se produce es mayor en la parte baja y por lo tanto la fuerza de dispersión y absorción de la energía del escurrimiento superficial es pequeña. La consideración de este parámetro puede dar mayor relevancia a prácticas enfocadas a reducir el grado de la pendiente y acortar su longitud, dividiéndola en tramos.

4.7 Aplicación al caso de estudio de la Refinería Amuay.

Luego de considerar cada una de las etapas de implantación de los proyectos de refinación petrolera ha sido posible identificar los impactos asociados a la erosión hídrica y degradación del suelo asociadas a proyectos de refinación, así como también proponer las prácticas apropiadas para su control considerando los criterios de selección más resaltantes. Como resultado se ha obtenido una metodología adaptada especialmente para este tipo de proyectos que tal y como se estableció en el marco metodológico de la investigación pasará a ser aplicada en el caso de estudio de la Refinería Amuay, ubicada dentro del Complejo de Refinación Paraguaná. La información empleada para el análisis parte del estudio realizado por Semprun (2017) quien caracterizó los procesos de erosión hídrica en diques y taludes de la Refinería Amuay.

4.7.1 Prácticas para el control de erosión y otros procesos de degradación en los diques y taludes en la Refinería Amuay.

Una vez planteados los procesos de erosión hídrica y degradación del suelo desarrollados dentro de la refinería fue momento de seleccionar a partir de la metodología propuesta las prácticas de control. Partiendo de las características del suelo del área de estudio presenta un grado de erosión moderada a severa especialmente en forma de cárcava; encontrándose dominada por texturas Franco Arenosas con moderadas proporciones de arcillas (FAa).

Por otra parte, la erosión hídrica en la refinería sugiere un manejo inadecuado del agua superficial, lo que se relaciona directamente con el factor de drenaje externo. La formación de cárcavas y la acumulación de agua en la base de la infraestructura indica un drenaje deficiente o inexistente, lo que agrava la remoción del suelo. Asimismo, sus características de salinidad que pueden ir de ligeramente salinos a fuertemente salinos e índice bajo de calidad del suelo lo convierten en un suelo de baja fertilidad y con riesgo de erosión alto. Cabe destacar que áreas industriales, como la refinería, están sujetas a contaminación por hidrocarburos y otros subproductos, lo que reduce su fertilidad o la hace nula para fines agrícolas.

Adicionalmente, el área de estudio se caracteriza por suelos con un alto contenido de sales y arcillas. La presencia de suelos finos (arcillosos) con problemas de drenaje de baja permeabilidad, aumenta la escorrentía superficial. Esto se traduce en un mayor riesgo de erosión, formación de surcos y cárcavas, y el transporte de sedimento.

El proyecto de la Refinería Amuay ya se encuentra en la etapa operativa por lo tanto las medidas de control estarán enfocadas en la mitigación de la erosión hídrica detectada y por supuesto el posterior monitoreo de su funcionamiento. Los procesos de erosión laminar, en surco y cárcavas caracterizados dentro de la refinería coinciden con la identificación de impactos realizados en este estudio para las etapas de construcción y mantenimiento del proyecto. Validando de esta forma las afectaciones distinguidas previamente sobre el recurso suelo. En este sentido, la erosión está asociada en primer

lugar al deterioro de las técnicas implementadas, seguidamente a la ausencia de cobertura del suelo y finalmente a la disminución de la tasa de infiltración por procesos de compactación.

Siguiendo la metodología planteada se determinaron como áreas afectadas los diques de los patios de almacenamiento y los taludes de la refinería, especialmente los que se encuentran cercanos a la Bahía de Amuay. En este caso no se ven perturbadas las vías de acceso, áreas de unidades de procesos ni las instalaciones lineales. Respecto al tipo de práctica requerida, dado que en la caracterización de procesos de erosión hecha por Semprun (2017) no determinó degradaciones relacionadas a niveles impermeables por fugas de contaminantes no se requieren para este caso prácticas de remediación de suelos.

Ahora bien, para mitigar los procesos de erosión hídrica concentrada identificados en la refinería se requieren entonces prácticas de control de agua superficial, control de sedimentos y estabilización. Para efectos del estudio se asume que las obras de canalización de aguas de escorrentía como canales de desagüe y canales colectores, fueron implantadas desde el inicio del proyecto y que la merma de su funcionamiento puede estar relacionada a la ausencia de mantenimiento o protección apropiada de su superficie. Adicionalmente, tal y como se propuso a través de la metodología diseñada, el planteamiento de las posibles prácticas se realizó en primera instancia, considerando la función de la práctica según el proceso de erosión o tipo de degradación identificado y en segundo lugar los criterios de selección relevantes establecidos.

4.7.2 Prácticas para el control de erosión y otros procesos de degradación en los diques de los patios de almacenamiento de la Refinería Amuay.

Esta área se encuentra afectada por erosión del tipo laminar en mayor proporción y en surcos. En consecuencia, podría decirse que los procesos de erosión se encuentran en una fase inicial, en la cual el desprendimiento de las partículas ha generado principalmente irregularidades de pequeñas dimensiones en el terreno. Adicionalmente, son obras inmediatas a lugares de almacenamiento de sustancias altamente inflamables por lo tanto las medidas deben ser primordialmente de materiales no inflamables. De tal manera que se descarta la implementación de prácticas vegetativas.

En la Tabla 4.30 se encuentra la ficha técnica de selección de prácticas en los diques de almacenamiento de la Refinería Amuay

4.7.3 Prácticas para el control de erosión y otros procesos de degradación en los taludes perimetrales de la Refinería Amuay.

Los taludes de la Refinería Amuay presentan estados de erosión hídrica más avanzada, teniendo mayor presencia la erosión en surcos seguida por la de cárcavas. Los procesos de afectación se acentúan en los taludes que se encuentran hacia el noroeste el contacto con la Bahía de Amuay, lo cual guarda relación con el cambio de pendiente que marca la transición de las zonas relativamente planas donde se ubican las unidades de procesos hacia pendientes escarpadas que rodean el perímetro de la refinería y las piscinas de tratamientos de residuos. Estas áreas se encuentran distanciadas de los patios de almacenamiento por lo tanto podrían tener flexibilidad para la implementación de medidas vegetativas siempre y cuando sean de porte bajo y posean buena adaptación a las condiciones del medio.

En este contexto la erosión en los taludes ocurre por la pérdida de la capa superficial que genera la inestabilidad de los materiales, modificación morfológica del suelo que supera el ángulo de fricción del material presente y disminución de la tasa de infiltración por procesos de compactación. Para dar solución a los procesos de erosión identificados por Semprun (2017) se sugieren prácticas de modificación de la pendiente, protección superficial, así como también estabilización y control de sedimentos. En la Tabla 4.31 se muestra la ficha de evaluación técnica con las medidas seleccionadas a partir de la metodología diseñada y según el tipo de erosión a controlar.

Tabla 4.30. Ficha técnica para la selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en los diques de los patios de almacenamiento de la Refinería Amuay.

Selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en proyectos de refinerías de petróleo					
1. Identificación y caracterización del problema:					
Fase del proyecto		Fase de erosión		Otros procesos de erosión o degradación:	
☐ Trabajos preliminares		☒ Laminar			
☐ Construcción		☒ Surcos			
☒ Operación y mantenimiento		☐ Cárcava			
Áreas afectadas: Diques de los patios de almacenamiento					
Impactos sobre el suelo asociados: Erosión pluvial por pérdida de la capa superficial del suelo acarreado irregularidades sobre el terreno que pueden progresar a fases de erosión más avanzadas					
2. Selección y evaluación de la(s) práctica(s):					
Tipo de práctica(s) requerida(s):					
☐ Control de agua superficial y subterránea		☒ Control de sedimentos		☒ Estabilización ☐ Remediación	
Descripción de la(s) práctica(s) (nombre(s), propósito y método de aplicación):					
1. Conformación del terreno: nivelación del terreno. 2. Revestimiento con geomantas: protección de la superficie. 3. Revestimiento con geoceldas rellenas de grava: reforzar la estabilidad y drenar el agua de escorrentía. 4. Revestimiento con sacos rellenos: proteger de la socavación y mejorar la estabilidad. 5. Adoquines articulados de concreto o geopolímeros: reforzar la estabilidad de los materiales del dique y proteger el terreno					
Juicio(s) de valor de la(s) práctica(s) según factores de selección					
Factor de Selección	Juicio de valor para la práctica (Puntuación 1- 4)				
	1	2	3	4	5
Efectividad de la práctica en el control de erosión y/o degradación	2	4	4		4
Beneficios a largo plazo	1	3	4	2	4
Tipo de tecnología y mano de obra requerida	4	3	3	4	2
Disponibilidad de materiales e insumos	4	3	3	4	3
Periodicidad y costo de mantenimiento	1	4	4	2	4
Inflamabilidad de materiales	4	2	2	4	4
Puntaje Total	16	19	20	19	21
Clasificación de la(s) práctica(s): Adecuada y Muy adecuadas					

Tabla 4.31. Ficha técnica para la selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en los taludes perimetrales de los patios de almacenamiento de la Refinería Amuay.

Selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en proyectos de refinerías de petróleo						
1. Identificación y caracterización del problema:						
Fase del proyecto		Fase de erosión		Otros procesos de erosión o degradación:		
☐ Trabajos preliminares		☐ Laminar				
☐ Construcción		☒ Surcos				
☒ Operación y mantenimiento		☒ Cárcava				
Áreas afectadas:						
Taludes perimetrales de la refinería						
Impactos sobre el suelo asociados:						
Erosión concentrada en cárcavas y surcos al acentuarse la exposición del suelo por pérdida de la capa superficial.						
2. Selección y evaluación de la(s) práctica(s):						
Tipo de práctica(s) requerida(s):						
☒ Control de agua superficial y subterránea	☒ Control de sedimentos	☒ Estabilización	☐ Remediación			
Descripción de la(s) práctica(s) (nombre(s), propósito y método de aplicación):						
1. Bermas: captura de sedimentos, adaptabilidad como canal de escorrentía. 2. Canales desviadores de flujo: desvío de escorrentía 3. Barreras de piedra intercaladas con gramíneas: captura de sedimentos y protección de la superficie. 4. Revestimiento lineal con neumáticos: captura de sedimentos y reducción de velocidad de flujo 5. Tratamiento lineal con sacos rellenos de tierra o concreto: direccionar la escorrentía hacia los canales. 6. Flexocretos: captura de agua, aumento de la estabilidad del talud						
Juicio(s) de valor de la(s) práctica(s) según factores de selección						
Factor de Selección	Juicio de valor para la práctica (Puntuación 1- 4)					
	1	2	3	4	5	6
Efectividad de la práctica en el control de erosión y/o degradación	3	3	3	2	2	4
Beneficios a largo plazo	2	2	3	3	2	4
Tipo de tecnología y mano de obra requerida	4	4	4	3	4	1
Disponibilidad de materiales e insumos	4	4	4	3	4	1
Periodicidad y costo de mantenimiento	2	2	3	2	2	4
Inflamabilidad de materiales	4	4	2	1	4	4
Puntaje Total	19	19	19	14	18	18
Clasificación de la(s) práctica(s): Adecuadas y Muy adecuadas						

Las medidas antes expuestas tienen carácter de implementación a lo largo de la superficie del talud, bien sea de forma continua o por intervalos según la inclinación del talud. Sin embargo, mediante el estudio de Semprun (2017), se han identificado procesos de socavación en la base de los taludes, por lo tanto, se distinguen las siguientes técnicas para la protección específica de las bases (Tabla 4.32):

Tabla 4.32. Para la selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en bases de taludes de la Refinería Amuay.

Selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en proyectos de refinerías			
1. Identificación y caracterización del problema:			
Fase del proyecto	Fase de erosión	Otros procesos de erosión o degradación:	
☐ Trabajos preliminares	☐ Laminar	Procesos de socavación concentrada en las bases de los taludes	
☐ Construcción	☒ Surcos		
☒ Operación y mantenimiento	☒ Cárcava		
Áreas afectadas: Bases de taludes de la refinería con énfasis los de contacto con la Bahía Amuay			
Impactos sobre el suelo asociados a la erosión hídrica: Movimientos de masa tipo derrumbes, coladas de barro y deslizamientos debido a la socavación de bases de taludes			
2. Selección y evaluación de la(s) práctica(s):			
Tipo de práctica(s) requerida(s):			
☐ Control de agua superficial y subterránea	☒ Control de sedimentos	☐ Estabilización	☐ Remediación
Descripción de la(s) práctica(s) (nombre(s), propósito y método de aplicación):			
Muro de sacos rellenos de tierra: modera el impacto lateral del agua, refuerza el área de contacto de la base del talud con el drenaje de agua, estabiliza el contenido del material. Geocolchones: modera el impacto lateral del agua, refuerza el área de contacto de la base del talud con el drenaje de agua, estabiliza el contenido del material.			
Juicio(s) de valor de la(s) práctica(s) según factores de selección			
Factor de Selección	Juicio de valor para la práctica (Puntuación 1- 4)		
	1	2	
Efectividad de la práctica en el control de erosión y/o degradación	3	4	
Beneficios a largo plazo	2	4	
Tipo de tecnología y mano de obra requerida	4	2	
Disponibilidad de materiales e insumos	4	3	
Periodicidad y costo de mantenimiento	2	4	
Inflamabilidad de materiales	4	4	
Puntaje Total	19	21	
Clasificación de la(s) práctica(s): Adecuadas y Muy adecuadas			

Finalmente, Semprun (2017) tipificó procesos de erosión de cárcavas alrededor de algunos taludes y en las proximidades piscinas de tratamiento de residuos, esto guarda sentido con los impactos identificados en la revisión ambiental de este estudio. La ubicación de cárcavas coincide con las zonas de cambios abruptos de pendiente y los canales de desahogo que dirigen en este caso el agua de escorrentía en dirección hacia la bahía. Asumiendo que se hallan implementado las medidas de control antes descritas que se encargan de proteger la superficie y canalizar el agua de escorrentía el siguiente paso sería aplicar medidas de control en las cárcavas para frenar su crecimiento, para ello se seleccionan las prácticas encontradas en la Tabla 4.33:

Tabla 4.33. Ficha técnica para la selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en taludes y proximidades a las piscinas de tratamiento de residuos de la Refinería Amuay.

Selección de prácticas de control de erosión hídrica y otros procesos de degradación del suelo en proyectos de refinerías			
1. Identificación y caracterización del problema:			
Fase del proyecto	Fase de erosión	Otros procesos de erosión o degradación:	
☐ Trabajos preliminares	☐ Laminar		
☐ Construcción	☐ Surcos		
☒ Operación y mantenimiento	☒ Cárcava		
Áreas afectadas:			
Taludes y proximidades a las piscinas de tratamiento de residuos de la refinería			
Impactos sobre el suelo asociados a la erosión hídrica:			
Erosión concentrada en cárcavas y surcos al acentuarse la exposición del suelo en las zonas excavadas y/o canales de desahogo desprotegidos, así como también instalaciones lineales o taludes expuestos.			
2. Selección y evaluación de la(s) práctica(s):			
Tipo de práctica(s) requerida(s):			
☐ Control de agua superficial y subterránea	☒ Control de sedimentos	☒ Estabilización	☐ Remediación
Descripción de la(s) práctica(s) (nombre(s), propósito y método de aplicación):			
1. Suavización interna de las paredes de la cárcava: mejores las condiciones internas reduciendo la remoción de material 2. Atagüía de malla metálica, piedra o geotextil: captura las partículas transportadas, protege la cárcava del aporte de sedimentos, desvía cierta parte de la escorrentía que entra a la cárcava. 3. Presas de contención: captura parte de los sedimentos desplazados y reduce la velocidad de escorrentía interna disminuyendo el poder abrasivo sobre la superficie.			
Juicio(s) de valor de la(s) práctica(s) según factores de selección			
Factor de Selección	Juicio de valor para la práctica (Puntuación 1- 4)		
	1	2	3
Efectividad de la práctica en el control de erosión y/o degradación	3	4	4
Beneficios a largo plazo	2	2	4
Tipo de tecnología y mano de obra requerida	4	3	2
Disponibilidad de materiales e insumos	4	4	3
Periodicidad y costo de mantenimiento	2	2	3
Inflamabilidad de materiales	4	4	4
Puntaje Total	19	19	20
Clasificación de la(s) práctica(s): Muy adecuadas			

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.

El desarrollo de la investigación permitió identificar las actividades que dentro de los proyectos de refinación de petróleo son capaces de desencadenar procesos de erosión hídrica concentrada y otros procesos de degradación asociados. Al respecto, también fue posible establecer las zonas afectadas por dichos procesos entre ellas los caminos de acceso, patios de tanques de almacenamiento, taludes generados por extracción de material de préstamo, taludes y laderas del área de implantación y zona de almacenamiento de residuos.

Asimismo, definir los impactos ambientales sobre el recurso suelo a través de las etapas de trabajos preliminares, construcción y operación; dio lugar a la consideración de todos los escenarios posibles, sin dejar de lado ninguna actividad previa o futura con potencial de generar daños. Como resultado se consiguieron ocho (8) impactos ambientales primarios con posibilidades de generar erosión del suelo y quince (15) impactos secundarios. En este sentido, la jerarquización usando la Matriz de Evaluación Rápida de Impacto RIAM definió según el rango los impactos con mayor requerimiento de control consiguiendo tres (3) impactos de rango –A, doce (12) de rango -B, siete (7) de rango –C y dos (2) de rango –D. Siendo los impactos de tipo –C y –D los de mayor demanda de atender.

Por otra parte, la revisión ambiental realizada sobre el recurso suelo logró identificar múltiples amenazas además de la erosión hídrica, procesos de degradación como: contaminación, sellado, compactación y anegamiento. Juntas constituyen cinco de las diez amenazas señaladas por FAO (2017) que entorpecen la consecución de la gestión sostenible de los suelos. Tomando en consideración la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible; la gestión sostenible del suelo puede ser una herramienta fundamental para alcanzar varios de los objetivos del desarrollo sostenible, destacando así la adaptación al cambio climático, combatir la desertificación y protección de los servicios ecosistémicos. Esto permite entender con mayor veracidad la relevancia de este estudio. En este contexto, reducir al mínimo la erosión del suelo es de carácter prioritario no solo en las zonas agrícolas, también lo es en todas aquellas áreas intervenidas por proyectos con actividades capaces de desencadenar degradación. En este caso la industria petrolera supone la principal actividad económica del país y por tanto tiene potencial de generar mayores perturbaciones al suelo. Entender que la preservación de la calidad del suelo es asegurar sus servicios ecosistémicos y en consecuencia el resguardo de la calidad de vida en el planeta, es la pieza principal en una transición energética sostenible.

En otro orden de ideas, para la caracterización de los escenarios de riesgos socio naturales y tecnológicos se obtuvo la relevancia de plantear medidas de control de erosión hídrica y degradación del suelo en los proyectos de refinación petrolera, evidenciando la relación de los procesos de erosión y degradación con una cantidad elevada de riesgos como incendios, explosiones, contaminación por fugas de sustancias tóxicas al igual que reducción de la operatividad y aún más grave pérdida de vidas humanas. El análisis de los riesgos tecnológicos, tal como se refleja en los resultados de su valoración, los riesgos se ubican entre puntajes de seis (6) a dieciséis (16) pasando entonces de una escala de riesgos tolerables a críticos.

El hecho de que el declive de la estructura, el colapso, el fracturamiento o sepultamiento de tanques y unidades de procesos, el hundimiento de bases de los elementos estructurales y la exposición de tapadas de seguridad se hayan posicionado como los

escenarios de mayor riesgo con factores de riesgo entre doce (12) y dieciséis (16) puntos, demuestra que la falta de atención al manejo del recurso suelo no es un problema estético o superficial, sino una vulnerabilidad que puede desencadenar fallas catastróficas en los componentes más vitales de la refinería. Este hecho trasciende lo meramente ambiental para incidir directamente en la seguridad operativa y la integridad de los activos.

La metodología de valoración de riesgos tecnológicos, al categorizar estos eventos como "críticos" (valores de diez (10) a veinte (20) puntos de factor de riesgo), proporciona un marco objetivo para la toma de decisiones. En este sentido, el trabajo no solo identifica el problema, sino que también ofrece una herramienta de gestión estratégica que permite a la industria del petróleo pasar de un enfoque reactivo a uno proactivo y preventivo en la gestión de sus riesgos ambientales y operacionales. La vinculación directa entre la afectación del suelo y la integridad estructural de la refinería constituye un aporte fundamental a la comprensión de la vulnerabilidad en este tipo de instalaciones.

En cuanto a la revisión de las prácticas de control de erosión y degradación del suelo para proyectos de distinta naturaleza, fueron consultados proyectos de minería de lignito, níquel y plata, proyectos de producción de petróleo y gas asociado, proyectos de construcción de vías férreas, además de proyectos de aprovechamiento agrícola y ganadero. Así pues, se adquirió un amplio panorama de las técnicas implementadas según el tipo de problema a contener. En efecto, el reconocimiento de las prácticas permitió reclasificarlas en cuatro grupos de acuerdo a funcionamiento. En primer lugar, las prácticas del control de agua de escorrentía y subterránea, seguido de las prácticas de protección de la superficie del suelo, luego se encuentran las prácticas de estabilización de terreno y finalmente las prácticas dirigidas a la remediación del suelo. Esto deja ver claramente que los problemas de erosión hídrica y degradación tienen su raíz de tratamiento en manejar el agua que produce el desprendimiento y transporte de partículas del suelo, además en proteger la superficie del terreno y en último término en estabilizar las zonas que ya se encuentran deterioradas. No obstante, las medidas de remediación fueron especialmente incluidas debido a las sustancias contaminantes manejadas en las refinerías, ya que las fugas o vertido de las mismas sobre el terreno tiene el potencial de desatar procesos de erosión.

En el mismo orden de ideas, dentro de las medidas propuestas en los proyectos revisados para el control de erosión y otros procesos de degradación del suelo, destacaron por su efectividad las técnicas mixtas o de bioingeniería pues, estas permiten implantar obras con más solides. En el caso de las vegetativas ofrecen mayores beneficios a largo plazo. Sin embargo, dadas las restricciones de su uso en proyectos de refinación al ser consideradas como material inflamable, podría alcanzarse un excelente equilibrio entre las ventajas y el control de riesgo con la siembra de gramíneas de porte bajo, en las cuales el volumen de materia vegetal no representa material combustible significativo.

Otro aspecto a destacar es que la ejecución de cualquier práctica de control de erosión y degradación va más allá del diseño de obras físicas o vegetativas. En tal sentido, las características de la zona determinan el comportamiento del agua superficial y subterránea, así como también la susceptibilidad al desprendimiento de partículas del suelo según sus propiedades físico químicas. En consecuencia, la investigación logró establecer como factores condicionantes ante la selección de prácticas el tipo de suelo, clima y topografía. Con esto es posible adecuar las prácticas para cada proyecto especial de refinerías de petróleo sin discriminar el área donde el mismo se establezca.

Respecto a la verificación de los factores de selección para las prácticas de control a juicio de experto, es necesario resaltar que el establecimiento de los factores de selección

constituyó una pieza indispensable para el diseño de la metodología propuesta en este trabajo. En consecuencia, tuvo un rol fundamental al momento de escoger medidas realmente ajustadas a las condiciones de las refinerías. Para conocer la opinión de los expertos se empleó la matriz de comparación por pares con diez (10) criterios a evaluar. De los diez (10) factores planteados, los cinco (5) con mayor ponderación se contrastaron en cada una de las prácticas propuestas dentro de la metodología diseñada. Se incluyó también la inflamabilidad de los materiales empleados pues como se expuso, establece un elemento de restricción dentro de los proyectos de refinación. De esta forma, se generó una metodología avocada en prevenir y mitigar la erosión hídrica y algunos procesos de degradación, pero teniendo en cuenta en todo momento los criterios fundamentales para una implementación exitosa.

Por otra parte, la evaluación aplicada a través de una matriz de comparación por pares con la participación de un panel multidisciplinario de especialistas, permitió ponderar de manera objetiva la relevancia de cada criterio, superando la subjetividad inherente a la toma de decisiones basada únicamente en la intuición.

Los resultados demostraron una clara jerarquía en los criterios de selección. La efectividad de la práctica en el control de la erosión y/o degradación se posicionó como el factor de mayor peso (16,89 %), lo que confirma su rol como condición primaria para cualquier solución técnica viable. En un segundo nivel de preponderancia, se ubicaron los beneficios a largo plazo de las prácticas (12,89 %), subrayando la importancia de trascender la mitigación inmediata para considerar la sostenibilidad ambiental del proyecto. De manera equiparable en valor (12,44 %), los expertos destacaron la disponibilidad de materiales e insumos y el tipo de tecnología y mano de obra requerida, lo que evidencia una correlación directa entre los factores operativos y logísticos, y la viabilidad de la implementación de una práctica en el contexto específico de un proyecto de refinación.

Este procedimiento aseguró que la metodología de selección no solo atendiera la demanda de control de la erosión hídrica y otros procesos de degradación asociados, sino que también se adapte a las particularidades del escenario en el que será aplicada, priorizando soluciones que sean técnica y logísticamente superiores en función de los criterios más relevantes para el contexto petrolero.

Adicionalmente, a partir de la estimación de las prácticas de control mediante el sistema de juicios de valor, se ha logrado establecer una jerarquía de idoneidad para las distintas técnicas en el contexto de proyectos de refinación petrolera. Este análisis, al someter cada práctica a una escala de puntuación objetiva según los factores de selección previamente ponderados, valida la metodología y la traslada del plano teórico al práctico, brindando un criterio sólido para la toma de decisiones.

Los resultados de la evaluación demuestran que las soluciones de mayor valor son aquellas que no solo son técnicamente eficaces, sino que también se caracterizan por su viabilidad operativa y sostenibilidad a largo plazo. En la fase de trabajos preliminares, prácticas como las barreras de piedras intercaladas con gramíneas, los badenes y la reconstitución de la red de drenajes original obtuvieron las puntuaciones más altas. Esto se debe a que, si bien son efectivas en la mitigación de la erosión, se benefician de la simplicidad tecnológica y la alta disponibilidad de materiales, lo que facilita su implementación y mantenimiento en el complejo industrial.

En la fase de construcción, la práctica de supervisión del manejo y almacenamiento de materiales se destacó como la de mayor relevancia, alcanzando el puntaje más alto del

estudio. Este hallazgo subraya que las medidas de tipo gerencial y de proceso tienen un impacto crítico y sostenido en el control de la erosión. De igual manera, los adoquines articulados obtuvieron una alta valoración por su efectividad, durabilidad y bajos requerimientos de mantenimiento, destacándose como una solución robusta y de largo plazo.

Para la fase de operación y mantenimiento, las cubiertas con asfalto y concreto demostraron ser una opción muy adecuada por su alta efectividad y vida útil, mientras que las medidas de educación y sensibilización ambiental obtuvieron una puntuación igualmente elevada. Esto último confirma que la gestión del conocimiento y la concientización del personal son factores determinantes que contribuyen a la viabilidad, sostenibilidad y éxito del control de la erosión a largo plazo en este tipo de entornos.

En conclusión, la metodología de juicios de valor valida que las soluciones de mayor idoneidad no son necesariamente las más complejas o costosas, sino aquellas que logran un equilibrio entre la efectividad técnica, la disponibilidad de recursos y los beneficios a largo plazo, incluyendo la reducción de riesgos y la armonización con el entorno.

A partir de la aplicación de la metodología al caso de estudio de la Refinería Amuay, se consiguió corroborar las afectaciones sobre el recurso suelo asociadas a los procesos de erosión hídrica, que fueron identificados en la revisión ambiental del trabajo. Al momento de emplear la metodología propuesta se consideró en primer lugar los factores de selección establecidos para las prácticas, caracterizando el área de estudio en cuanto al tipo de suelo, clima, geomorfología y precipitación. Posteriormente, según los tipos de erosión hídrica y degradación asociada del suelo detectada en las áreas de la Refinería Amuay se ajustaron las medidas más idóneas de acuerdo a los criterios relevantes según los expertos. En este sentido, se destaca que los requerimientos de control de erosión en Amuay logran ser cubiertos con las prácticas propuestas dentro de la metodología diseñada. Como resultado se alcanza validar el cumplimiento de los objetivos planteados para la investigación. Asimismo, considerando que el norte del territorio de Venezuela representa las áreas con mayor incremento de temperatura, puede tomarse entonces la inflamabilidad como un factor común y adoptar esta metodología en distintos proyectos socioproduktivos en las zonas costeras; ejecutando previamente la evaluación de riesgos tecnológicos y de impacto ambiental sobre el recurso suelo.

La investigación logró analizar los distintos escenarios a lo largo de la vida del proyecto donde la erosión hídrica y la degradación del suelo podría tener lugar y proponer prácticas de control desde las fases preventivas hasta aquellas donde se requiere mitigar y posteriormente supervisar su funcionamiento. No obstante, el aspecto fundamental del éxito de cualquier práctica dependerá de la participación de la empresa o institución, comenzando por el personal que hace vida dentro de ella, seguido de la gerencia encargada de la supervisión ambiental y monitoreo.

5.1 RECOMENDACIONES.

Finalmente, a partir de lo evidenciado en los resultados del presente trabajo se proponen las siguientes recomendaciones:

- Aplicar la metodología diseñada en otros casos de estudios para corroborar la flexibilidad de adaptación de las prácticas en escenarios de refinerías con condiciones variables.

- Actualizar los datos de erosión hídrica dentro de la Refinería Amuay dado que el estudio empleado corresponde a 2017, periodo desde el cual los procesos de erosión pudieron intensificarse, generando otros aspectos importantes a controlar.
- Ejecutar levantamiento de información de campo detallada en la Refinería Amuay que incluya dimensiones específicas de taludes afectados, diques y cárcavas; a fin de diseñar con exactitud las prácticas propuestas.
- Realizar estudios de investigación relacionados a las especies vegetativas de gramíneas de porte bajo con capacidad de adaptación a las condiciones de la Refinería de Amuay con el objeto de reforzar su uso dentro de las medidas de bioingeniería, considerando su densidad de crecimiento respecto al volumen de material inflamable representado. Se sugiere además establecer perímetros de riegos de incendio dentro de la refinería para delimitar zonas favorables para su implementación.
- Implementar las prácticas de control de erosión sugeridas para la refinería junto al desarrollo de un plan de seguimiento que permita y medir su efectividad.
- Ampliar el análisis de erosión hídrica del suelo a todo el Complejo Refinador de Petróleo Amuay, con el fin de tipificar la erosión y degradación del suelo y desarrollar un programa de implementación de prácticas que funcionen de manera articulada y controle efectivamente los procesos de degradación.

www.bdigital.ula.ve

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

Agencias de Recursos Verdes del Japón. (2004). *Manual de técnicas, Estrategias de intervención: "Desarrollo rural sostenible, basado en la conservación de suelos y aguas"*. Serie "Guías y Manuales". J-Green, Equipo de Proyecto JALDA. <https://www.iircas.go.jp/sites/default/files/publication/green/green-51.pdf>

Amanco Geosintéticos. (2018). *Biotechnología, Control de erosión y sedimentos: funciones y aplicaciones*. Mexichem soluciones integrales. <https://amancowavingeosinteticos.com/wp-content/uploads/2018/09/controldeerosion.pdf>

Carrillo, R., & González, M. (2009). La nanotecnología en la agricultura y rehabilitación de suelos contaminados. *Mundo Nano*, 2(2). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-56912009000200050

CEPAL. (2004a). *Convenio de Estocolmo Sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes*. <https://observatoriop10.cepal.org/es/tratados/convenio-estocolmo-contaminantes-organicos-persistentes>

CEPAL. (2004b). *Convenio de Rotterdam Para la Aplicación del Procedimiento de Consentimiento Fundamentado Previo a Ciertos Plaguicidas y Productos Químicos Peligrosos*. <https://observatoriop10.cepal.org/es/tratados/convenio-rotterdam-la-aplicacion-procedimiento-consentimiento-fundamentado-previo-ciertos>

CEPAL. (2005). *Protocolo de Kyoto, de la Convención Marco Sobre el Cambio Climático*. Recuperado de <https://observatoriop10.cepal.org/es/tratados/protocolo-kyoto-la-convencion-marco-cambio-climatico>

Constitución de la República Bolivariana de Venezuela. (1999). *Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela*, 5453.

Coria, I. (2007). *Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos* [Tesis de especialización, Universidad Abierta Interamericana]. <https://sustentabilidad.uai.edu.ar/pdf/ing/UAIS-IGA-600-001%20-%20Remediacion.pdf>

Cruz Roja Hondureña, & Cruz Roja Suiza. (2008). *Manual de Bioingeniería*. Proyecto: Fortalecimiento de la gestión del riesgo en el Municipio de Dulce de Culmí, Olancho. <https://www.unisdr.org/files/globalplatform/591d932973b10CRS-CRH-Manual-de-Bioingenieria-2013.pdf>

Cubero, D. (1995). *Manual de manejo y conservación de suelos y aguas*. Ministerio de agricultura y Ganadería.

Damiano, Y., & Pérez, M. (2022). *Análisis de la estabilización química con polímeros para el mejoramiento del camino vecinal Empalme AP-679 al AP-659 Lliupapuquio – Apurímac, 2022* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional.

https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/86115/Damiano_QY-P%c3%a8rez_SM-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Díaz, C. (2011). Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización. *Ingeniería e Investigación*, 31(3), 80-90. <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v31n3/v31n3a09.pdf>

Díaz, M. (2022). *Aplicación de nanotecnología para remediación de suelos contaminados por hidrocarburos* [Tesis de maestría, Fundación Universidad de América]. Repositorio Institucional. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8956/1/537840-2022-1-GA.pdf>

FAO y GTIS. (2016). *Estado mundial del recurso suelo (SWSR) – Resumen ejecutivo*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo. <https://www.fao.org/3/i5199s/i5199s.pdf>

Flores, M., Torras, S., & Téllez, R. (2004). *Medidas de mitigación para uso de suelos contaminados por derrames de hidrocarburos en infraestructura de transporte terrestre*. Instituto Mexicano del Transporte. <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt257.pdf>

Francke, S., Vargas, R., Torugawa, K., & Makita, M. (2004). *Manual de Control de Erosión*. Ministerio de Agricultura, Corporación Nacional Forestal.

Gobierno de la República del Ecuador. (2017). *Moderno sistema de control de erosión se implementa en Zamora Chinchipe*. <https://historico.mineria.gob.ec/moderno-sistema-de-control-de-erosion-se-implementa-en-zamora-chinchipe/>

Guardia, E. (2015). *Estabilización de suelos con polímeros*. Universidad de Lima. https://www.ageecovias.net/files/PLANTILLA_EXPOSICIONES_ULIMA19.pdf

Hernández, T., & Guardado, R. (2014). Control de erosión mediante bioingeniería en presas de colas de la industria del níquel. *Minería y Geología*, 30(4), 55-69. <https://www.redalyc.org/pdf/2235/223533734004.pdf>

Instituto Nacional de Estadística. (2011). *Informe Geoambiental 2011 Estado Falcón*. Gerencia de Estadísticas Ambientales.

López, G., & Tobías, H. (2013). *Nanotecnología aplicada a la estabilización de suelos: desempeño técnico*. Simposio internacional sobre materiales lignocelulíticos. https://www.academia.edu/25744816/NANOTECNOLOGIA_APLICADA_A_LA_ESTABILIZACION_DE_SUELOS_DESEMPEÑO_TÉCNICO

López, J. (1989). Control de erosión y contaminación de las aguas de explotación de Lignitos de Meirama. *Cuaderni Lab. Xeolóxico de Laxe Coruña*, 14, 213-224. <https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/6052/CA-14-16.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

López, R. (2002). *Degradación del suelo causas, procesos evaluación e investigación*. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental Y Territorial.

Márquez, K. (2015). *Evaluación de Impacto Ambiental*. Centro Interamericano de desarrollo e investigación ambiental y territorial.

Márquez, K., & Pérez, R. (2013). *Guía Práctica para la evaluación de impacto ambiental, en Venezuela*. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental Y Territorial.

Márquez, K., Ravanal, M., & Gamez, L. (2017). *Documento de Respuesta a las Observaciones del EIASC del Proyecto construcción de viviendas "Complejo Habitacional Terrazas del Ángel*.

Mejía, H. (2022). *Estabilización de talud con asfalto líquido RC-250 en la localidad de la Victoria – Distrito de Santa Rosa - Ayacucho* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Los Andes]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/5287?locale-attribute=en>

Ministerio de Energía y Minas de la República del Perú. (2023). *Guía ambiental para la restauración de suelos en instalaciones de refinación y producción petrolera*. Dirección General de Asuntos Ambientales. <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/4861194-guia-ambiental-para-la-restauracion-de-suelos-en-instalaciones-de-refinacion-y-produccion-petrolera>

Nápoles, J., Abalos, A., Marañón, A., Aguilera, I., & Cumbá, F. (2005). Caracterización de Suelos de la Refinería "Hermanos Díaz" Impactados con Hidrocarburos. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181620511029>

Navarro, J. (2004). *Control de erosión en desmontes originados por obras de infraestructura viaria: Aplicación al entorno de Palencia Capital* [Tesis de maestría, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes]. <https://oa.upm.es/639/1/07200212.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Proyecto FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b54d0348-dfce-413c-bd5d-142b3a14a049/content>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2017). *Directrices voluntarias para la gestión sostenible de los suelos*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/179f619e-2ec3-49f5-b9a4-67a47bdbfdfb/content>

Pando, M., Gutiérrez, M., Maldonado, A., Palacio, J., & Estrada, E. (2003). Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, (51), 23-36. <https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n51/n51a3.pdf>

PDVSA. (2016). *Reservas de Petróleo*. http://www.pdvsa.com/index.php?option=com_content&view=article&id=8827&Itemid=1196&lang=es

PlaniGestión. (2016). *Listado de Legislación Ambiental Venezolana, un apoyo para mejorar el desempeño Ambiental*.
https://planigestion.com/Documentos/PlaniGestion_Listado_Legislacion_Ambiental.pdf

Portocarrero, J., & Reynel, C. (2021). Control de erosión durante la construcción de proyectos mineros – estudio de caso. *Revista Ciencia y Práctica*, 1(1), 36.
https://www.researchgate.net/publication/349873288_Control_de_erosion_durante_la_construccion_de_proyectos_mineros_-_estudio_de_caso

Ramírez, E., Miuzzi, M., & Dos Santos, P. (2020). *Control de erosión superficial en planta de beneficio empleando Geomanta Tridimensional Reforzada*. Trabajo presentado en GeoAmericas 2020. <https://www.mittetecnologia.com.br/anais/geoAmericas/resumos/PPT-eposter-trab-aceito-0117-1.pdf>

Ramos, J., & Zamora, A. (2010). Las actividades de la industria petrolera y el marco ambiental legal en Venezuela: una visión crítica de su efectividad. *Revista Geográfica Venezolana*, 51(1), 117.
https://www.researchgate.net/publication/272492655_Las_actividades_de_la_industria_petrolera_y_el_marco_ambiental_legal_en_Venezuela_una_vision_critica_de_su_efectividad

Rivas, J. (2016). *Distribución espacial del riesgo de degradación de los suelos por erosión hídrica en la Península de Paraguaná, Estado Falcón*. Venezuela [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes].

Rodríguez, H. (2007). *Informe final del Proyecto CJ068 Recuperación y conservación de suelos mediante presas de control de azolves, en la cuenca de Burgos* [Informe técnico, Universidad Autónoma de Tamaulipas].
<https://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/infCJ068.pdf>

Rodríguez, I. (2013). *Reciclado en suelos de lodos de refinería: nuevas aproximaciones para la biodegradación de hidrocarburos mediante el manejo de enmiendas orgánicas* [Tesis de doctorado, Universidad de Murcia]. Repositorio Institucional.
<https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/128510/TIRA.pdf?sequence=1>

Romero, J., & Rivera, A. (2020). La hidrosiembra, técnica de bioingeniería para la restauración de suelos producto de actividades mineras: experiencia en el proyecto minero mirador, Zamora Chinchipe - Ecuador. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 5(1), 11-21.
http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522020000100002&lng=es&tlng=es.

Ruiz, R. (2014). *Control de erosión en áreas de producción petrolera con proceso de evaluación de metodologías de control en el Lote 121 sector sur de la zona del Río Napo Loreto - Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de la Amazonia Peruana]. Repositorio Institucional.
https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12737/4318/Rodrigo_Tesis_Titulo_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Semprum, A. (2017). *Caracterización de los procesos de erosión hídrica en diques y taludes en la Refinería De Amuay del Complejo de Refinación Paraguaná PDVSA* [Tesis de pregrado, Universidad de Los Andes].

Sierra, J. (2021). *Biorremediación por landfarming de suelos contaminados por hidrocarburos* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio Institucional.

<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/42658/jssierrago.pdf?sequence=1&jsAllowed=y>

Stolpe, N. (2005). *Clasificaciones interpretativas del suelo*. Departamento de Suelos, Facultad de Agronomía.

Trimarchi, Y. (2018). *Procedimiento para la zonificación de sensibilidad sísmica. Caso de estudio: área del Municipio Libertador del estado Mérida* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes].

Vargas, G. (2020). *Impactos ambientales de la producción petrolera en Colombia y su relación con la innovación tecnológica en los últimos quince años* [Tesis de especialización, Fundación Universidad de América]. Repositorio Institucional. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7843/1/463974-2020-I-GA.pdf>

Vidal, R. (2017). *Manual de Bioingeniería*. PDVSA, Fundación Instituto Nacional Latinoamericano IFLA.

www.bdigital.ula.ve

APÉNDICES.

A: Proyectos y manuales consultados nacionales e internacionales para la revisión de prácticas de control de erosión hídrica en proyectos de distinta naturaleza

B: Prácticas de control de erosión hídrica para la etapa de trabajos preliminares en proyectos de refinación petrolera

C: Prácticas de control de erosión hídrica para la etapa de construcción en proyectos de refinación petrolera.

D: Prácticas de control de erosión hídrica para la etapa de operación y mantenimiento en proyectos de refinación petrolera

www.bdigital.ula.ve

Apéndice A.

Proyectos y manuales consultados nacionales e internacionales para la revisión de prácticas de control de erosión hídrica en proyectos de distinta naturaleza.

A.1 Control de erosión durante la construcción de proyectos mineros- estudio de caso Conococha, Antamina, Perú (2021).

Los trabajos de control de erosión y estabilidad superficial de suelos se llevaron a cabo durante las actividades de operación de la carretera Conococha Antamina, su objetivo fue evitar que los sedimentos generados por el arrastre de la escorrentía superficial afectaran la calidad del agua de la laguna Canrash. Se realizó ponderación cualitativa tomando en cuenta: costo de instalación, costo de operación, volumen de equipo a transportar o instalar, personal requerido, tiempo de Instalación y disponibilidad en Perú. En la Tabla A.1 se encuentran las prácticas empleadas:

Tabla A.1. Prácticas de control de erosión estudio de caso Conococha, Antamina, Perú.

	Prácticas empleadas	Objetivos	Observaciones
Tipo de Proyecto: Minero (Lignito)	Muros de rocas los taludes de relleno.	Facilitar la estabilidad superficial en los taludes y disminuir la velocidad de escorrentía.	Se determina la revegetación manual como opción más económica y las demás con costos elevados, siendo la hidrosiembra la que requiere menor tiempo de supervisión.
	Revegetación del talud manual y por hidrosiembra de pastos nativos e introducidos.	Mejorar la estabilidad superficial en los taludes con pendiente moderada.	
	Instalación de estructuras de sedimentación y mantas en la superficie: biomantas y bermas de drenaje.	Canalización del flujo de aguas procedentes de talud hacia pozas de sedimentación. Protección superficial del talud de relleno.	
	Floculantes y coagulantes.	Mejorar la eficiencia de las pozas de sedimentación con sedimentos menores a 10 micras.	

Fuente: Elaboración propia.

A.2. Control de la erosión y contaminación de las aguas en la explotación de lignitos de Meirama, España (1989).

El proyecto contempló la necesidad de restaurar los terrenos afectados por la minería de carbón a cielo abierto, en la cual se construyen con frecuencias taludes que pueden ser rápidamente erosionados produciendo una gran cantidad de sedimentos. Para la explotación de lignito en el yacimiento de la cuenca de Meirama fue necesaria la excavación de arcilla y lignito y la movilización del material en cintas transportadoras. Adicionalmente, la morfología del yacimiento obligó a disponer de una escombrera interior para verter los estériles transportados por los volquetes; además de otra escombrera exterior a unos 3,5 km de la explotación, para los materiales transportados por cinta: arcillas y esquistos triturados. La instalación de las escombreras obligó a la compactación para evitar la dispersión del material. Los métodos para prevenir o controlar la erosión producida por las precipitaciones y escorrentías fueron divididos en dos grupos; el primero

de ellos fue la construcción de estructuras mecánicas y el segundo corresponde a la protección de suelos con revegetación. A continuación de la Tabla A.2 se muestran las prácticas empleadas para este caso.

Tabla A.2. Prácticas de control de erosión, explotación de lignitos de Meirama.

Tipo de Proyecto: Minero (Lignito)	Prácticas empleadas	Objetivos	Observaciones
	Canales de cintura (sección hormigonada): rodeando el hueco de explotación para recoger el agua de escorrentía.	Disminuir la capacidad y potencia del bombeo y por tanto de energía del agua, así como su contaminación física y química.	El método de revegetación se considera como la mejor opción para la restauración de áreas abandonadas la selección se hace en función de: 1) adición a los suelos de sustancias que permitan el rápido desarrollo de vegetación. 2) selección de especies aptas. 3) técnicas adecuadas para realizar la implantación. La restauración se llevó a cabo inicialmente con el estudio edafológico. Posteriormente, la corrección de acidez del suelo y finalmente la hidrosiembra con la dosificación apropiada de semillas, abono, celulosa y estabilizador.
	Diques y Zanjas de canalización.	Eliminar el paso de agua por áreas potencialmente erosionables, evitar acumulaciones o encharcamientos en superficies irregulares, conducir los caudales a presas y proteger las tierras bajas de la depositación de sedimentos.	
	Protección de bermas y bajantes para el desagüe de los taludes. Se construyen con hormigón disponiendo puntos de descarga preparados con material de fragmentos de roca irregular.	Controlar la fuerza erosiva de las aguas que discurren por la superficie de los taludes y para retener sedimento.	
	Revegetación: cubierta vegetal permanente.	Fijación, estabilización y protección de los terrenos restituidos.	
	Instalación de bombeo.	Desagüe de aguas pluviométricas y subterráneas.	

Fuente: Elaboración propia.

A.3 Restauración de suelos producto de actividades mineras: experiencia en el proyecto minero Mirador, Zamora Chinchipe-Ecuador (2020).

La empresa minera Ecuacorriente S.A. (ECSA), operadora del proyecto minero Mirador, desarrolló la construcción de la infraestructura de mina, haciendo énfasis en que el Ministerio de Energía y Ambiente del país se encargó del monitoreo de las obras y que para 2020 se habían habilitado 11 piscinas de sedimentación. En paralelo se construyeron canales para la conducción de aguas pluviales y se hizo revegetación a los taludes con especies propias de la zona. En este sentido, se encuentran en la Tabla A.3 las prácticas empleadas.

Tabla A3. Prácticas de control proyecto minero Mirador, Zamora Chinchipe-Ecuador.

Tipo de proyecto: Minero (Lignito)	Prácticas empleadas	Objetivos	Observaciones
	Muros de roca en taludes de relleno.	Facilitar la estabilidad superficial en los taludes y disminuir la velocidad de escorrentía.	Las técnicas fueron aplicadas simultáneamente por la empresa dando mayor relevancia al control de sedimentos en las pozas.
	Revegetación del talud manual y por hidrosiembra de pastos nativos.	Mejorar la estabilidad superficial.	
	Bermas de drenaje.	Canalizar el flujo de aguas procedente del talud hacia pozas de sedimentación.	
	Biomantas en el talud de relleno.	Protección de la superficie.	
	Vertido de floculantes y coagulantes vertidos en el canal.	Mejorar la eficiencia de las pozas de sedimentación con sedimentos menores a 10 micras.	

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, para el mismo proyecto minero Mirador, Zamora Chinchipe, se ubicó un estudio de hidrosiembra como técnica de bioingeniería en la restauración de suelos. En él se recomiendan las actividades de revegetación con hidrosiembra, para taludes con diferentes inclinaciones. Esta técnica implica el uso de materiales biodegradables denominado mulch, fertilizante, agua y semillas nativas.

La empresa tomó en cuenta el uso de materiales de la zona y los factores ambientales presentes. En tal sentido, realizó investigaciones para determinar in situ las especies que mejor se adaptaban a los distintos tipos de suelo desnudo o desprotegido. Procediendo de esta manera:

1. Identificación de especies vegetales desarrolladas por sucesión.
2. Selección de la especie *Cyperus luzulae* por la abundante cantidad de semillas que se encuentran en el sector, durante todo el año y por la presencia de raíces fibrosas en forma de cabellera que son eficaces para desarrollarse en suelos erosionados (su porcentaje de germinación fue probado en cuadrantes de 47 cm de largo por 30 cm de ancho).
3. Determinación de los nutrientes del suelo según la zona tropical.
4. Germinación de *Cyperus luzulae* en los taludes del proyecto: que consistió en la proyección sobre el terreno de una mezcla acuosa de semillas, mulch, fertilizantes y sustancias adherentes. La técnica fue de fácil aplicación a gran escala porque se realizó con medios mecánicos especializados (hidrosembradora) dotados de equipos de bombeo. Se ubicó directamente sobre el talud desnudo, quedando adherido al mismo con una imagen paisajística de coloración verde.
5. El estudio culminó con pruebas de revegetación en la escombrera de estériles de mina.

Finalmente, se concluyó que aplicando la hidrosiembra la vegetación se estableció un 20-25 % más rápido que con cualquier otra alternativa mecánica o siembra manual. Como

ventaja el método permitió alcanzar grandes alturas en taludes difícilmente asequibles, por lo tanto, el recubrimiento fue más efectivo.

A.4 Control de erosión mediante bioingeniería en presas de colas de la industria del níquel, Cuba (2014).

El proyecto se ejecuta motivado al fracaso de los métodos de estabilización de los taludes de presas de cola en las actividades de explotación de níquel. Para el momento la estabilización de las presas solo se realizaba mediante el recubrimiento con tierra fértil, esto involucraba problemas considerables debido al alto costo y elevado impacto ambiental en las zonas de préstamo. Por tal razón se planteó la siguiente metodología de bioingeniería:

1. Zonificación de los riesgos: para definir las técnicas más adecuadas según el nivel de vulnerabilidad de cada dique de contención.

2. Trabajos de sellaje de las zonas inactivas: recubrimiento de los depósitos de colas, con una capa de 50 cm de material laterítico, para confinar el material de las colas de la acción de los agentes erosivos, además de crear una barrera entre las colas y las especies vegetales que se emplean en la rehabilitación biológica.

3. Monitoreo inicial de suelo, agua y aire: análisis para definir el porcentaje de macronutrientes primarios (N, P, K) y secundarios (Ca, Mg y S) en los suelos, así como los micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn, B y Mo).

4. Selección de las especies vegetales a emplear y construcción de bancos de reproducción de plantas: identificación de las especies vegetales que crecen de forma espontánea en las zonas vecinas o en hábitats similares, reproducción, tolerancia a condiciones extremas.

5. Preparación técnica de los taludes:

Bioestabilización: protección química de los suelos a través de la aplicación de polímeros sellantes, los cuales garantizan el control efectivo de la erosión en los taludes temporalmente.

Construcción de obras de protección: canales, desviación y aliviaderos permanentes o provisionales que se desintegren después de establecida la vegetación. Se emplean varios materiales como geosintéticos de polietileno de alta densidad (HDPE) o de polipropileno, rocas, madera, los cuales se combinan con especies vegetales diversas.

6. Rehabilitación biológica: Especies arbóreas para proteger las plantaciones de las corrientes de aire. Pastos de porte alto empleados como barreras antierosivas, pastos de porte bajo como recubrimiento de los taludes.

7. Monitoreo: el monitoreo y mantenimiento es la clave en el éxito del método teniendo claro que los niveles de precipitación, escurrimiento superficial, sismicidad, altura de taludes y deforestación son elementos que pueden acentuar los factores de riesgo de erosión.

En cuanto a las prácticas de control de erosión empleadas se expresan en la Tabla A.4

Tabla A.4. Técnicas de control de presas de cola de la industria del níquel, Cuba.

Tipo de proyecto: Minero (Níquel)	Prácticas empleadas	Objetivos	Observaciones
	Canales magistrales. Cunetas de guardas de taludes. Drenes Perimetrales. Terrazas. Aliviaderos. Sedimentadores. Disipadores de energía.	Regulación de drenaje.	Las técnicas de bioingeniería lograron controlar el 95% de la erosión superficial, con la combinación de obras de drenaje y cobertura superficial.
	Aplicación de cloruros de sodios. Aplicación de materiales bituminosos. Aplicación de Polímeros.	Estabilización química de taludes.	
	Enrocado. Barreras de madera y rocas. Geosintéticos. Cortinas rompe vientos. Estructuras de gaviones.	Estabilización mecánica de taludes.	
	Técnicas de recubrimiento superior Siembra de pastos. Siembra de arbustos. Siembra de árboles. Estabilización mixta.	Estabilización vegetativa de taludes.	

Fuente: Elaboración propia.

A.5 Control de erosión superficial en planta de beneficio de plata empleando geomanta tridimensional reforzada, México (2020)

Las plantas de beneficio son las plantas de tratamiento del material extraído en este caso plata. Para la construcción de la plataforma para cimentar la planta se requiere cortes de talud. El estudio establece una técnica de bioingeniería tomando en cuenta las grandes precipitaciones que se presentan en la zona montañosa de Teloloapán Guerrero punto preciso de ubicación de la mina. Se optó por colocar una geomanta antierosiva reforzada fabricada a partir de filamentos poliméricos fundidos en todos los puntos de contacto con una resistencia a la tensión longitudinal de 4 kN/m.

Según descripción del proyecto la manta posee alto grado de flexibilidad; además su forma tridimensional presenta más del 90 % de vacíos los cuales se llenan de suelo fino que favorece la creación de vegetación, la que se fusiona de buena manera al suelo del talud. Así pues, se logra una estructura resistente formada por la fuerza de la manta y el anclaje natural de la vegetación (raíces) en el talud. El proceso constructivo de la geomanta es muy sencillo y está limitado únicamente por la inclinación del talud, ya que entre mayor sea su ángulo de inclinación con respecto a la horizontal, la demanda de grapas (alambrón o estacas de madera) para mantener unida la manta al suelo será mayor. Adicionalmente a las grapas, se colocó una trinchera de sujeción (donde debe realizarse compactación del suelo de relleno) en la parte superior de los taludes, esta

ayuda a mantener la geomanta en su posición para que posteriormente se coloquen las grapas sin ningún problema.

El estudio concluye que el control de erosión en taludes por medio de geomantas trabajando en conjunto con la vegetación nativa presenta un gran potencial para el resguardo de todas las obras que se desplantan sobre declives naturales (laderas) o artificiales (terraplenes), de aquí la importancia de poder enfocar más temas de investigación que fructifiquen matemáticamente el uso de técnicas complementarias.

A.6 Control de erosión en áreas de extracción de petróleo con procesos de evaluación de metodologías de control en el lote 121 sector sur en la zona del Río, Napo Loreto – Perú (2014)

El estudio se realizó con la finalidad de controlar la erosión de suelos en áreas de producción petrolera, aplicando las técnicas metodológicas para el tratamiento de escenarios típicos. De tal manera que plantea el uso de diferentes técnicas para el control de erosión dependiendo de la zona del proyecto; destacando las obras para controlar el agua y su canalización, obras de control geotécnico y obras de protección superficial.

El procedimiento para la estabilización del suelo en áreas de operativas se lleva a cabo en las siguientes etapas:

1. Evaluar la topografía (relieve): para medir el grado de estabilidad o inestabilidad de los suelos Terreno plano (0 % de inclinación), con ligera pendiente (hasta 15 %), pendiente moderada (entre 15 y 30 %), pendiente pronunciada entre (30 y 45 %) y pendiente muy pronunciada (mayor a 45 %).

2. Evaluar estabilidad de taludes: áreas altamente vulnerables a la erosión hídrica y sobre todo a súbitos movimientos de masa. Clase 1 menos de 15° poca erosión, Clase 2 entre 15 y 30° no desestabilizado ni erosión severa, Clase 3 entre 30 y 60° desestabilizado o erosión severa, Clase 4 inestable y erosión severa. Siendo las dos últimas las de mayor limitación geotécnica.

3. Evaluar el suelo textura y estructura, drenajes superficiales originales: para minimizar el recorrido del agua.

Cabe destacar que en estos proyectos las principales causas de erosión en taludes se deben al corte empinado por relleno, exceso de presión por niveles freáticos altos, socavación por erosión de agua, concentración de aguas de escorrentía, saturación del terreno por aguas sub superficiales, ausencia de cunetas y falta de mantenimiento de las mismas. En la Tabla A.6 se muestran las prácticas de control de erosión empleadas según el escenario posible y los objetivos que cada una persigue.

Tabla A.6. Control de erosión en áreas de extracción de petróleo, Río Napo Loreto.

Tipo de proyecto: Petrolero (extracción de petróleo)		Escenario donde se desarrolla el proceso erosivo		Prácticas empleadas	Objetivos	
		Caminos de accesos permanentes a instalaciones		Canales transversales que atraviesan las vías (alcantarillas) y longitudinales en el sentido de las vías (cunetas).	Control de erosión en taludes que han sido modificados volviéndose inestables de pendientes escarpadas con procesos de deslizamientos de suelo.	
		Caminos temporales acceso de uso limitado		Canales transversales para recrear la red de drenaje original Recubrimiento con suelo orgánico.	Evitar en lo posible la concentración de caudales y minimizar el recorrido del agua en el camino abierto, La causa de la erosión es el talado y las aperturas que al no recuperar el suelo orgánico producen deslizamientos.	
		Cárcavas	Tratamiento	Presas.	Estabilización en pendientes suaves, ubicándola en la cabecera de la cárcava. Para cárcavas menores se recomienda la suavización del talud con relleno.	
				Bermas.	manejo de aguas de escorrentía y control de erosión en sitios de cambios de pendiente.	
				Diques.	Ubicadas en la corona para impedir el paso de la escorrentía hacia el talud.	
		Taludes	Estabilización	Obras de control Geotécnico.		
				Bermas intermedias.		En los sitios de cambio de pendiente para garantizar un factor adecuado contra el deslizamiento.
				Bermas para el manejo de aguas de escorrentía y erosión.		En las zonas de cambio de pendiente para garantizar el flujo de agua.
				Canales desviadores del flujo arriba del talud.		Desviar por completo la escorrentía.
				Diques en la corona.		Impedir el paso de la escorrentía.
				Obras de protección de la superficie del terreno. Técnicas vegetativas – Bioingeniería.		
				Siembra Manual.		Revegetación para protección de la superficie.
				Hidrosiembra.		Revegetación para protección de la superficie.
Biomantas o mantas degradables.				Protección de la superficie del talud con materiales orgánicos.		
Geomantas o geosintéticos.				Protección de la superficie del talud con materiales fabricados.		
Geomallas o geogrillas.				Refuerzo del suelo, construcción de plataformas de acceso, estabilidad de taludes de suelos blandos, estabilidad de taludes altos y empinados, como refuerzo de bases granulares de vías y construcción de muros de suelo reforzado.		
Red de malla hexagonal de doble torsión.				Barreras dinámicas de protección: para absorber la energía de un objeto en movimiento.		
Gaviones con sacos de geotextil.				Relleno de suelo y protección de la superficie.		

A.7 Informe final del Proyecto CJ068 Recuperación y conservación de suelos mediante presas de control de azolves, en la Cuenca de Burgos, México (2007).

El proyecto corresponde a explotación de gas no asociado en la Cuenca de Burgos, México. El área está integrada por cientos de pequeños yacimientos aislados unos de otros y localizados a muy diversas profundidades. En consecuencia, se dedican grandes áreas para la explotación de pozos, construcción de caminos, estaciones de bombeo, gasoductos, etc. Dentro del estudio se destacó que en las áreas afectadas por las actividades de PEMEX ciertas obras promueven en mayor medida la erosión. La primera de ellas es la construcción de caminos revestidos por caliche y grava, lo que propicia que en épocas de lluvia el flujo superficial tenga una mayor velocidad y se dirija hacia los terrenos adyacentes. También se encuentra la implementación de gasoductos pues al momento de hacer la zanja, colocar el tubo y taparla con tierra, alteran el nivel de agregación del suelo.

Asimismo, para la perforación de pozos y construcción de estaciones de bombeo es establecido por norma el desmonte de la superficie en una magnitud que varía de una a dos hectáreas. Adicionalmente, se realizan excavaciones a un nivel topográfico superior con respecto a los terrenos adyacentes, lo que propicia que en épocas de lluvias el agua tienda más a escurrir que infiltrarse generando surcos y cárcavas.

A razón de la naturaleza del problema, la implementación de prácticas para el control de erosión dentro del estudio se basó en dos etapas: inicialmente la construcción de presas de control de azolves (lodos y sedimentos), para luego evaluar los impactos de las obras sobre la restauración del suelo. La metodología empleada se muestra en la Tabla A.7. Finalmente, se concluyó que las obras realizadas tuvieron una acción positiva en la restauración de suelos de la zona permitiendo frenar la velocidad del agua que escurría sobre las cárcavas, además de mejorar de la infiltración, por consiguiente, el aumento de la humedad en el suelo y renovación de la vegetación.

Tabla A.7. Metodología y prácticas de recuperación y conservación de suelos mediante presas de control de azolves, Cuenca de Burgos.

Tipo de proyecto: Petrolero producción de gas no asociado	Metodología de control de erosión		Prácticas empleadas	Objetivo
	Etapas: implementación	Caracterización hidrológica de las cárcavas	Medida de longitud, ancho, profundidad y pendiente.	Estimar la capacidad volumétrica, por medio de la ecuación de Manning.
		Diseño y construcción de las presas filtrantes	Definir el espaciamiento de la presa.	Conseguir que cota de la base de una presa coincida con la cota del vertedor de la presa inmediata aguas abajo.
		Aislamiento de la cárcava	Estructura de madera, tela y ramas en la cabeza de la cárcava la cual fue suavizada previamente.	Detener el proceso de erosión y evitar que crezca la cárcava y desestabilice los taludes.

Continuación Tabla A.7. Metodología y prácticas de recuperación y conservación de suelos mediante presas de control de azolves, Cuenca de Burgos

Tipo de proyecto: Petrolero producción de gas no asociado		Metodología de control de erosión	Prácticas empleadas	Objetivo
	Etapa: implementación	Estabilización de la cárcava	Estructuras de mallas con postes de madera (de la deforestación) a lo largo del lecho de la cárcava.	Proteger los puntos críticos y facilitar el crecimiento de la vegetación nativa.
		Construcción de presas de malla de alambre y madera	Malla ciclónica fijada a hilera de postes de madera.	Contener el material deslizado en cárcavas medianas.
	Etapa: Evaluación de la restauración	Medición del volumen de suelo restaurado	Evaluación de la cantidad de suelo retenido.	Medir el impacto de las acciones realizadas.
		Análisis estadístico.	Análisis de varianza de volumen, superficie y masa de suelo retenido.	Comparar medias.
		Reforestación	Reforestación de cárcavas con leguminosa adaptada a las condiciones edáficas y climatológicas de la zona de estudio (<i>Prosopis glandulosa</i>).	Renovar la vegetación.
		Educación ambiental	talleres teóricos prácticos a productores.	Impartir herramientas técnicas a los pobladores.

Fuente: Elaboración propia.

A.8 Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización, Colombia (2011).

El estudio realizó la revisión bibliográfica de las alternativas que hasta el momento estaban siendo manejadas en bioingeniería para el control de erosión en Colombia. Se inicia por nombrar la bioingeniería utilizando pastos, vetiver, bambú o guadua y árboles. Seguidamente, se hace alusión a las obras dedicadas al manejo de aguas de escorrentía como lo son los cortacorrientes, canales revestidos y torrenteras.

En igual contexto, son analizadas las prácticas asociadas a materiales vivos u orgánicos como barreras de vegetación, revegetalización con tela de fibra de cabuya (fique) y utilización de bambú con malla metálica. Para finalmente exponer las técnicas de reforzamiento de taludes con geotextiles, gaviones de piedra y bolsas de arena. La

clasificación de sistemas de control implementados para la erosión que se observa en la Tabla A.8 obedece a dos grandes grupos representados por las cubiertas convencionales y las no convencionales respectivamente, junto con sus rasgos más resaltantes.

Tabla A.8. Sistemas de control para la erosión con coberturas convencionales y no convencionales

Tipo de proyecto: Revisión bibliográfica con posible aplicación agrícola	Funcionalidad de las cubiertas: Protección de semillas y el suelo de la erosión. Estabilización del suelo. Reducción las fluctuaciones de temperaturas del suelo. Retención de humedad.			
	Sistemas de Control de erosión		Materiales	
	Cubiertas orgánicas	Convencionales	Revestimiento orgánico suelto (para llanuras a pendientes).	Paja y heno con longitud de 10 a 20 cm para entrelazarse.
			Fijadores (<i>tackifiers</i>) (para pendientes más pronunciadas).	Sprays viscosos compuestos por emulsiones asfálticas, destilados de agua, psyllium y alginato de sodio.
		No convencionales	Red para el control de revestimientos orgánicos (<i>Mulch -control netting, MCN</i>) (para terrenos ya sembrados).	Fibra tejida plana, natural o de malla geosintética extrusada, utilizada como productos en rollo temporario y degradable.
			Telas de trama abierta (<i>Open-weave textile, OWT</i>) (Para terrenos de mayor tracción, como pendientes empinadas).	Producto en roll temporario y degradable, compuesto por hilos naturales procesados o de polímeros, entrelazados con un aglutinante.
	Revestimientos para el control de la erosión (<i>erosion -control blankets, ECB</i>).		Fibras orgánicas/sintéticas degradables tejidas, pegadas o estructuralmente adheridas con mallas. Los más utilizados están hechos de paja, virutas de madera, coco, polipropileno, o una combinación de estos, cosidos o pegados dentro o entre las mallas.	
	Cubiertas sintéticas	Manto de refuerzo de la vegetación (<i>Turf Reinforcement Mat, TRM</i>) (para canales de alto flujo o pendientes empinadas con problemas para revegetar).	Producto en rollo permanente, compuesto por fibras sintéticas no degradables, filamentos, redes o mallas metálicas, procesadas en una matriz tridimensional permanente. Los TRM pueden suplementarse con componentes degradables.	

Fuente: Elaboración propia.

A.9 Aplicación de nanotecnología para remediación de suelos contaminados por hidrocarburos, Bogotá (2022).

El estudio corresponde a una investigación descriptiva sobre los diferentes métodos que existen para aplicar nanotecnología en los suelos contaminados por la industria petrolera. Inicialmente fueron descritos los procesos de contaminación a causa de los hidrocarburos, para continuar contrastando los diferentes métodos que se han implementado en años usando la nanotecnología como eje fundamental en la remediación de suelos contaminados por los hidrocarburos. Como paso final se realizó el análisis DOFA (Dificultades, Oportunidades, Fortalezas, Amenazas) a cada método para seleccionar el de mejores características y mayores ventajas para la remediación. Se determinó de esta forma, las nanoemulsiones con aceite esencial de cascara de naranja como el más apto con resultados de remoción de un 97,5 %.

En este contexto es conveniente acotar que la nanotecnología comprende el diseño, caracterización y aplicación de estructuras, dispositivos y sistemas complejos mediante el control de la forma, el tamaño y las propiedades de la materia a escala nanométrica entre 0.1 – 100 nm. En la Tabla A.9 se encuentran los métodos desarrollados junto a su principio de funcionamiento y efectividad en la remoción de contaminantes:

Tabla A.9. Métodos de nanotecnología para remediación de suelos contaminados por hidrocarburos.

Tipo de proyecto: Petrolero (saneamiento en instalaciones de producción)	Método de Nanotecnología	Principio de funcionamiento	Características
	Aplicación de Nanocatalizadores	Destrucción de los hidrocarburos con formación de dióxido de carbono y agua como productos de reacción. Se basa en tratar el material contaminante con una combinación de reactivos y nanocatalizadores en condiciones independientes del pH y a temperatura variable.	El catalizador debe ser amigable con el ambiente, tener alta eficiencia de velocidad de catálisis y tener razonable independencia con las condiciones de pH, humedad y temperatura del suelo.
	Aplicación de Nanohierro "ZVI (Fe ⁰) "	Se basa en contactar el suelo con capas de partículas de ZVI en escalas nanométricas en solución acuosa. Luego mediante procesos de reducción /oxidación se descomponen los contaminantes.	Puede reemplazar los agentes oxidantes convencionales, ozono y peróxido de hidrógeno, este polvo se puede rescatar de algunos desechos de diferentes áreas de fabricación de hierro que termina contribuyendo al momento de los costos No genera grandes cambios en el pH y no requiere de cambios en este.

Continuación Tabla A.9. Métodos de nanotecnología para remediación de suelos contaminados por hidrocarburos.

Tipo de proyecto: Petrolero (saneamiento en instalaciones de producción)	Método de Nanotecnología	Principio de funcionamiento	Características
	Aplicación de Nanoemulsiones	Fase aceite dispersa en la fase acuosa en emulsión de partículas 20 a 500 nm. Comúnmente se desarrollan de nanoemulsiones en base aceite esencial de naranja y surfactante no iónico, que al entrar en contacto con el suelo "lavan los contaminantes".	Baja complejidad de formulación Impacto mínimo sobre el medio ambiente Costos reducidos pues solo se requiere cascara de naranja para la obtención de los elementos Eficiencia rápida de barrido del contaminante.
	Aplicación de Micro-nanoburbujas	Burbujas finas, las cuales están compuestas de aire atmosférico cuyo diámetro puede oscilar entre 1 a 100 micrones y una de sus características principales a excepción de su tamaño es que, al entrar en relación con el agua, se puede transferir oxígeno, dióxido de carbono y ozono. El proceso permite a las burbujas penetrar en los espacios porosos envolviendo los contaminantes y obligándolos a desplazarse a la superficie.	Requiere diferentes herramientas a nivel laboratorio, que pueden evidenciar costos elevados La aplicación de este método, debido a necesita de generador de micro-nanoburbujas y un equipo de tratamiento que contenga la motobomba.

Fuente: Elaboración propia.

A.10 Manual de técnicas estrategia de intervención: “desarrollo rural sostenible, basado en la conservación de suelos y aguas” serie “guía y manuales”, Bolivia (2004).

En este manual se plantea la problemática de los proyectos de conservación de suelos y aguas en donde al momento de su formulación no se consideran las necesidades de los agricultores y en consecuencia los mismos no adoptan las técnicas propuestas. Para dar respuesta a la problemática el trabajo desarrolló dos enfoques imprescindibles: en primera instancia una metodología con un enfoque participativo que incluye técnicas concretas para que los agricultores reciban los proyectos de buena forma; y, por otra parte, un manual técnico que describe concretamente las prácticas adecuadas.

Dentro de los aspectos descritos se ubican los criterios para elegir las prácticas de conservación en función de América Latina:

1) Tipo de suelo: **A:** Degradado (consideración de prácticas que puedan eliminarse posteriormente), **B:** con obstáculo (problemas para el uso de maquinaria), **C:** compactados (requieren tratamiento previo).

2) Nivel de tecnología requerida: **Media** (capacitación media), **Alta** (Capacitación intensiva).

3) Tamaño de la finca: **Pequeña** (hasta 30 ha se emplea mano de obra y tracción animal), **Mediana** (30 a 100 ha se emplea maquinaria y tracción animal), **Grande** (más de 100 ha se emplea maquinaria).

4) Nivel de inversión: **Media** (mano de obra familiar y alquiler de equipos), **Alto** (gran cantidad de trabajo, compra de materiales y maquinaria).

5) Clima: **A:** Limitantes de disponibilidad de agua zonas semiáridas o húmedas, **B:** intensidad, duración de épocas de lluvia necesarias para el diseño de las obras físicas, **C:** temperaturas bajas producidas por heladas consideradas para los métodos de cultivos.

Una vez expuestos los criterios claves para la selección de prácticas se proponen las mismas según su naturaleza; estas van desde obras físicas a especificaciones agronómicas y forestales. El resumen de las medidas planteadas en el manual técnico se muestra en la Tabla A.10. Se concluye entonces, que las medidas físicas serán de conservación del suelo si se trata de control de agua. Por su parte, las medidas referidas al mejoramiento de la infraestructura se consideran de desarrollo rural. Finalmente es vital recalcar que los métodos descritos para el control de erosión demostraron ser tanto más efectivos cuando se consideraba la opinión del agricultor y ganadero.

A.11 Control de la erosión en desmontes originados por infraestructura viaria: aplicación al entorno de Palencia capital. España (2002).

El estudio busca exponer la problemática de la erosión hídrica en las obras de infraestructura viaria de España, que comprenden las carreteras y el ferrocarril. Para ello inicia explicando los procesos de erosión que se asocian a la red de transporte del país, la cual se ha visto condicionada por el relieve abrupto de los sistemas montañosos del norte de la Península Ibérica y por las circunstancias socioeconómicas e históricas. Por tal motivo cita testimonios y referencias históricas para resaltar la importancia de tratar la erosión, pues por sí misma puede representar una limitante en el desarrollo del país impidiendo a veces las comunicaciones en momentos decisivos, sin dejar de lado su responsabilidad en muchos accidentes viales.

En este contexto, el proyecto propone la atenuación o prevención de los efectos que causa la erosión hídrica en las obras de infraestructura viaria mediante dos formas: la primera básicamente en mantener las partículas de terreno en su lugar de origen, y que es lo que comúnmente se denomina control de erosión; pero la segunda opción evita que los materiales removidos alcancen los lugares donde previsiblemente pueden resultar dañinos, como corrientes, lagos, embalses, zonas húmedas, etc., ésta se conoce como control de sedimentos. Las técnicas de control propuestas para estos escenarios y capaces de abarcar ambos enfoques se encuentran plasmadas en la Tabla A.11. Se dividen en constructivas, estructurales, tratamientos químicos, revegetación, métodos mixtos y de control de sedimentos.

Finalmente, las conclusiones de las pruebas aplicadas en cuanto a la eficacia de los tratamientos en la zona, responden a la evaluación de tres aspectos: mayor control de la erosión, menor escorrentía y mejor cobertura vegetal de los tratamientos. Según su respuesta se determinó como tratamiento más efectivo a la manta de coco con hidrosiembra con eficacia de 99 %, seguido muy de cerca de la manta de esparto más hidrosiembra con 80 %.

Tabla A.10. Medidas técnicas para la conservación del suelo en el desarrollo rural sostenible.

Tipo de proyecto: Agrícola y Ganadero (revisión técnica área rural de Bolivia)		Medidas de conservación empleadas		Objetivos	
Medidas técnicas de conservación por obras físicas para controlar el flujo de agua	Terraza de canal.		Evitar la erosión hídrica en cárcavas controlando la escorrentía mediante el fraccionamiento de la superficie Aumentar la infiltración del agua y la parte superflua es evacuada por canales.		
	Terraza de banco.		Acortar la longitud de la pendiente en forma escalonada sus funciones son iguales a las de canal, pero la parte terraplenada es más susceptible a la erosión hídrica por lo que el talud debe ser estabilizado con cobertura vegetal o muro de piedra.		
	Terrazas de plantación.		Aumentar la infiltración, controlar la erosión en cárcavas y estimular el desarrollo de árboles plantados.		
	Canales de drenaje.		Controlar la escorrentía; hace ingresar el agua de lluvia a la parcela y luego descarga el agua superficial con una velocidad tal que no provoque la erosión del suelo.		
	Zanja de infiltración.		Canal de drenaje para capturar las partículas de tierras arrastradas por la escorrentía y para hacer infiltrar el agua al suelo.		
	Obras físicas para control de cárcavas	Ataguía.	Montículos con sección en "A" para interceptar y hacer sedimentar la tierra erodada. Ataguía de mallas metálicas: Es apropiada para cárcava estrecha. Ataguía de pasto: Cuando se quiere abaratar el costo de construcción. Ataguía de piedras: Cuando se requiere durabilidad. Ataguía de tablas: Cuando la cárcava abarca grandes extensiones, el costo es bajo.		
		Presa de contención.	Contener los sedimentos en la parte interna de la cárcava puede ser de tierra y piedra.		
	Muro de piedras.		Disipar la velocidad de flujo y la energía de la escorrentía y prevenir la erosión del suelo.		
	Muro de tierra.		Evitar el paso de la escorrentía en pendientes suaves.		
Medidas para el control de agua	Reservorios de agua. .		Pequeños embalses para almacenar el agua.		
	Tanques.		Estructuras para captar agua como canales y tuberías que las llevan hasta el ajibe debajo de los techos.		
Prácticas agronómicas de conservación	Mejoramiento del suelo en base a materia orgánica: mejora la capacidad de aireación, de infiltración y de retención de humedad del suelo mediante la formación de agregados resistentes al agua, aporta nutrientes y mejora la flora microbiana lo que promueve el crecimiento de raíces.				
	Mejoramiento del suelo en base a cultivos de abono verde: pueden clasificarse en dos grupos las leguminosas y las no leguminosas. Mejoran las características físico químicas del suelo, aminoran el impacto de las gotas de lluvia por la cobertura vegetal, aumentan la porosidad, capacidad de infiltración y humedad.				
	Manejo de Cultivos: para prevenir erosión de los suelos se aplican prácticas como rotación de cultivos, cultivos mixtos, cobertura del suelo mediante cultivos de cobertura, mulch con rastrojos de cultivos o malezas, mulch de piedra.				

Continuación Tabla A.10. Medidas técnicas para la conservación del suelo en el desarrollo rural sostenible.

Medidas de conservación empleadas	
Prácticas Forestales	Manejo de Fertilidad: mediante uso de fertilizantes químicos.
	Método de plantación del tipo “estrato múltiple”: se aprovecha las características de diferentes especies forestales para conformar una asociación vegetal que tenga múltiples estratos en el ámbito vertical.
	Plantación directa empleando Almácigo (semilleros): ara difundir plantaciones de especies forrajeras, de barreras vivas, y de bosques de conservación en cualquier lugar.
	Posibilidades de la fruticultura: como método de diversificación de las plantaciones.
	Prácticas de protección de las plantaciones: protección de las plantas recién trasplantadas, hasta que alcancen un determinado crecimiento, las prácticas corresponden a cercos de protección empleando madera, aprovechamiento de plásticos desechables, aprovechamiento de lana de oveja contra hormigas cortadoras de hojas y mediante uso de plantas espinosas.
	Manejo de los recursos forestales mediante un reglamento de manejo forestal
Prácticas en el área de la ganadería	Medidas para adecuar la cantidad de animales criados: aplicando la tecnología ganadera Medidas para reducir la cantidad de animales en pastoreo: Reducir el número de cabezas sin afectar el valor económico de la explotación Medidas de producción y aprovechamiento de forraje: Producción de forraje en pequeña escala y disminución de pérdidas, aprovechamiento de los cultivos como abonos verdes.
Otras medidas	Medidas en base al control social: Fortalecimiento de la vigilancia basada en la concienciación sobre los recursos naturales.
	Silo metálico familiar: para proteger los granos de la variación de la humedad.
	Compostaje mediante lombricultura: humus elaborado por la lombriz a partir de diversos residuos vegetales.

Tabla A.11. Métodos de control de erosión en desmontes originados por infraestructura viaria.

Tipo de proyecto: Civil construcción de vías férreas	Prácticas de control de erosión empleadas		Objetivos
	Medidas constructivas	Empedrado	Cubrir el talud o entrada y salida de pasos de agua con grava.
		Encachado o mampostería	Cubrir taludes interiores de los puentes de la carretera con lajas o bloques de piedra.
		Escolleras y pedraplenes	Cubrir taludes con bloques de piedra de 2/3 de espesor de la superficie a compactar para drenar y estabilizar el talud.
		Gaviones	Jaulas rellenas de gravas naturales. Usadas para muros de contención, disipadores de energía en pasos de agua y protección de canales o ríos de la erosión.
		Muros de hormigón	Hormigón en masa para resistir el esfuerzo de tracción con su propio peso.
		Gunitado	Malla rellena con hormigón para taludes con problemas de caída de material por meteorización.
		Cubierta de hormigón	Hormigón directamente sobre el terreno o en sacos "bolsacretos" para protegerlo de forma temporal o permanente usado en canales, taludes, bajantes y entradas y salidas de agua.
		Muros prefabricados de hormigón	Elementos de hormigón que se ubican en estructura reticular para contención de taludes.
		Canales y colectores	Dirigen el agua desde los puntos de concentración.
		Caces y cuneta	Canales en el borde de la plataforma para captar el agua. Su construcción es debatida, al concentrar los escurrimientos en puntos concretos del terreno y trasladar grandes cantidades de sedimento hacia aguas de interés ecológico.
		Zanjas de desviación o de intercepción	Cunetas guarda (cunetas a la cabeza del talud) o de pie (cunetas al pie del talud) Zanjas que interceptan el agua en los taludes o cabeceras y las llevan a los canales de desagüe.
		Sumideros	Desagües que reciben las aguas, disipando la energía y reduciendo la velocidad son de hormigón madera o acero.
		Imbornales	
		Bajantes	Conducir el agua al pie de los taludes para evitar la erosión pueden ser abiertos o cerrados.
		Drenajes	Drenar los taludes saturados y aumentar su estabilidad y reducir la erosión superficial de los afloramientos por las aguas subterráneas.
		Disipadores de energía y laminadores	Convertir las corrientes de alta velocidad de los canales revestidos y/o conductos en flujos de velocidad baja no erosiva se construyen aguas abajo.
		Embocaduras	Transición gradual entre el flujo en una conducción abierta y una conducción cerrada.
		Geotextiles sintéticos y mallas metálicas	Rollos de polímeros plásticos resistentes que de desenrollan y grapan sobre el talud para protegerlo de la erosión.
		Compactación	la compactación del terreno en terraplenes disminuye la erosión en masa, pero aumenta la erosión superficial al reducir la infiltración.

Continuación Tabla A.11. Métodos de control de erosión en desmontes originados por infraestructura viaria.

	Medidas estructurales	Prácticas de control de erosión empleadas	Objetivos
		Terrazas	Escalones horizontales para reducir la longitud de la ladera y se recoger parte de la escorrentía, favoreciendo la infiltración y reduciendo la capacidad erosiva.
		Bermas caballones o cordones de tierra	Cordones de tierra colocados según curvas de nivel para detener la escorrentía y canalizarla a la red natural.
		Control del área y tiempo de exposición	Reducir el tiempo de exposición del terreno es clave para reducir la erosión.
	Métodos o tratamientos químicos	Emulsiones asfálticas	Materiales o sustancias químicas sintéticas o de procedencia industrial, de carácter orgánico o inorgánico, que permiten mediante su proyección en solución acuosa sobre los taludes, medianas u otras zonas, fijar las partículas de terreno de forma que no sean arrastradas por el agua. También aumentan la capacidad de retención de agua y la porosidad del suelo.
		Espumas de urea-formaldehído	
		Alginatos	
		Resinas	
		Fibra de vidrio	
		Pasta de fibras de madera	
	Métodos de revegetación	Siembra directa	Distribución de semillas sobre el terreno siembra manual en pendientes no mayores del 35% y mecánica en pendientes no mayores al 30 %.
		Hidrosiembra	Proyección mediante un cañón hidráulico de una mezcla acuosa de semillas, mulch, fertilizante, estabilizadores y agua. Para mantener la semilla en taludes de más del 35% de pendiente.
		Encespedamiento	Instalación sobre el terreno de planchas o alfombras de tierra y césped precultivado para conseguir recubrimiento instantáneo.
		Mulch	Cubierta superficial del suelo que lo protege de la erosión puede ser de naturaleza orgánica y temporal o inorgánica y permanente.
		Geotextiles orgánicos o de fibra vegetal	Fibras vegetales generalmente de paja, heno, coco, esparto, yute, fique, lana de madera, que se hallan bien entrelazadas a modo de red o manta entre dos mallas de polipropileno o nylon y que actúan a modo de mulch.
		Plantación	En base a plantas de pequeñas tallas de corta edad y alta densidad para protección y control de la erosión.
	Métodos mixtos	Colchones de rama	Protección de la superficie con ramas entre estacas y piquetas metálicas.
		Geotextiles sintéticos	Elaboradas con polietileno, polipropileno o nylon. Según el espesor de suelo ofrecido pueden ser mallas, geomallas o geoceldas.
		Bloques cerámicos o de hormigón	Bloques de hormigón emplazados sobre un geotextil que es rellenado y sembrado Excelente protección de erosión hídrica.

Continuación Tabla A.11. Métodos de control de erosión en desmontes originados por infraestructura viaria.

		Prácticas de control de erosión empleadas	Objetivos
		Empalizadas trenzadas o zarzos	Serie de estacas vivas de sauce o chopo que al rebrotar y enraízan cubriendo el terreno y lo protegen y sujetan ejerciendo un eficaz control de la erosión.
Métodos mixtos		Fajinas	Zanjas a curva de nivel, dentro de las cuales se ubican empalizadas vivas y se cubren de tierra. Controlan el aporte de sedimento y al rebrotar reducen la erosión.
		Lechos de arbustos	Colocación de ramas vivas de alisos, sauces y chopos diversos, en abundante número, sobre una terraza estrecha, de 1 o 2 m.
		Muros revegetados	Muros de rocas intercalados con plantas o estaquillas en los huecos propios que deja el sistema de construcción. Estabilizan y promueven la revegetación.
		Gradas vivas o emparrillados vivos	Arma la ladera a modo de gradas o emparrillado cruzado construyendo una serie de celdas que se rellenan con tierra vegetal y se plantan o entrelazan, utilizado en pendientes muy pronunciadas.
		Gunitado verde	Para restaurar laderas de fuerte pendiente hasta 80%. mezcla pastosa de partículas orgánicas, microfibras de material sintético, estabilizadores, fertilizantes y semillas que se ubica sobre el talud y debajo de una malla metálica.
		Celosías verdes o sistema "Krismer"	Estructura ligera en celosía de acero galvanizado que proporciona una profundidad de suelo artificial de unos 8 cm. rellenándose a continuación parcialmente con una capa de grava para permitir el drenaje de aguas subterráneas y finalmente se hidrosiembra.
Métodos de Control de sedimentos		Presas de retención	Represas de madera escuadrada, troncos, gaviones, mampostería, hormigón, elementos prefabricados, balas de paja, planchas metálicas o gaviones de coco, colocados transversalmente en los canales o cunetas que recogen las aguas de la vía, frenan éstas y facilitan la sedimentación.
		Ataguías	Barreras o pantallas temporales de diversos materiales que desvían o separan las aguas y sedimentos de las corrientes. Suelen instalarse en los bordes de los cursos cercanos a la obra.
		Balsas de decantación y trampas de sedimento	Depósito abierto excavado en el suelo, o construido mediante una presa, donde las aguas se embalsan el tiempo suficiente para sedimentar las partículas.
		Vallas de sedimentos	Planchas metálicas, de madera, biorollos, geosintéticos, que se emplazan a manera de cerca en el perímetro del área. Se consideran métodos secundarios apropiados para pequeñas extensiones con inclinaciones no mayores al 20 %.
		Pantallas dinámicas	redes metálicas que interceptan la caída de rocas o fragmentos de roca desde desmontes o laderas para defender vías, viviendas o estructuras.
		Bolsas filtrantes	Se instalan a la entrada de sumideros, imbornales, pasos de agua, alcantarillas, etc. Para filtrar las partículas del flujo convergente en el sistema de drenaje. Los sedimentos quedan atrapados en la bolsa impidiendo la contaminación del agua.
		Franjas protectoras de vegetación	Franjas de vegetación densa que filtran y retienen los sedimentos emitidos hacia áreas críticas como corrientes de agua, en un terreno de 10% de pendiente, se recomienda que la franja tenga 27 m de ancho.

Fuente: Elaboración propia.

A.12 La nanotecnología en la agricultura y rehabilitación de suelos contaminados, México (2010).

El estudio plantea el uso de las nanopartículas en agricultura para producción de fertilizantes especiales, estimulantes del crecimiento y plaguicidas sistémicos. Así como también, en el manejo postcosecha empleando materiales mejorados con nanopartículas. Sin embargo, la nanotecnología también es útil como una tecnología ambiental y se maneja bajo el nombre de nanorremediación. Como ventaja esta reduce el costo general y el tiempo de limpieza de sitios contaminados al ser utilizada a gran escala.

Otros de los beneficios de la nanorremediación es eliminar la necesidad de tratamiento y disposición de suelo contaminado, pues reduce las concentraciones de los contaminantes casi a cero. Esto es posible gracias a la propiedad de las nanopartículas de introducirse en espacios muy pequeños y distribuirse más rápidamente, que las partículas de mayor tamaño. Aunque no pueden moverse muy lejos del punto de inyección La mayoría de las aplicaciones ambientales de la nanotecnología consideran tres categorías:

- 1) Productos sustentables ambientalmente benignos (química verde o prevención de la contaminación).
- 2) Remediación de materiales contaminados con sustancias peligrosas.
- 3) Sensores para agentes ambientales.

De acuerdo a lo comentado varios materiales se han probado para la remediación, por ejemplo: zeolitas, óxidos metálicos, metales nobles (plata, paladio, cobre), dióxido de titanio, nanotubos y fibras de carbono y enzimas. Sin embargo, el más ampliamente usado es el hierro valencia zero nZVI.

Para que la nanorremediación sea efectiva, se requiere la adecuada caracterización de los sitios: localización, condiciones geológicas (composición de la matriz del suelo, porosidad y profundidad del manto freático), propiedades geoquímicas (pH, fuerza iónica, oxígeno disuelto, potencial óxido reducción, concentración de nitratos, nitritos y sulfatos), así como concentración y tipo de contaminantes. Estas variables determinarán si las nanopartículas serán capaces de infiltrarse a la zona a remediar y si las condiciones son favorables para la transformación de los contaminantes. Su aplicación conlleva riesgos, Por ejemplo, durante el transporte y almacenamiento de sustancias como los hidrocarburos han ocurrido fugas accidentales, la migración de estas sustancias al subsuelo causa la contaminación de las aguas subterráneas. La remoción de estos contaminantes es difícil y costosa; una opción es su degradación química, para lo cual hay que introducir agentes reductores a esa agua subterránea. Es aquí donde se propone usar nanopartículas que contienen nZVI para descontaminar agua subterránea. Estas partículas tienen alta reactividad, debido a su extensa área superficial, sin embargo, se manifiesta que su movilidad es limitada (menos de pocos metros), por lo que se supone que el riesgo de exposición del ser humano a estos compuestos es mínimo, pues quedarían depositados en las rocas y paredes de los acuíferos.

Las nanopartículas también pueden ser usadas para remover contaminantes inorgánicos del agua y de la solución del suelo, hay varios ejemplos de esto, como es el uso de las microesferas magnéticas que pueden ser de tres tipos: 1) esferas encapsuladas con polímeros; 2) esferas con partículas dispersas en el exterior y, 3) esferas con polímeros en la entrecara de polímeros y estructuras con partículas dispersas aleatoriamente.

Para la revisión se concluye que la nanotecnología simboliza un campo amplio por explorar no solo como remediación sino como herramienta de disminución de costos especialmente en el área agrícola; sin embargo, requiere seguimiento de las implicaciones a mediano y largo plazo de los efectos de su uso. Desde el punto de vista de análisis para control de erosión podría ser empleada con fines de mejoramiento de nutrientes que permitan mayor efectividad en procesos de revegetación de suelo, como generadores de capas protectoras para la erosión del suelo y como agente de remoción de contaminantes que produzcan reducción en la tasa de infiltración del suelo.

A.13 Manual de Manejo y Conservación de Suelos y Aguas, Costa Rica (1995).

El manual resalta la necesidad de controlar la erosión del suelo en Costa Rica, donde la principal actividad económica corresponde a la agricultura y ganadería. En él se describe a detalle los procesos de la erosión hídrica y las prácticas de conservación de suelos y aguas que permiten la reducción de la erosión. Así bien, dentro del manual se exponen prácticas agroconservacionistas que implican uso material biológico vivo a o muerto para el control de erosión y estructurales que requieren la instalación de obras físicas para manejar la escorrentía. Todas pueden observarse en la Tabla A.13.

En el mismo orden de ideas, se muestra la importancia del Servicio de Extensión Agrícola como agente clave para motivar a los agricultores a tomar las prácticas. Así como también para prestar servicio de asistencia técnica que facilite la implementación de dichas prácticas. Esto plantea abordar el tema de la erosión de suelos más allá del contexto de erosividad y erodabilidad de la lluvia y el suelo, por el contrario, deben incluirse aspectos del entorno social y económico como densidad de la población, tamaño y distribución de fincas, tenencia de la tierra, mercadeo y aspectos culturales.

En este contexto los sistemas de conservación de suelos y aguas actúan en varios niveles:

- 1) Sobre la resistencia del suelo a la erosión con un buen manejo del suelo.
- 2) Sobre la protección del suelo contra la erosión por medio de buenas prácticas y de adecuado manejo de la tierra.
- 3) Sobre la energía del agua de escorrentía por medio de estructuras físicas que acortan el largo de pendiente y reducen su magnitud.

Tabla A.13. Prácticas propuestas Manual de Manejo y Conservación de Suelos y Aguas.

Tipo de proyecto: Agrícola y Ganadero (exposición de características y métodos de control de erosión)			Prácticas de control	Objetivos
Prácticas Agroconservacionistas			Prácticas en contorno	Labores a curva de nivel o perpendicular a la pendiente, para impedir el paso de la escorrentía y disminuir su velocidad. Efectivas hasta el 7 % de pendiente.
			Alta densidad de siembra	Aumento en la densidad del cultivo.
			Cultivos múltiples	Cultivos que crecen simultáneamente en la misma parcela para formar estratos diferentes arriba del suelo.
			Cortinas rompe vientos	Hileras de árboles o arbustos dispuestas perpendicularmente a la dirección principal del viento, reducen la evaporación del agua del suelo y frenan las lluvias oblicuas.
Medidas de Manejo del Suelo			Labranza profunda	Prepara el suelo con arado o disco para favorecer el desarrollo radicular.
			Labranzas superficiales	Trabaja superficialmente el suelo para destruir los terrones gruesos.
			Enmiendas orgánicas	Se incorporan al suelo para mejorar sus propiedades físicas, químicas y con ellos su fertilidad. Pueden ser: abonos de estiércoles, abonos verdes y abonos orgánicos.
			Barvechos	Cobertura por rebrote de la vegetación natural (luego de concluir el cultivo) y mejorados (leguminosas sembradas que tienen las ventajas de los cultivos por coberturas).
			Uso de fertilizantes y enmiendas minerales	Concentrados minerales que se aplican al suelo para corregir la deficiencia o toxicidad y así mejorar la fertilidad.
			Rotación de cultivos	Secuencia de ciclos de cultivo para evitar la degradación por desbalance de nutriente.
			Agroforestería	Combinación de árboles forestales con cultivos o con ganadería la vegetación en estratos reduce el riesgo de erosión por cobertura.
Manejo de praderas			Pastoreo rotacional	El más amigable desde el punto de vista ambiental, el ganado se alterna entre parcelas dejando que cada una descanse y los pastos puedan germinar de nuevo.
			Pastoreo de corte	El forraje se corta cada 2 meses para integrarlo al ganado).
			Pastoreo diferido	Se deja descansar por tiempo definido.
Medidas Estructurales	Control de erosión hídrica		Canal de guardia o intercepción	Canal trapezoidal que intercepta la escorrentía proveniente de la loma de la pradera o bosque para proteger áreas bajas y terrenos cultivables.
			Terrazas de desagüe	Eliminar el exceso de agua que genera erosión, en pendientes menores a 2% se usa como drenaje de escorrentía superficial.
			Acequias de ladera	Control de erosión en tierras escarpadas de pendientes entre 10 y 50 %.
			Terrazas de huerta o escalones	Terrazas de banco construidas en pendientes de terreno entre 30 a 50 %. Poseen una pendiente invertida para formar una capacidad adecuada de desviar el exceso de escorrentía.
			Barreras de piedras	Se construyen en contornos para atrapar y retener los sedimentos provenientes de la parte superior de los terrenos generando terrazas progresivas.

Continuación Tabla A.13. Prácticas propuestas Manual de Manejo y Conservación de Suelos y Aguas.

Prácticas de control		Objetivos
Conservación de agua	Canal de infiltración	Para conservar el agua de lluvia en zonas secas. Se construyen a nivel.
	Surcos en contorno en pradera	Para reducir la escorrentía superficial en los potreros y captar el agua. Son construidas a nivel con taludes de relleno en la parte superior.
	Terrazas de banco	Consiste del ancho del talud y del ancho cultivable. Capta el agua de lluvia que cae sobre la terraza. Se usa en pendientes de 15 a 25 %.
	Terrazas individuales	Banco circular o cuadrado construido alrededor de un árbol con inclinación de 5%, permite la captación de escorrentía
	Melgas en contorno	Agua confinada entre dos diques de 20 cm de altura máxima por 30 cm de ancho construidos en contorno.
	Represa de conservación de agua	Conservación de escorrentía por medio de la construcción de una represa en una depresión o quebrada. Apta para subsuelos impermeables.
Control de cárcavas	Aislamiento de la cárcava	Cerca alrededor a una distancia de dos veces su profundidad.
	Control de erosión en la cabeza de la cárcava	Desviar la escorrentía por un canal de guardia, reformar inclinación del talud, establecer césped sobre el talud, barreras vivas, muro de piedra, rastrojo en la parte superior del muro y fertilizar con semillas de pasto.
	Establecimiento de una franja de vegetación	Formación de capas de césped.
Control de deslizamientos de tierra		El riesgo puede reducirse sacando las aguas de escorrentía de la cabecera del derrumbe por medio de un canal de guardia, apoyado por barreras vivas dobles o triples en la parte superior del canal, en las áreas de infiltración se debe disponer el agua por zanjas o tuberías y finalmente suavizar la superficie de las depresiones o grietas para establecer un talud estable con coberturas densas de pasto.
Control de inundaciones	Obras de protección del drenaje principal	Pared de gaviones: para la estabilización de riveras de ríos, este tipo de pared protege contra la erosión de la corriente por falta de vegetación y presencia de suelos arenosos Diques de desviación: muro de piedras y malla de alambre que funciona como obstáculo permeable Recanalización: del curso del río.
	Drenajes de tierras agrícolas	Canal de guardia: para desviar el agua de la vertiente y reducir la magnitud de la inundación. Drenaje subsuperficial: constituidos por drenajes secundarios terciarios y el drenaje principal. El nivel de inundación en el drenaje principal controla el nivel en los demás drenajes. Canal secundario: colecta las aguas de la napa freática y superficial hacia el principal. Canal terciario (acequia de drenaje): drena la napa freática a cierto nivel para que las raíces de las plantas se desarrollen. Drenaje superficial: para eliminar el exceso de agua de lluvia sobre las parcelas Acequia de colector: recibe la escorrentía y desemboca en el canal terciario. Camas o surcos con gradiente: elevaciones de suelos entre dos surcos formados por amontonamiento de suelo. Terraza de desagüe: usado también para control de erosión en terrenos de hasta 15%. Con un talud suave se facilita el drenaje de agua sobre el canal de la terraza. Melgas en contorno: apropiadas en terrenos casi planos. El ancho puede alcanzar hasta los 100mts con profundidad máxima de agua de 10 cm.

Fuente: Elaboración propia.

A.14 Manual de Control de Erosión, Chile (2004).

El manual se desarrolla para atender los procesos de erosión y degradación de suelos que afectan aproximadamente al 45% de los suelos de Chile. Se aplica el proyecto en 120 ha de las microcuencas de Alto Loica Comuna de San Pedro. Para el desarrollo del manual siguieron los siguientes pasos:

- 1) Caracterización edafoclimática del área.
- 2) Estimación del comportamiento hidrológico de la microcuenca.
- 3) Evaluación de las áreas degradadas.
- 4) Evaluación del estado de degradación.
- 5) Cartografía del área degradada.
- 6) Determinación de los criterios de intervención.
- 7) Selección de los tratamientos de control de erosión.
- 8) Ejecución, supervisión y mantenimiento de los tratamientos.

Los resultados del proyecto indican que la combinación de técnicas de control de erosión y de forestación con enfoques integrales a nivel de microcuenca, permiten recuperar de forma sostenible las zonas afectadas. Para dar mayor entendimiento al conjunto de tratamientos empleados se muestra en Tabla A.14 una síntesis de los mismos.

A.15 Manual de Bioingeniería, Honduras (2008).

El manual de Bioingeniería es desarrollado en colaboración de la Cruz Roja Hondureña y la Cruz Roja Suiza en el proyecto de fortalecimiento en la gestión de riesgos. Son introducidos los conceptos de estabilización biotécnica para referirse a la utilización combinada de materiales vegetales vivos y componentes mecánicos o estructurales inertes como hormigón, madera, piedra, geotextiles y geomallas. Mientras que la bioingeniería del suelo se basa en la utilización de plantas completas o tallos, fracciones de tallos, raíces o ramas con capacidad de enraizar y desarrollar una planta adulta completa como elementos principales y únicos en la estabilización de taludes. Cabe destacar, que el éxito de las técnicas asociadas principalmente al establecimiento de especies vegetales encuentra las siguientes limitaciones:

- 1) Época de siembra:** es ideal en semanas anteriores a las épocas de lluvia a no ser que se cuente con sistemas de riego.
- 2) Pendiente del talud:** en taludes con pendientes altas deben colocarse elementos de anclaje para pastos y bermas para árboles, en pendientes fuertes se siembran arbustos para disminuir la fuerza del viento sobre ellos.
- 3) Material del Talud:** si los materiales son muy duros se requiere excavación y fertilizantes para la siembra.
- 4) Ubicación:** los taludes que reciben el sol por la mañana presentan mejores condiciones para la siembra.

Finalmente, el manual expresa el éxito de la bioingeniería para controlar la erosión del suelo y los movimientos superficiales del subsuelo. Hace énfasis en que si una estructura de bioingeniería se establece bien es capaz de fortalecerse en el tiempo. Adicionalmente, al usar materiales locales como vegetación y rocas su costo es reducido y no depende de insumos importados. En la Tabla A.15 se exponen las técnicas planteadas en el manual junto con los propósitos de cada una.

Tabla. A.14. Prácticas planteadas en el Manual de control de erosión para el manejo de cuencas hidrográficas.

Tipo de proyecto: Manejo de Cuencas Hidrográficas	Tratamientos de control de erosión		Objetivo
	Regulación de Flujos Hídricos	Canal de desviación o difusión de aguas	Regulares caudales máximos de escorrentía superficial.
		Canal longitudinal de sacos de tierra	En áreas de escurrimiento superficial moderado y medio, para evacuar el agua de los taludes y entregar en disipadores.
		Canal transversal simple	Para evacuar y regular escorrentía moderada en caminos operacionales de pendientes escarpadas y medianas.
		Canal transversal compuesto	Evacuar flujos hídricos de caminos, terrazas agrícolas y forestales.
	Incremento de la Infiltración	Zanjas de infiltración	Disminuir la cantidad y velocidad de escorrentía superficial, retener sedimentos removidos y aumentar la infiltración del suelo especial para zonas semiáridas.
		Terraza forestal	Retienen y disminuyen la velocidad de las aguas de escorrentía, acumulan los sedimentos y aumentan la infiltración. Apropiado en laderas de pendientes moderadas con erosión tipo laminar.
	Obras lineales de laderas y taludes	Postes de madera	Disipan la escorrentía superficial, reducen la velocidad de flujo hídrico, acumulan sedimentos. Apropia para laderas con pendientes moderadas y escarpadas no favorable en taludes de derrubios y suelos pedregosos.
		Fajinas de sarmientos	Disminuir la erosión superficial en taludes de pendiente moderada. No es apropiada para taludes de derrubios y suelos pedregoso.
		Fajinas de ramas	Se ubican ramas trenzadas para disipar la escorrentía y retener sedimentos en pendientes escarpadas y moderadas.
		Sacos rellenos de tierra	Sacos en corrida espaciados según la pendiente de 0,8m a 3m disipan la escorrentía y retienen sedimentos.
		Revestimientos de Neumáticos	Disipar la escorrentía superficial, reducir la velocidad de flujo hídrica y acumular sedimentos. Permite conducir el flujo hídrico de la cabecera de las cárcavas hacia los canales de evacuación en taludes de pendientes moderadas y mediana. Se cortan a la mitad y extienden.
	Cubiertas Superficiales	Esteras de especies	Disminuir el impacto de la gota de lluvia, reducir el flujo superficial, evitar la compactación acelerada del suelo, captar la humedad atmosférica y minimizar el arrastre y desecación de semillas. Generalmente se realizan entre los intervalos de los tratamientos lineales, por ello son obras compuestas. Adecuado para áreas degradadas con pendientes moderadas y escarpadas.
		Ramas de Eucalipto	Objetivos similares a las esteras, la cubierta es favorable para disminuir los efectos erosivos de la escorrentía por su efecto amortiguador. Sin embargo, según su espesor y germinación pueden presentar restricción en la germinación de las especies herbáceas.
		Cañas de maíz	Tratamiento de propósitos similares a las esteras, que se ubica como obra compuesta entre intervalos de tratamientos lineales.

Continuación Tabla. A.14. Prácticas planteadas en el Manual de control de erosión para el manejo de cuencas hidrográficas.

Tipo de proyecto: Manejo de Cuencas Hidrográficas	Tratamientos de control de erosión		Tratamientos de control de erosión
	Regulación de Flujos Hídricos en Cauces	Dique de postes de madera	Resistir la socavación del lecho de las cárcavas, estabilizar las pendientes del lecho en las cárcavas, y preparar la plantación y siembra en las cárcavas.
		Dique de estructuras gavionadas	Amortiguan el impacto del flujo hídrico en bruscos cambios de pendientes y en riberas de cursos de agua, disminuyen la velocidad del agua, limpian y filtran las impurezas de los flujos hídricos.
		Disipadores	Amortiguar el impacto del flujo hídrica en bruscos cambios de pendientes, disminuir la velocidad del agua, evitan el socavamiento en cauces y bases de taludes.
	Control y estabilización de taludes	Estructura de postes de madera	Ubicadas sobre el talud en forma de rombo y triángulo con sacos de malla sombra rellenos con tierra y semillas. Usado en estabilización de taludes de pendientes moderadas y escarpadas, no es recomendable para taludes de derrubio o inestables.
		Malla de sombra	Usado en estabilización de taludes de pendientes escarpadas, con procesos de alta escorrentía superficial. Se empareja el talud, se extiende y fija la malla sombra para rellenarla con tierra y semillas y se ubica una cubierta superficial.
		Muro de sacos rellenos	Colocados en corridas horizontales para ser sembrados con semillas de pastos. Permiten estabilizar taludes y cárcavas, evitar la socavación en la base de los taludes y moderar el impacto del flujo de agua directo de los cauces.
		Muro de neumáticos	Permiten estabilizar taludes y cárcavas, evitar la socavación en la base de los taludes y moderar el impacto del flujo de agua directo de los cauces. La primera fila se alambra a postes horizontales y las siguientes se rellenan de tierra.
		Muro de postes de madera	Empleado para estabilizar taludes y cárcavas, evitar la socavación en la base de los taludes y moderar el impacto del flujo de agua lateral de los cauces. Alternancia de postes de madera verticales y horizontales cubiertos con un muro de sacos de yute en el interior.
	Biológicos	Hidrosiembra	Vegetalizar áreas con erosión severa en taludes de pendientes escarpadas complementado con tratamientos lineales complementarios.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A.15. Técnicas de bioingeniería planteaas para gestión de riesgo.

Tipo de Proyecto: Gestión de Riesgo	Categorías		Técnicas	Objetivos
	Construcciones vivas	Técnicas de revegetación específica	Barrera de Pastos	Atrapar la sedimentación, capturando el material que desliza por el talud. Refuerza el suelo encima del drenaje protegiendo el talud en la cima o base
			Control de la Erosión Superficial con Pasto Vetiver	Siembra densa de pasto vetiver en todo el talud. Captura El material erosionado que baja por el talud, refuerza el talud a una profundidad de 300 mm con un denso tapiz de raíces fibrosas, protege La superficie del talud del impacto de las gotas de lluvia e impide la socavación alrededor de las obras de ingeniería.
		Plantas leñosas utilizadas como refuerzo y como barreras para la contención del suelo	Barreras vivas	Tallos de árboles y arbustos que se entierran para que rebroten las raíces. Recomendada para estabilizar deslizamientos pequeños y asentamientos debido a exceso de humedad en el suelo.
			Fajinas/ Fajinas de drenaje	Manojos de ramas en ubicadas en zanjas horizontales (de distintas direcciones) usadas como barreras en el talud que disminuyen la velocidad de la escorrentía y atrapan sedimentos. Reducen la longitud efectiva de la pendiente, ya que producen un escalonado de la misma y son utilizadas en obras de poca pendiente.
			Escalones de Matorral	Ramas leñosas dispuestas en zanjas permiten reforzar el suelo e incrementar la resistencia a los deslizamientos y a los movimientos rotacionales. Retienen sedimentos, actúan como drenajes horizontales y aumentan la infiltración.
			Capas de ramas y suelo para rellenar cárcavas o cubrir laderas	Para rellenar cárcavas alternando capas de ramas y de suelo compactado. Las ramas una vez desarrollan raíces y follaje actúan como protección definitiva para la erosión de la cárcava. Se recomienda utilizarlo solamente en cárcavas poco profundas, de máximo 60 centímetros de profundidad y máximo 10 metros de longitud.
			Mini Barreras vivas de control	Se establecen dentro de las cárcavas de material leñoso para reducir la pendiente efectiva, atrapando los sedimentos y disminuyendo la escorrentía.
	Construcciones mixtas	Asociación de estructuras inertes y plantas	Barreras de piedras intercaladas con vegetación	Capa de piedras, bolón y pequeñas rocas cuidadosamente colocada para prevenir la erosión y socavación de la base del talud. Los espacios entre piedra se rellenan con tierra y se siembra pasto a 150mm entre plantas.
			Zampeado de piedra con vegetación	Recubrimiento de roca en la base del talud a modo de mampostería, a medida que se construye se colocan retoños de pasto en los espacios entre rocas. Fortalece la base del talud para prevenir la erosión y la socavación que pueden conducir a un retraimiento gradual del talud. Crea una barrera fuerte en la base del talud y atrapa el material de erosión de la parte superior del talud para que no entre al desagüe. No es adecuado para taludes de relleno sueltos y no consolidados o con tendencia a desplomarse.
		Plantación de leñosas en aberturas frontales o intersticios de estructuras de retención	Vallas de retención	Estructuras de control de la erosión y sedimentos construidas a partir de tallos / troncos de arbustos vivos que siguen creciendo una vez colocadas en el suelo o también de estacas no germinables. Evitan la erosión con su estructura física hasta que las plantas establecidas proporcionen protección permanente de la erosión, reducen la pendiente efectiva del talud. Son útiles para reforzar zonas de pendiente inclinadas y taludes de relleno, donde el exceso de humedad podría generar deslizamientos rotacionales. No recomendado en zonas de contaminación de agua o suelo y de alto tráfico de animales o humanos, pues no germinarían las plantas.

A.16 Manual de Bioingeniería, Venezuela (2017).

El manual fue elaborado por solicitud de la Gerencia Corporativa de Saneamiento y Restauración Ambiental de Petróleos de Venezuela Sociedad Anónima (PDVSA). Mediante la revisión de tipologías de bioingeniería busca ser un instrumento técnico operativo con la finalidad de orientar situaciones problemáticas de inestabilidad de terrenos en especial en escenarios propios de la empresa y sus negocios filiales. Entre los espacios comunes donde se encuentra la necesidad de recuperar áreas degradadas se encuentran las obras de construcción, vialidad, campamentos, pozos de perforación, oleoductos, gasoductos y zonas de préstamo.

Las técnicas contempladas en el manual que se muestran a modo de síntesis en la Tabla A.16 tienen como objetivo controlar los procesos de erosión en surcos y cárcavas, movimientos de masa en taludes, vertientes y laderas, así como socavación lateral y horizontal de márgenes de cauces.

En este sentido, el estudio comienza haciendo énfasis en cómo se debe abordar el tema de la restauración de áreas degradadas por procesos de erosión, comenzando por identificar los tipos de procesos, su intensidad, magnitud y extensión; la razón es erradicar la causa de los problemas y no solo tratar sus efectos. La selección de medidas de bioingeniería es agrupada dentro del manual en cuatro categorías según los escenarios de degradación: medidas de estabilización en taludes, vertientes de agua, riveras y márgenes de cursos de agua y cárcavas. Finalmente, se exponen las ventajas de la bioingeniería resaltando menos impacto ambiental en torno a su implementación al preservar también valores estéticos y paisajísticos. Otro aspecto importante es la reducción de costos, al ser medidas con mayor vida útil que se fortalecen con el tiempo y contribuyen al control de la erosión y pérdida de suelos.

Tabla 4.24. Medidas de Bioingeniería para restauración ambiental.

Tipo de proyecto: Restauración Ambiental	Técnicas				Objetivos
	Estabilización de taludes con vegetación herbácea	Tratamientos con fijadores o anclajes	Revestimiento o cobertura	Paja o Mulch.	Propiciar las condiciones favorables para que germinen las semillas de gramíneas y leguminosas previamente sembradas.
				Biomalla o biomanto.	Mallas de fibras naturales biodegradables popularmente fibra de coco que se fijan al borde del talud para protección y germinación.
				Tepes o cespedone s.	Planchas de césped que aseguran el recubrimiento inmediato del área tratada.
				Bloques articulados de hormigón o troncos.	
			Barreras	Hidrosiembra	Facilitar la siembra en taludes de difícil acceso combinada o no con geoceldas.
				Fajinas	Barreras en contorno para disminuir el grado de pendiente.
				Barreras de Vetiver	Anclajes del terreno por raíces.
				Sacos germinadores y biorrollos.	
	Tratamiento de vertientes de alta pendiente	Estrategias de fijación o anclaje de material	Bancales o terrazas		Continuas a curva de nivel o individuales por planta.
			Barreras u obstáculos		empalizadas o trinchos o con pequeños muros de concreto roca o mampostería.
			Recubrimiento		Con ramas, troncos lajas, mallas sintéticas o fibras vegetales.

Continuación Tabla 4.24. Medidas de Bioingeniería para restauración ambiental.

	Técnicas		Objetivos	
Tipo de proyecto: Restauración Ambiental		Biomedidas	1. Siembra directa de semillas. 2. Plantación de barreras vivas. 3. Plantación con estacas, ramajes. 4. Empalizadas vivas de rebrote. 5. Tierra reforzada. 6. Empedrados, zampeados o enrocados vivos, estaquillado en piedra, revestimiento poroso. 7. Reticulado con troncos. 8. Plantación de bambucillos.	
	Tratamiento de vertientes de poca pendiente	Plantaciones protectoras	Especies arbóreas.	Rústicas, pioneras, poco exigentes a calidad de sitio, sin importar su valor comercial.
			Mixtas.	Empleando varias especies, multidiversas.
			Autóctonas.	Comunidades de la zona las que realicen la plantación para exaltar el efecto social y educativo.
	Tratamiento de riberas de estabilidad media		Establecimiento de bosques riparios.	Retirándose prudentemente del margen del cauce para evitar que en caso de crecidas estos árboles queden expuestos a impacto o socavación y generen tapizas al caer.
			Plantaciones de bambú.	Su sistema radicular forma una especie de entramado reticular que favorece la estabilidad de los suelos e impide el proceso de socavación.
	Tratamiento de márgenes de cauces	Estructurales	Muros.	Colocadas en la parte inferior o basal de la margen del cauce donde recibe el principal embate de la corriente.
			Pantallas vivas o inertes.	
			Espigones y espolones.	
		Vegetativas	Esteras de matorral o colchones de ramas.	
			Tierra reforzada.	
			Muros vivientes.	
			Reticulados de troncos.	

Continuación Tabla 4.24. Medidas de Bioingeniería para restauración ambiental.

Tipo de proyecto: Restauración Ambiental	Técnicas				Objetivos
	Tratamiento de Cárcavas	Biomedidas	Toda el área de la cárcava	Cercado perimetral.	Con la finalidad de buscar el aislamiento físico, se realiza con elementos inertes o vivos.
				Cortafuego.	Franja de ancho variable entre 4.m a 8 m, sin vegetación preferiblemente o de muy poca vegetación, pero de baja combustibilidad.
			Parte alta de la cárcava	Reforestación.	Proteger con su cobertura del impacto de la lluvia, buscar aumentar tanto la infiltración del agua, como su evapotranspiración.
				Zanjas de absorción o ladera.	Trincheras o canales tabicados construidas de forma alineada a las curvas de nivel, que tienen como objeto permitir que el agua escurrida profundice en los suelos evitando o disminuyendo su pase a la cárcava.
				Canales de desviación o corona.	Canales colocados prudentemente separado de la cárcava para redirigir el flujo de agua hacia otro lugar.
			Parte media de la cárcava	Cabecera.	Es el área sometida a la erosión regresiva o remontante, donde generalmente existe un gran desnivel o caída. Para su control se recomienda un pequeño dique y un enrocado como dissipador de energía.
				Cuerpo.	La estrategia consiste en rellenarla (con tierra, rocas) siempre y cuando se haya logrado, con las medidas anteriores disminuir o eliminar el aporte de agua, de seguir fluyendo, conducir estas aguas de forma lenta evitando que adquiera velocidad con escalonamientos.
			Parte Baja de la cárcava	Estructura de captación y retención de sólidos.	Puede ser un dique o plazuela (trampa) de sedimentos acarreados desde la parte superior que forman una especie de cono de deyección.
				Estructura de evacuación de flujos líquidos y/o sólidos.	Puede ser una rampa (tramo revestido de alta pendiente) o un canal de desagüe.

Continuación Tabla 4.24. Medidas de Bioingeniería para restauración ambiental.

Tipo de proyecto: Restauración Ambiental	Técnicas				Objetivos
	Tratamiento de Cárcavas	Medidas Estructurales	Movimientos del terreno	Conformación del terreno.	Nivelar, perfilar y peinar en especial los taludes; para evitar la concentración del escurrimiento en la superficie del terreno.
				Abatimiento de la pendiente.	Disminuir la inclinación del terreno buscando reducir el ángulo de fricción interna -ángulo de reposo del material- acción que contribuye a su estabilidad.
				Remoción de tierra de la parte superior.	Eliminación de parte del material, ubicado en las cabeceras de taludes con el objeto de disminuir la sobrecarga y las tensiones.
				Trazado de bermas, bancales o terrazas.	Cortar el terreno, disminuyendo la línea de máxima pendiente o perfil y su longitud, a efecto de suavizar el ángulo de reposo y disminuir sobrepeso del talud o vertiente.
			Medidas de contención	Muros.	Ubicados en contorno a curvas de nivel que constituyen un soporte al plano inclinado del terreno. Pueden ser de materiales vivos o muertos.
				Pantallas.	Recubren la superficie inclinada del terreno formando losas delgadas, ancladas a él a través de diferentes mecanismos. Su objetivo es la fijación del talud. Pueden ser de concreto, mallas con cable o mallas retículas vivas.
				Diques.	Pequeñas presas localizadas en los cauces o cárcavas se colocan varios diques formando una serie escalonada que permite reducir la velocidad de flujo del agua y retener sedimentos.
			Medidas de drenaje	Drenaje superficial.	Canales de desvío o corona: colocados en la parte superior del área a tratar, con el objeto de interceptar y redireccionar el escurrimiento, evitando su ingreso al área de interés pueden ser Canales de desagüe: conducen el agua desde el área tratada hacia abajo. Canales colectores: conducen el agua desde los desagües hacia abajo por grandes desniveles.
				Drenaje subterráneo.	Zanjas rellenas filtrantes: trincheras rellenas de material granular perforadas por tuberías que permiten drenaje Drenes vivos: material vegetal vivo generalmente bambú anclados con trinchos Dren de penetración: tuberías que perforan el terreno con el fin de abatir o rebajar el nivel freático Drenes verticales: colocados en estratos impermeables que impiden el movimiento de agua, para conducirla hasta el estrato permeable.

Continuación Tabla 4.24. Medidas de Bioingeniería para restauración ambiental.

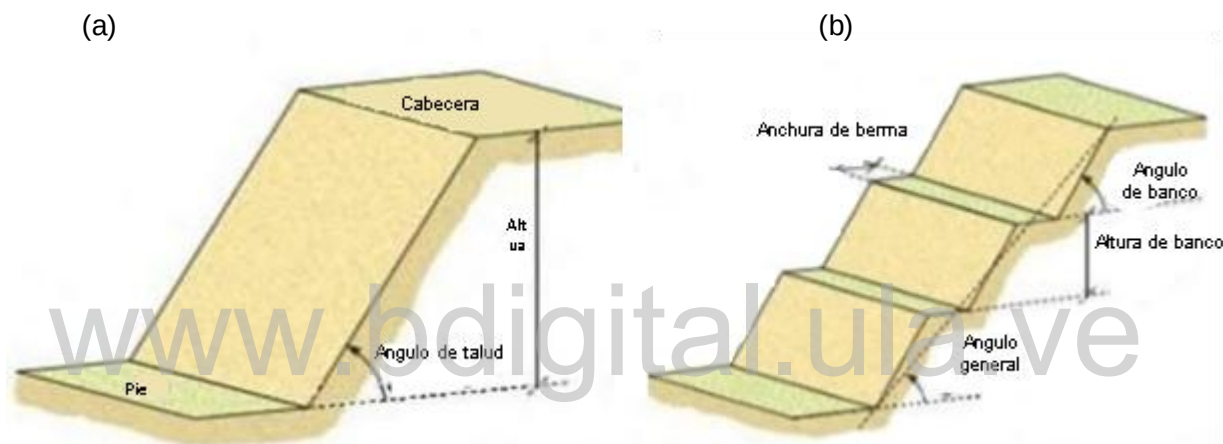
		Medidas Estructurales	Medidas de anclaje	Pilotes	Elementos de concreto armado prefabricados simulando a postes o columnas cilíndricas que se atravesando el perfil del terreno de manera que penetre la línea de falla de los deslizamientos en especial los de tipo rotacional.
				Anclajes atirantados.	Dispositivos para fijar masas de suelos o rocas inestables, evitando su desprendimiento. Pueden ser perforadas o barrenados previamente, hincados u otras alternativas.
			Obras especiales	Cercado de protección.	Para aislar el área problemática evitando la entrada del ganado. Con esto se busca reducir la compactación de los suelos, en especial si hay sobrepastoreo y permitir así, el restablecimiento de la vegetación natural protectora. Los más usados son los estantillos de madera con alambre de púas o barreras vivas.
				Adoquines articulados.	Estructuras conformadas por bloques o placas especiales, generalmente prefabricadas de concreto, adosadas a la superficie del área tratada a manera de revestimiento, unidas por dispositivos flexibles, lo que las hace articuladas. En las aberturas entre placas se colocan plantas (generalmente herbáceas como gramíneas u otras).

Apéndice B.

Prácticas de control de erosión hídrica para la etapa de trabajos preliminares en proyectos de refinación petrolera.

B.1 Estabilización de taludes y laderas.

El trabajo de estabilización de taludes generados por movimientos artificiales de tierra o laderas con declives y formas forjadas por fenómenos geológicos naturales debe iniciarse siempre por la caracterización pertinente del área. Es decir, por la búsqueda e identificación de los aspectos físicos como geología y suelo, así como también de la geometría del talud o ladera representada por la pendiente (grado e inclinación), longitud, extensión, área y forma (cabecera o corona en su parte superior, pie o base y bordes o extremos). (Figura B.1)



Fuente: Gonzales (2004) en Vidal (2017).

Figura B.1. Talud, tipos y partes, (a) talud sencillo y (b) talud complejo.

Luego de efectuada la caracterización del área se procede a identificar cuáles son las prácticas apropiadas a seleccionar para conseguir su estabilidad según los problemas presentados. En este escenario para abordar la estabilización de taludes se plantean las pautas en primer lugar para el diseño de la forma del talud, modificación de pendientes. Posteriormente, las obras de manejo de aguas de escorrentía y subterránea; seguidas del diseño de las obras de protección de la superficie del terreno mediante bioingeniería y revestimientos.

B.1.1 Modificación de pendiente.

Conformación del terreno.

Permite nivelar los, perfilar y peinar los taludes a objeto de emparejar u homogeneizar el terreno; compensando, las elevaciones existentes, como rocas, montículos, con las depresiones; hundimientos, así como surcos y pequeñas cárcavas. De esta manera se puede evitar la concentración del escurrimiento en la superficie del terreno que pudiera desencadenar grandes procesos de erosión, así como el posible desprendimiento de material grueso suelto. Es realizado por lo general de arriba hacia abajo.

Función de la conformación del terreno		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
	Captura		Efectividad en control de erosión Baja a media al ser elemento preventivo.
	Drena		Beneficios a largo plazo considerables Disminuye la probabilidad de procesos de erosión reduciendo impactos y costos a futuro.
	Refuerza		Tecnología y mano de obra accesible Requiere de mano de obra no especializada.
	Protege La superficie del talud del fácil desprendimiento de partículas sueltas.		Fácil disponibilidad de insumos Accesibles sobre todo si se realiza de manera manual.
	Mejora La distribución de la trayectoria del agua de escorrentía.		Bajo costo de Mantenimiento No aplica al ser una obra previa.
			Material no inflamable No emplea material inflamable por sí mismo.

 Cumple
  No cumple
  Neutral

Remoción de material.

Referida a la extracción y remoción del material de la corona o cabecera del talud, con el propósito de disminuir la sobrecarga y las tensiones ejercidas por el peso del mismo. Puede incluir remoción de malezas y vegetación de porte alto que ante la acción del viento promueva mayor sobre carga en el talud.

Función de la remoción de material		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
	Captura		Efectividad en control de erosión Baja a media al ser elemento preventivo.
	Drena		Beneficios a largo plazo considerable Disminuye la probabilidad de deslizamientos.
	Refuerza		Tecnología y mano de obra accesible Requiere de mano de obra no especializada.
	Protege		Fácil disponibilidad de insumos Accesibles sobre todo si se realiza de manera manual.
	Mejora La estabilidad del talud ante el deslizamiento del terreno.		Bajo costo de Mantenimiento No aplica al ser una obra previa.
			Material no inflamable No emplea material inflamable por sí mismo.

 Cumple  No cumple  Neutral

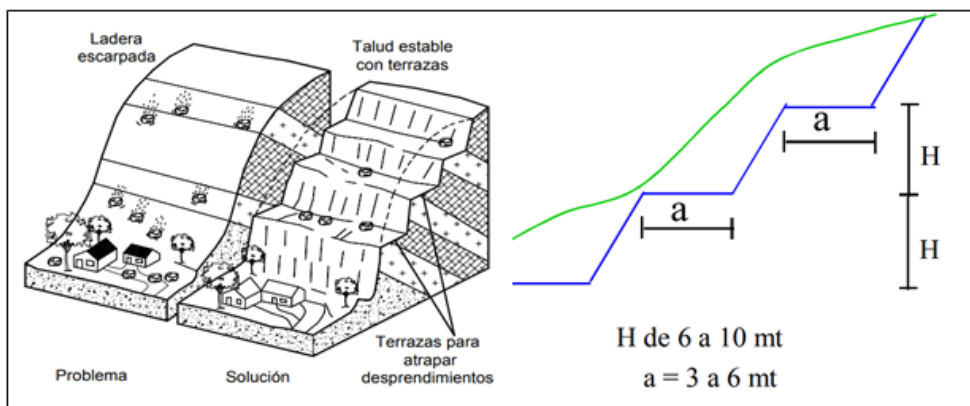
Bermas, bancales o terrazas.

Corte realizado disminuyendo la línea de máxima pendiente o perfil y su longitud habilitando una estructura en forma escalonada, se implementa a efecto de suavizar el ángulo de reposo y disminuir sobrepeso del talud. Su construcción debe apegarse a los sitios de cambios de pendiente o donde se requiera garantizar un factor de seguridad adecuado contra deslizamiento. Contribuye también al drenaje del terreno al aminorar la velocidad y el caudal de escorrentía con ello. Se recomienda para pendientes bruscas con altura de 6 a 10m y ancho de 3 a 6m. (Figura B.2). Para su construcción es imprescindible determinar la sección transversal de modo tal que sea mínimo tanto el volumen como la distancia de movimiento de la tierra para el terraplenado, adicionalmente la superficie de la terraza debe complementarse con medidas de protección para evitar la remoción de material.

Las bermas pueden considerarse de dos categorías. Las bermas de primera categoría o intermedias cuando se realizan en cortes de trabajos de movimientos de tierra según una línea nivel para controlar los deslizamientos y por otra parte las bermas de segunda categoría ubicadas sobre el talud para manejar el agua de escorrentía en las zonas de cambios de pendiente

Función de las bermas		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
✓	Captura Sedimentos provenientes de la corona del talud.	✓	Efectiva en control de erosión Muy efectiva si se combina con obras de protección.
✓	Drena Aguas superficiales del talud.	✓	Beneficios a largo plazo considerables Controla la erosión y además puede adaptarse para ser canal de escorrentía.
✗	Refuerza	✗	Tecnología y mano de obra accesible Requiere de mucho trabajo de maquinaria y también de mano de obra, nivel técnico relativamente alto.
✗	Protege	⊖	Fácil disponibilidad de insumos Maquinaria especializada pero generalmente disponible a nivel nacional.
✓	Mejora El factor de seguridad para el deslizamiento.	⊖	Bajo costo de Mantenimiento Medio según el área de la obra.
		✓	Material no inflamable No emplea material inflamable por sí mismo.

✓ Cumple ✗ No cumple ⊖ Neutral



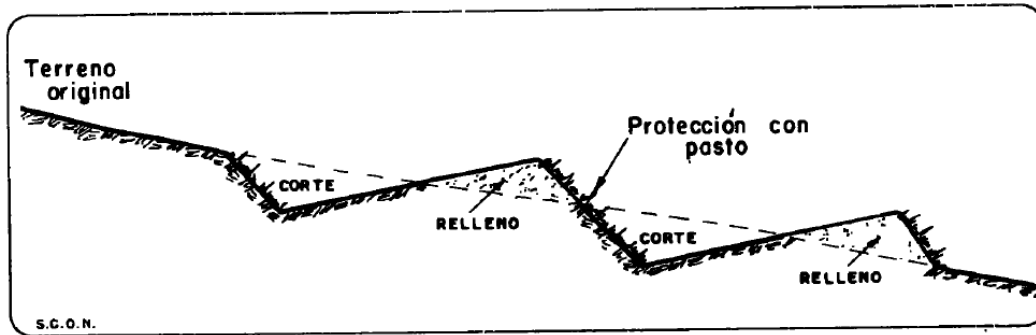
Fuente: Suarez J (2009) en Vidal (2017).

Figura B.2. Bermas, banquetes o terrazas.

Construcción.

La construcción se inicia de arriba hacia abajo, es decir de la terraza más alta hacia la más baja. La excavación manual o a máquina comienza desde la línea de centro de la berma, depositando el material excavado en la parte superior correspondiente al talud de relleno, dando forma al talud como se muestra en la Figura B.3. Así se continúa la operación, excavando en área de corte y depositando en el área de relleno, ubicando capas de suelo entre 10-15 cm para luego ir compactándolas y dándole consistencia al

talud de relleno. Los taludes de relleno deben ir terminándose con medidas de protección como geomantos, gramíneas o geobolsas, entre otras.



Fuente: Cuberos D. (1994).

Figura B.3. Construcción de Bermas.

B.1.2 Manejo de aguas superficiales.

Canales desviadores de flujo en la corona del talud.

Se construyen arriba del corte del área o estructura a tratar, su objetivo es desviar completamente la escorrentía, alejándola lo más posible de la estructura del talud. Deben implementarse alejados de la corona del área en terreno firme.

Canales de desagüe.

Conducen el agua de la parte superior del área hasta las zonas bajas sin generar problemas.

Canales colectores.

Conducen el agua de los canales de desagüe hacia las zonas bajas, a través de grandes desniveles, por lo que suelen tomar formas escalonadas.

La ubicación de los canales debe ser estudiada con detenimiento para evitar causar con ellos canales secundarios empíricos que desencadenen la formación de cárcavas. Es importante distribuir sistemáticamente los canales de desagüe y colectores a fin de lograr la disipación efectiva de la escorrentía. Respecto a la sección, los canales triangulares son apropiados para áreas pequeñas y pendientes suaves, por su alta capacidad de evacuar la escorrentía. Mientras que los canales trapeziales son idóneos para lugares abruptos. En cualquiera de los casos su diseño se realiza tomando en cuenta los caudales de diseño Caudal "Q" picos o máximas para un determinado período de retorno.

Función de los canales		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
✓	Captura El agua de escorrentía y almacena momentáneamente.	✓	Efectiva en control de erosión efectiva al reducir la velocidad y el volumen de escorrentía.
✓	Drena El agua superflua reduciendo su velocidad.	—	Beneficios a largo plazo considerables Riesgos de desarrollo de cárcavas, pero mejor distribución de escorrentía.
✗	Refuerza	✓	Tecnología y mano de obra accesible Pueden ser construidos de forma manual con mano de obra no especializada.
✓	Protege Del efecto erosivo al reducir la velocidad del caudal.	✓	Fácil disponibilidad de insumos Pocos insumos y de fácil acceso.
✓	Mejora La infiltración en el interno del canal en lugares de baja permeabilidad.	✗	Bajo costo de Mantenimiento Requiere de constante inspección y mantenimiento.
		✓	Material no inflamable No emplea material inflamable.

 Cumple
  No cumple
  Neutral

B.1.3 Manejo de aguas subterráneas.

Los drenes de agua subterránea tienen como objeto controlar las aguas internas, especialmente en zonas de elevado nivel freático y perfiles impermeables donde la sobresaturación del suelo genera exceso de presión de poros e interrupción de la trayectoria de drenaje acarreado procesos como coladas de barro, derrumbes y hundimientos del terreno.

Zanjas rellenas filtrantes.

Corresponde a una trinchera excavada con profundidades variables. En ella se colocan tuberías de concreto o PVC; perforadas en la parte superior, con material granular filtrante bien gradado alrededor. También pueden estar constituidas por celdas y cajas reticulares envueltas en geotextiles y material granular. Una vez ubicadas las tuberías se cubren con tierra y estas disponen el agua hacia los canales de desagüe y finalmente áreas de almacenamiento. Cuando el problema se resuelve de forma sistémica las tuberías se ubican en forma de “espinas de pescado” colocando el colector principal en el centro y lateralmente los drenes secundarios. Con esto se extrae el agua subsuperficial.

Drenes de penetración.

Se penetra el terreno con tuberías de 5cm o más de diámetro perforado que se ubican con cierta inclinación (subhorizontal). Su objetivo es abatir o rebajar el nivel freático. Las tuberías suelen cubrirse con filtro para impedir el taponamiento por finos.

Drenes verticales.

Cuando se detecta un estrato impermeable que impide el libre movimiento del agua, infrayacente a un estrato permeable de buen drenaje. Se instalan drenajes que atraviesen el estrato impermeable y conduzcan por gravedad el exceso de agua hasta la zona más permeable. Pueden considerarse para ello pozos de varios metros de diámetro

Función de las prácticas de manejo de aguas subterráneas		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
	Captura		Efectiva en control de erosión Efectiva al mejorar la trayectoria de drenaje y abatir el nivel freático.
	Drena El agua a través del terreno y entre niveles impermeables.		Beneficios a largo plazo considerables Permite mejorar la estabilidad del terreno, y aprovechar el agua subterránea en caso de ser necesario.
	Refuerza		Tecnología y mano de obra accesible Requiere de maquinaria y mano de obra de nivel intermedio. Sin embargo, pueden generarse colapsos de paredes internas durante su construcción, así como inundación, por lo que requiere rapidez de implementación según épocas de lluvia y sequía.
	Protege De la sobresaturación del terreno.		Fácil disponibilidad de insumos de relativa accesibilidad.
	Mejora da conectividad de poros aumentando la permeabilidad y reduciendo la presión del agua.		Bajo costo de Mantenimiento Requiere de constante inspección y mantenimiento especialmente las zanjas.
			Material no inflamable No emplea material inflamable.

 Cumple  No cumple  Neutral

B.1.4 Protección de la superficie del terreno.

Técnicas que buscan proteger el terreno para generar condiciones óptimas a la rehabilitación ambiental bien sea mediante revestimientos o barreras de carácter físico, para referirse a obras de carácter mixto se plantean las técnicas de bioingeniería.

Técnicas Vegetativas, Bioingeniería.

Revegetación con gramíneas y barreas de piedra.

La siembra puede llevarse a cabo mediante los siguientes métodos:

1. Siembra directa: se realiza la distribución de semillas directamente sobre el terreno. Se recomienda siembra manual en pendientes no mayores del 35 % y mecánica en

pendientes no mayores al 30 %. Sin embargo, en pendientes de 32 % o más la siembra necesita soporte que permita su arraigo en el suelo.

2. Hidrosiembra: Permite proyectar la semilla en taludes de difícil acceso con más del 35% de pendiente y con rasgos de erosión severa. Consiste en la proyección mediante un cañón hidráulico (hidrosembradora) de una mezcla acuosa de semillas, mulch, fertilizante, estabilizadores y agua, que se aplica sobre el talud en una o varias etapas. Se recomienda realizar tratamientos complementarios en la superficie del talud en condiciones de alta escorrentía superficial y arrastre de sedimentos.

3. Encespedamiento o cespiones: instalación sobre el terreno de planchas o alfombras de tierra y césped precultivado para conseguir recubrimiento instantáneo. El recubrimiento es efectivo pero su costo es bastante elevado.

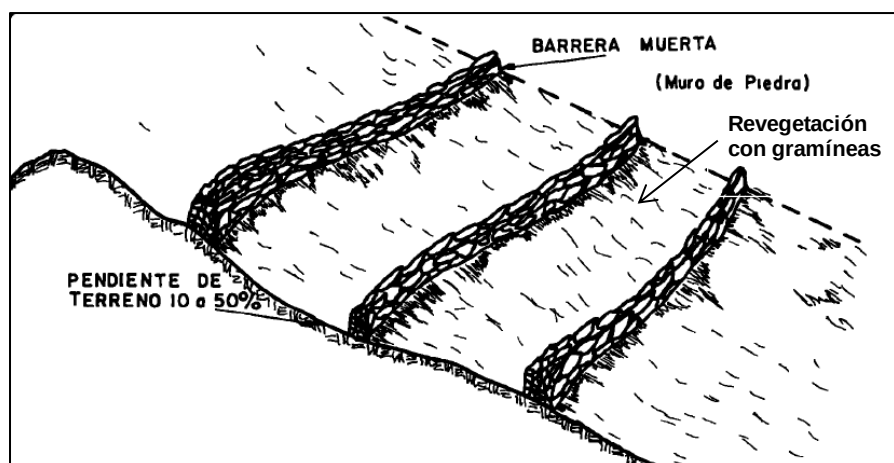
4. Siembra con geomantas: corresponde a entramados o redes bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D), usualmente elaboradas con polietileno, polipropileno o nylon, degradables o no a la luz, las mallas tridimensionales establecen un pequeño espesor de tierra vegetal para la siembra.

Teniendo en cuenta las restricciones de uso de la vegetación dentro de las instalaciones de las refinerías, solo se recomienda la revegetación con gramíneas de porte bajo con hábito de crecimiento rastrero, entre las cuales se encuentra el Maní Forrajero (*Arachis pintoii*), Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y Pasto Dulce (*Brachiaria humidicola*). De acuerdo a la densidad de crecimiento que desarrollan estas plantas la cantidad de material de combustión que puedan representar es relativamente baja. La selección de la especie dependerá de las características del suelo y del clima.

Es este sentido, para garantizar la inflamabilidad de la cobertura vegetal se plantea la combinación de la técnica con barreras de piedra a modo de franjas intercaladas sobre el talud Figura B.4. El objeto de las barreras es actuar como franjas cortafuego impidiendo la rápida propagación del mismo y retener los sedimentos provenientes de la parte superior. Adicionalmente el mantenimiento debe prever un adecuado sistema de riego para épocas de sequía que permite tanto la prevención de incendios como el éxito de implantación de la técnica.

Barreras de piedras.

Estructuras que se construyen rígidamente a contorno con el objeto de atrapar y retener en forma de deposición los sedimentos provenientes de la parte superior de los terrenos. La altura final de las barreras se puede lograr paulatinamente, superponiendo capas de piedra una vez que la cantidad de sedimentos alcance el borde superior de la barrera.



Fuente: Cuberos D, 1994.

Figura B.4 Barreras de piedra intercaladas con franjas de gramíneas.

Función de la Revegetación con gramíneas y barreras de piedra		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
✓	Captura Sedimentos de la parte superior del terreno.	✓	Efectiva en control de erosión Efectiva como técnica mixta.
✓	Drena	✓	Beneficios a largo plazo considerables Mayor valor paisajístico, protección y control de erosión y sedimentos.
✗	Refuerza	—	Tecnología y mano de obra accesible Equipo y mano de obra para hidrosiembra especial.
✓	Protege Del impacto de las gotas de lluvia la superficie.	✓	Fácil disponibilidad de insumos Usa material del terreno como piedras.
✓	Mejora La estabilidad de talud.	—	Bajo costo de Mantenimiento Requiere riego y monitoreo continuo.
		—	Material no inflamable Emplea material de baja a regular inflamabilidad.

✓ Cumple ✗ No cumple — Neutral

Revestimientos.

Geomantas o Geosintéticos.

Están representados por productos en rollo para el control de erosión RECP por sus siglas en ingles compuestos de hilos nylon o polímeros procesados. Los rollos deben fijarse en la corona del talud mediante grapas inertes, estacas o por cabillas en zanjas aperturadas de dimensiones variables y extenderse sobre la superficie (Figura B.5). Se emplean como protección en taludes, revestimiento de terrazas y canales.

Adicionalmente, suelen ser aplicadas donde la vegetación natural no puede implantarse por sí sola.



Fuente: Amanco Geosintéticos (2018).

Figura B.5. Geomantas extendidas sobre el talud.

Función de los revestimientos con Geomantas o Geosintéticos		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
✓	Captura Sedimentos	✓	Efectiva en control de erosión Efectiva al proteger la superficie de la escorrentía
✗	Drena	✓	Beneficios a largo plazo considerables Mayor valor paisajístico, protección y control de erosión y sedimentos, durable y resistente
✓	Refuerza Las condiciones de estabilidad del talud.	—	Tecnología y mano de obra accesible Rápida implantación, pero mano de obra especial
✓	Protege La superficie de la erosión al impedir el impacto de la lluvia y disminuir la escorrentía.	✗	Fácil disponibilidad de insumos Requiere pedidos de tamaños y materiales especiales de costo considerable
✓	Mejora Las condiciones de humedad del suelo.	✓	Bajo costo de Mantenimiento Alta durabilidad y poco mantenimiento.
		—	Material no inflamable Se queman, pero no actúan como combustible.

✓ Cumple ✗ No cumple — Neutral

Geomallas o Geogrillas.

Mallas plásticas con orificios de gran tamaño, los cuales se utilizan comúnmente como refuerzo de suelo y como separadores entre capas de materiales gruesos. Son empleadas en la construcción de plataformas de acceso, estabilidad de terraplenes, refuerzo de bases granulares de vías y construcción de muros de suelo reforzado.

Geoceldas.

Son estructuras en forma de panal que se abre como acordeón, creando una serie de celdas interconectadas, Figura B.6. Una vez expandidos a su máxima extensión y rellenos con suelo (o grava), la estructura se vuelve inextensible y de comportamiento compacto. Su principal función es dar estabilidad al talud evitando que los materiales se laven fácilmente con la escorrentía.

Función de geomallas y geoceldas		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
	Captura		Efectiva en control de erosión Efectiva al proteger la superficie de la escorrentía y disipar su velocidad, permite el drenaje del terreno.
	Drena las aguas subterráneas y de escorrentía a través del material gravoso.		Beneficios a largo plazo considerables Mayor valor paisajístico, protección y control de erosión y sedimentos, durable y resistente.
	Refuerza La estabilidad de los materiales del talud.		Tecnología y mano de obra accesible Rápida implantación con mano de obra especializada.
	Protege La superficie de la erosión al impedir el impacto de la lluvia y disipar la escorrentía.		Fácil disponibilidad de insumos Requiere de solicitud de geomalla/geoceldas de tamaño específico y una cantidad considerable de gravas o suelo para ser rellena. Los costos pueden ser muy elevados según el área a cubrir.
	Mejora La estabilidad de terraplenes y vías de acceso.		Bajo costo de Mantenimiento Alta durabilidad y poco mantenimiento.
			Material no inflamable Se queman, pero no actúan como combustible.

 Cumple  No cumple  Neutral



Fuente: Amanco Geosintéticos, 2018.

Figura B.6. Geoceldas extendidas sobre la base del talud.

B.2 Estabilización de zonas afectadas por la extracción de material de préstamo.

Con el objeto de reducir al máximo la afectación de las áreas seleccionadas para la extracción de material de préstamo se recomienda realizar las siguientes actividades:

- 1. Elegir adecuadamente los lugares para el depósito de material de corte**, para estimar con exactitud el volumen a extraer.
- 2. Los movimientos de suelo deben ser perfilados según la morfología del entorno**, para evitar desarrollar cambios de pendientes abruptos que desencadenen deslizamientos y erosiones.
- 3. Estabilizar los materiales sueltos en los taludes de préstamo para que los mismos sean expuestos en el tiempo mínimo necesario a la erosión.** Algunos métodos de estabilización posibles son trincheras de sacrificio (zanjas a contorno para capturar sedimentos y aumentar la infiltración), biomantas (mantas en rollo de fibras degradables como fibra de coco), Fajinas con tubos de geotextil (barreras ubicadas a contorno) y todas las nombradas anteriormente para taludes y laderas. Las áreas deben ser controladas a medida que avanza la extracción.
- 4. Establecer obras de sistemas de drenaje** que permitan reducir la presión de agua superficial y subterránea.
- 5. Realizar un plan de abandono paulatino** del área donde se prevean actividades para la restauración original en caso de ser posible con vegetación nativa adaptable al entorno y protecciones fijas.

B.3 Estabilización en caminos.

Los caminos de acceso resultan como las primeras perturbaciones realizadas cerca y dentro del área destinada para el proyecto, pues desde el inicio cuando se realiza la remoción de la capa vegetal, el terreno queda expuesto a procesos de erosión. Las actividades que motivan los efectos más significativos están asociadas al paso de vehículos, corrida de líneas sísmicas y el establecimiento de campamentos base. También, se considera el movimiento de personas relacionadas con los trabajos del proyecto, además de lugareños atraídos por de fácil acceso de nuevos caminos. Por tal motivo antes del diseño de prácticas de control de erosión, es necesario planificar cuidadosamente el desarrollo de los caminos, ubicándolos en la medida de lo posible lejos de pendientes empinadas, áreas propensas a deslizamientos, y áreas que requieran mucho corte o relleno.

Caminos acceso definitivo.

Son aquellos que permiten la entrada a instalaciones como campamentos, plantas de almacenamiento, distribución, tanques y unidades de procesos. Generalmente son compactados y recubiertos por materiales asfálticos o de hormigón. En estas áreas hay un tráfico importante de vehículos de transporte y carga pesada. Adicionalmente, los taludes de corte natural circundantes han sido transformados a taludes inestables con procesos de deslizamientos, para su estabilización se deben diseñar las siguientes obras:

1. Canales de aguas superficiales: la red de drenaje debe diseñarse para evitar la concentración de caudales y minimizar el recorrido del agua en la vía. Los canales longitudinales siguen el sentido de avance de la vía y los transversales captan el agua procedente de los canales longitudinales.

2. Alcantarillas: ductos que desplazan el agua de un lado al otro de la vía. El diámetro y forma debe ser calculado según el área hidráulica, dejando entrar y salir el agua de forma fluida.

3. Badenes: Obras de drenaje transversal, que presentan depresiones según las características de las carreteras, permitiendo el paso de los vehículos y el agua de drenaje superficial.

Caminos de acceso temporal

Permiten el acceso a zonas especiales por un periodo o tiempo definido, están afectados por estar desprovistos de material vegetal u orgánico protector, el flujo tráfico puede ser bastante variable desde personas, a vehículos de carga liviana y pesada. Para su estabilización se recomienda:

1. Reconstitución de la red de drenajes: con el objeto de reconstituir los planos de drenaje originales, evitando en lo posible la concentración de caudales y minimizar el recorrido del agua en el camino abierto. El agua recolectada deberá ser evacuada siempre a sectores estables mediante badenes distanciados según la pendiente. Pueden establecerse cada 30 m en pendientes de 2 % a 6m de separación en pendiente de 30%.

2. Recubrimiento con suelo orgánico y material vegetal: en forma proporcional una vez se concluye la reconstrucción parcial de la topografía se cubre la vía con suelo orgánico y material sobrante de la limpieza del perímetro como troncos o rocas.

3. Inaccesibilidad de caminos: una vez finalicen las actividades preliminares programadas para la implantación del proyecto deberá procederse a la clausura de los caminos temporales para evitar la recurrencia de cualquier persona o vehículo a dichas zonas. Pueden promoverse el retiro de los puentes claves instalados y levantarse barreras con material inorgánico.

Apéndice C.

Prácticas de control de erosión hídrica para la etapa de construcción en proyectos de refinación petrolera.

C.1 Tratamiento de cárcavas.

Las cárcavas son producidas por la socavación repetida sobre el terreno debido al flujo lineal concentrado del escurrimiento superficial, su presencia indica un estado de erosión avanzada. Dentro de los proyectos de refinación petrolera especialmente en la fase de construcción ciertas actividades predisponen la aparición de cárcavas entre la cuales se ubican la deforestación requerida para la implementación de la obra, el trazado de caminos por lugares geológicamente inestables y sin obras colectoras de aguas de escorrentía, excavaciones para canales que descargan en zonas desprotegidas, oleoductos y tuberías; además de niveles sobresaturados del suelo debido a la presencia de aguas sub superficiales naturales. El tratamiento de cárcavas debe enfocarse solucionar dos aspectos, iniciándose por el control del agua de escorrentía que produce los fenómenos de erosión superficial, interna y desmoronamientos, seguido de la retención del material suelto depredado, transportado y sedimentado por el agua.

El tratamiento de cárcavas parte entonces por su caracterización, identificando longitud, ancho, profundidad y pendiente. Lo que permite estimar la capacidad volumétrica o en otras palabras su tamaño. De esta manera las cárcavas se clasifican según su tamaño en someras cuando la profundidad es menor de 1 m, medianas cuando la profundidad varía entre 1 y 5 m y grandes cuando tienen más de 5 m de profundidad. Una vez conocido su tamaño se procede a la selección de las prácticas para el control de erosión.

Tratamiento de cárcavas someras.

En cárcavas de pequeñas dimensiones se recomienda recubrir con tierra, una vez recubierta debe realizarse a la nivelación con relación a las áreas adyacentes e implementar obras de canalización o infiltración de escorrentía que impidan la reiniciación del proceso.

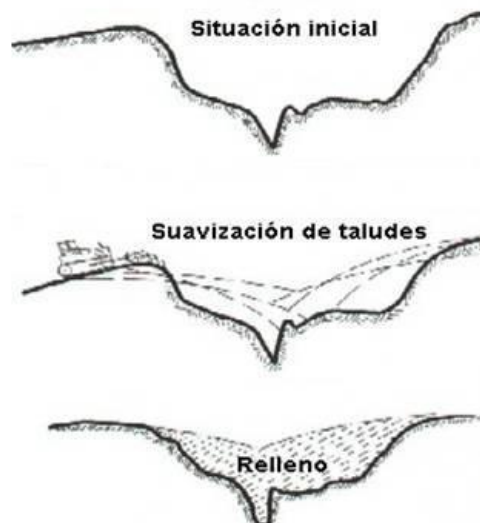
Tratamiento de cárcavas medianas y grandes.

- 1. Aislamiento de la cárcava:** debe realizarse una cerca alrededor de la cárcava a una distancia de dos veces la profundidad de la misma desde el borde, para prevenir la entrada de personas y elementos que destruyan las estructuras de control dentro de la cárcava. El cercado es común tanto en material vivo como inorgánico sin embargo por la naturaleza del proyecto se requiere material no inflamable por lo cual se recomienda estacas metálicas con alambre de púas con tres o cuatro pelos.

Función de cerca de aislamiento		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
✗	Captura	⊖	Efectiva en control de erosión Permite aislamiento más no control por sí misma
✗	Drena	✓	Beneficios a largo plazo considerables Mayor éxito de las obras de control
✗	Refuerza	✓	Tecnología y mano de obra accesible Rápida implantación con mano de obra no especializada.
✓	Protege El área afectada para la implementación de técnicas.	✓	Fácil disponibilidad de insumos Sencillos y de fácil acceso.
✗	Mejora	✓	Bajo costo de Mantenimiento Poco mantenimiento de carácter temporal
		✓	Material no inflamable Puede construirse de materiales no inflamables

✓ Cumple ✗ No cumple ⊖ Neutral

2. Suavización de taludes: para el control de cárcavas menores a intermedias se recomienda suavizar la pendiente del talud interno. Para ello se remueve la tierra desde la orilla de la cárcava hacia adentro, transportándola hasta obtener una forma parabólica que permita atravesarla con máquinas para la compactación. Generalmente son el paso previo a la implantación de prácticas de control complementarias que eviten la reincidencia de la erosión (Figura C.1).



Fuente: Ruiz R (2014).

Figura C.1. Suavización de taludes de cárcavas.

Función de suavizar taludes de cárcavas		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
	Captura		Efectiva en control de erosión disminuye la inestabilidad de material dentro de la cárcava, pero requiere de una práctica complementaria para evitar el reinicio de la erosión.
	Drena		Beneficios a largo plazo considerables mayor éxito de las obras de control.
	Refuerza el área interna de la cárcava.		Tecnología y mano de obra accesible rápida implantación con mano de obra no especializada.
	Protege		Fácil disponibilidad de insumos requiere de maquinaria para compactación.
	Mejora las condiciones internas de la cárcava para disminuir la remoción de material.		Bajo costo de Mantenimiento temporal como práctica complementaria.
			Material no inflamable

 Cumple
  No cumple
  Neutral

3. Canales de desviación o corona: canales construidos en la corona de la cárcava donde ocurre el aporte de agua a la misma para redirigir el flujo hacia otro lugar. Se colocan prudentemente alejados de la cárcava, considerando para sus dimensiones el área de drenaje y las condiciones climáticas de la zona que indican el caudal máximo a manejar. Es recomendada la sección trapezoidal y pendientes suaves (2 a 5 %). La descarga del agua debe realizarse en sitios protegidos o ser conducida a canales colectores con disipadores de energía. En terrenos inestables una opción apropiada es la implementación de canales flexibles revestidos con geomantas.

Función de canales de desviación o corona		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
✓	Captura La escorrentía superficial y la conduce fuera de la cárcava.	✓	Efectiva en control de erosión Disminuye la escorrentía dentro de la cárcava y por lo tanto el desprendimiento del material.
✓	Drena El área de captación hídrica más alta.	—	Beneficios a largo plazo considerables Reduce el riesgo de arrastre de sedimentos de la cárcava hacia cursos de agua, pero puede generar procesos de erosión si la descarga no se hace en medios protegidos.
✗	Refuerza	✓	Tecnología y mano de obra accesible Puede realizarse en forma manual o con máquina.
✓	Protege Las paredes internas del talud de la remoción de material.	✓	Fácil disponibilidad de insumos De fácil acceso solo de equipos para la construcción.
✓	Mejora la distribución del flujo de agua en la superficie del terreno.	—	Bajo costo de Mantenimiento requiere de mantenimiento periódico para evitar colmatación o desgaste.
		✓	Material no inflamable no se emplea material inflamable para su construcción.

 Cumple
  No cumple
  Neutral

4. Zanjas de infiltración o absorción en laderas: corresponde a un canal de drenaje con tabiques, que se instala para capturar las partículas arrastradas por la escorrentía y para hacer infiltrar el agua en el suelo. Con la finalidad de que pueda recibir de forma efectiva el agua de escurrimiento superficial y evitar su paso a la cárcava, se excava siguiendo la curva de nivel y es de tierra sin ningún tipo de revestimiento (Figura C.2). Debe considerarse que si la zanja llegara a rebozarse de agua podría derrumbar la pared interna de la zanja generando una nueva cárcava, por tal motivo es fundamental estudiar la distancia de separación y el volumen de las zanjas más adecuados. Por otra parte, de acuerdo al volumen de sedimentos estimados a capturar la estructura puede colmatarse. Para la atención de ambos casos se requiere prever una boca de descarga. El costo de implementación de la práctica es variable según la topografía del terreno aumentando para pendientes elevadas.



Fuente: Proyecto JALDA (2004).

Figura C.2. Zanja de infiltración.

Función de las zanjas de infiltración		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
✓	Captura La escorrentía superficial y los sedimentos arrastrados.	✓	Efectiva en control de erosión Alivia el efecto erosivo reduciendo el volumen de suelo arrastrado por la escorrentía.
✓	Drena El área circundante de la cárcava impidiendo que el agua entre a la misma.	–	Beneficios a largo plazo considerables Reduce el riesgo de arrastre de sedimentos de la cárcava hacia cursos de agua, pero puede generar cárcavas secundarias si se permite la colmatación.
✗	Refuerza	✓	Tecnología y mano de obra accesible Puede realizarse en forma manual o con máquina.
✓	Protege Las paredes internas del talud de la remoción de material.	✓	Fácil disponibilidad de insumos De fácil acceso solo de equipos para la construcción.
✓	Mejora La distribución del flujo de agua en la superficie del terreno, la tasa de infiltración y humedad del suelo.	–	Bajo costo de Mantenimiento Requiere de mantenimiento periódico para evitar colmatación y colapso.
		✓	Material no inflamable No se emplea material inflamable para su construcción.

✓ Cumple ✗ No cumple – Neutral

5. Ataguía sencilla: consiste en instalar una estructura de ataguía a modo de barrera en el lugar donde se origina la cárcava, también conocida como cabecera, para interceptar y hacer sedimentar las partículas de suelo erodadas. La ataguía puede ser construida con mallas metálicas, muro de piedra, geotextiles, etc. Las ataguías de mallas metálicas son apropiadas para cárcavas estrechas, las de piedra en casos donde se requiera durabilidad y las de geotextiles para cárcavas de grandes extensiones.

Función de las ataguías		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
	Captura Las partículas transportadas sedimentar. haciéndolas		Efectiva en control de erosión Controla el aporte de sedimentos por lo tanto el desprendimiento de partículas.
	Drena Puede desviar cierta parte de la escorrentía de la cárcava.		Beneficios a largo plazo considerables Relacionados directamente a la cárcava puede disminuir el área de afectación y detener el crecimiento.
	Refuerza		Tecnología y mano de obra accesible Puede realizarse de forma manual sin mano de obra especializada.
	Protege La zona interna de la cárcava del aporte de sedimentos.		Fácil disponibilidad de insumos Para la construcción de la ataguía de fácil acceso como rocas, mallas metálicas.
	Mejora La estabilidad de las paredes del talud interno al reducir el peso del material de entrada.		Bajo costo de Mantenimiento De bajo costo de implementación y mantenimiento.
			Material no inflamable Puede construirse exclusivamente de material no inflamable.

 Cumple  No cumple  Neutral

6. Presas de contención: una vez se consiga la disminución del aporte de agua mediante obras de canalización e infiltración, se busca retener los sedimentos dentro de la cárcava que pudieran desplazarse y reducir la velocidad de las aguas que logren seguir fluyendo. Para esta labor se instalan pequeños diques en serie, formando una especie de canal escalonado de fondo móvil no revestido. Estos pueden ser contruidos de concreto, mampostería en seco en gaviones, bolsacretos, entre otras (Figura C.3). La construcción de las presas debe realizarse siguiendo la consideración denominada “cabeza pie”, es otras palabras que la cota de la base de una presa, coincida con la cota del vertedor de la presa inmediata aguas abajo. Otra variación de las presas de contención son las presas filtrantes, estas se construyen con mayas de alambre y se fijan con postes metálicos o de madera enterrados en el suelo, la cimentación se rellena con piedras quedando la parte central de la estructura más baja para contener los sedimentos.



Fuente: Proyecto JALDA (2004).

Figura C.3. Presa de contención de piedras en cárcava.

Función de presas de contención y filtrantes		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
✓	Captura Parte de los sedimentos desplazados especialmente en las presas filtrantes.	✓	Efectiva en control de erosión Controla la velocidad de flujo y evitando el desprendimiento y transporte de partículas.
✓	Drena El agua que se desplaza dentro de la cárcava.	—	Beneficios a largo plazo considerables La cárcava puede disminuir el área de afectación y detener el crecimiento.
✗	Refuerza	✓	Tecnología y mano de obra accesible Manual si se emplea mano de obra especializada la implementación puede ser rápida.
✓	Protege La superficie de la erosión al disminuir la velocidad de la esorrentía.	✓	Fácil disponibilidad de insumos Se requieren insumos comunes como piedras y mallas metálicas.
✓	Mejora La estabilidad del área afectada.	✓	Bajo costo de Mantenimiento Costo de implementación variable y mantenimiento sencillo.
		✓	Material no inflamable Puede construirse exclusivamente de material no inflamable.

✓ Cumple ✗ No cumple — Neutral

7. Estructuras de captación de sólidos y evacuación de líquidos en la parte basal: esta área representa la zona de menor pendiente, en la cual el cambio brusco de relieve

permite la sedimentación de las partículas y la dispersión de la escorrentía. Pueden establecerse entonces diques trampas de sedimentos que minimicen la aparición de conos de deyección y canales de desagües o rampas revestidas para disponer el agua y evitar la socavación. Finalmente, en la Figura C.4 se muestra a modo de resumen la ubicación de las medidas de tratamiento de cárcavas en escenarios de refinación petrolera.

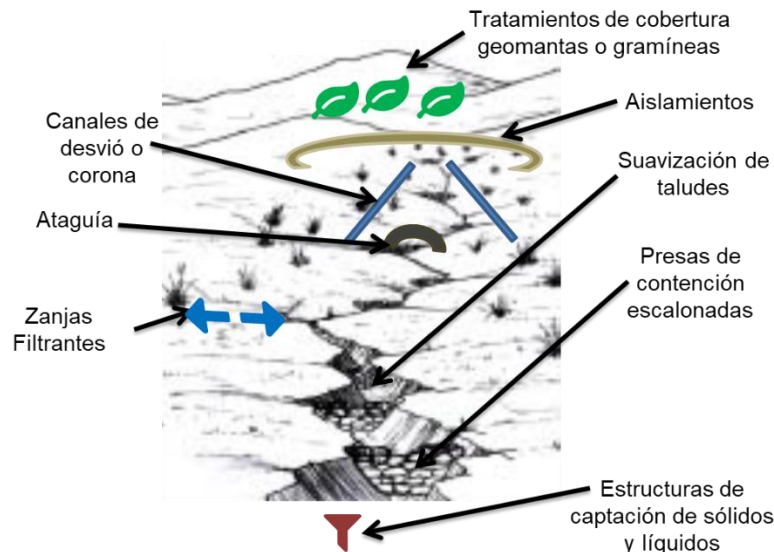


Figura C.4. Principales tratamientos para cárcavas en proyectos de refinación petrolera.

C.5 Estabilización en taludes y laderas.

Desde el inicio del proyecto las perturbaciones al medio pueden generar procesos de erosión hídrica concentrada. En este punto es posible que exista socavación en bases de taludes y laderas debido a la concentración de agua superficial y a la pérdida de resistencia de los materiales con el tiempo. Aun cuando hayan establecido técnicas de control en la etapa preliminar, si el mantenimiento no es oportuno su funcionamiento no impedirá la recurrencia de la erosión. Adicionalmente, las acciones propias de la fase de construcción como nuevos cortes y rellenos, instalación de fundaciones e infraestructura trae consigo posibles cambios en el régimen de infiltración, así como también en la trayectoria de distribución de la escorrentía de agua. De tal manera que son necesarias prácticas de estabilización y control en los taludes y laderas especialmente en la base para evitar el colapso del terreno. En algunos casos las obras de protección también pueden usarse como recubrimiento de canales con materiales inestables o protección de puntos de cruce de corriente y descargas de agua.

Tratamientos lineales de control de taludes y laderas.

1. Tratamiento lineal con revestimientos de neumáticos: esta práctica puede ser aplicada sobre toda la superficie del talud o ladera desde la cabecera de la obra. Su implantación se realiza a partir de la construcción de pequeñas terrazas horizontal. Es apropiada en taludes con pendientes moderadas y medianas, permitiendo captar y conducir el flujo hídrico hacia los canales de evacuación (Figura C.5). El intervalo de separación de las líneas estará en función del grado de inclinación de la pendiente. En taludes con pendientes escarpadas se aconsejan intervalos de 0,8m. Mientras que en pendientes moderadas se emplean intervalos de 3m. Para su construcción se cortan los revestimientos de neumáticos y se extienden a lo largo del terreno; se colocan estacas

cada 0,4m para alambrear los forros. Es necesario procurar que la cara interior de los revestimientos de neumáticos quede en dirección hacia el talud. Para aumentar la resistencia a la escorrentía superficial una parte del neumático debe quedar enterrada.



Fuente: Francke et al (2004).

Figura C.5. Vista general de tratamientos lineales con revestimientos de neumáticos.

Función del tratamiento lineal con revestimiento de neumáticos		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
✓	Captura Los sedimentos provenientes de las áreas superiores del talud o ladera.	✓	Efectiva en control de erosión Controla la velocidad de flujo y por tanto evita el desprendimiento y transporte de partículas.
✓	Drena El agua hacia los canales de evacuación.	✓	Beneficios a largo plazo considerables Disminución de costos al usar material de desecho, estabilización de taludes.
✗	Refuerza	✓	Tecnología y mano de obra accesible Puede realizarse de forma manual con mano de obra sencilla.
✓	Protege La superficie de la erosión al disminuir la velocidad de flujo hídrico.	✓	Fácil disponibilidad de insumos Se usa material accesible reciclable.
✓	Mejora La estabilidad del talud al disipar la escorrentía superficial.	✓	Bajo costo de Mantenimiento Sencillo y de bajo costo.
		⊖	Material no inflamable Requiere material que arde si está en concentraciones de volúmenes importantes.

✓ Cumple ✗ No cumple ⊖ Neutral

Esta obra es de fácil ejecución y mínimo costo, a pesar de emplear material inflamable, representa un riesgo mínimo pues se requiere la concentración de un volumen elevado de

neumáticos para arder de forma consistente. Al estar en franjas separadas puede controlarse rápidamente cualquier incidente y evitar la propagación del fuego.

2. Tratamiento lineal con sacos rellenos de tierra: permite disipar la escorrentía superficial, reduciendo la velocidad del flujo hídrico además de acumular sedimentos. Es adecuada para taludes de pendientes moderadas, medias y escarpadas. El espaciamiento está en función de la pendiente siendo de 0,8m en pendientes escarpadas y de 3m en pendientes moderadas. Para su construcción se requieren sacos de malla sombra con cobertura del 60%. Los sacos se rellenan con tierra y en algunos casos se siembran con semillas de gramíneas de porte bajo, alcanzando dimensiones de 0,5 * 0,3 * 0,1m. Una vez rellenos se disponen en corridas sobre terrazas horizontales (C.6).



Fuente: Francke et al (2004).

Figura C.6. Vista en perspectiva del tratamiento lineal con sacos de tierra.

En caso de taludes escarpados o en puntos de entrega de flujo hídrico se puede agregar una segunda corrida de sacos, cuidando que se traslapen adecuadamente para evitar erosión entre juntas. Vida útil de aproximadamente de 4 años.

Función del tratamiento lineal con sacos rellenos de tierra		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
✓	Captura Los sedimentos provenientes de las áreas superiores del talud o ladera.	✓	Efectiva en control de erosión Controla la velocidad de flujo y por tanto evita el desprendimiento y transporte de partículas.
✓	Drena Puede direccionar cierta cantidad de agua a los canales y permitir la infiltración.	✗	Beneficios a largo plazo considerables Solo asociados a la reducción de costos.
✗	Refuerza	✓	Tecnología y mano de obra accesible Puede realizarse de forma manual con mano de obra sencilla.
✓	Protege La superficie de la erosión	✓	Fácil disponibilidad de insumos Se usa

	al disminuir la velocidad de flujo hídrico		material accesible sacos y tierra
✓	Mejora La estabilidad del talud al disipar la escorrentía superficial.	–	Bajo costo de Mantenimiento Requiere restitución a los 4 años.
		–	Material no inflamable Si se agregan semillas para el crecimiento de gramíneas de porte bajo puede representar cierto grado de inflamabilidad, aunque de bajo volumen.

✓ Cumple ✗ No cumple – Neutral

Tratamientos de estabilización y protección en taludes y laderas.

1. Muro de sacos rellenos: usado para estabilizar áreas inconsistentes del talud, así como también amortiguar el impacto lateral de flujos hídricos en cursos de agua. Este tratamiento es adecuado en taludes donde no existan intensas presiones del suelo en la ladera. Para su construcción se rellenan sacos de malla sombra al 60% con tierra y en algunos casos se siembran semillas de gramíneas de porte bajo (Figura C.7). Se disponen horizontalmente traslapando las líneas de sacos superiores sobre las inferiores de tal manera de no dejar juntas continuas susceptibles a la erosión. Cada corrida superior de sacos se coloca aproximadamente 0,1m más hacia el interior del talud que su correspondiente corrida inferior. El muro no tiene gran resistencia en sus bordes al paso superficial del agua, por lo que se requiere la construcción cuidadosa en esas áreas. Es una medida sencilla de ejecutar, de bajo costo que se ajusta a dimensiones variables, sin embargo, su vida útil es de aproximadamente 4 años por lo cual debe considerarse su sustitución.



Vista detalle de tratamientos con muro de sacos



Vista en perspectiva de tratamiento de taludes con muros de sacos

Fuente: Francke et al (2004).

Figura C.7. Tratamiento de control y estabilización de taludes mediante muros de sacos

Los sacos también pueden llenarse de masa de mortero o de concreto que una vez permita la salida del agua de amasado fraguará dando estabilidad a la estructura en ese caso se conocen como **bolsacretos** y tienen mayor resistencia y vida útil.

Función del tratamiento lineal con muro de sacos relleno		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
	Captura		Efectiva en control de erosión Disipa la escorrentía de agua, protege del desprendimiento y contiene el material.
	Drena Modera el impacto lateral del flujo de agua.		Beneficios a largo plazo considerables Reducción de costos, controla deslizamientos que evitan accidentes y reducen la cantidad de material en suspensión.
	Refuerza El área de contacto del talud con zonas de drenaje.		Tecnología y mano de obra accesible Puede realizarse de forma manual con mano de obra sencilla.
	Protege La base del talud de la socavación.		Fácil disponibilidad de insumos Se usa material accesible sacos y tierra.
	Mejora La estabilidad del talud al contener el material.		Bajo costo de Mantenimiento Requiere restitución a los 4 años si es de tierra.
			Material no inflamable No inflamable, a menos que se agreguen semillas de gramíneas de porte bajo.

 Cumple
  No cumple
  Neutral

2. Geocolchones: es una práctica flexible y duradera para la protección de bases de taludes, revestimiento de canales y cimentaciones, donde las corrientes de agua pueden generar alta socavación o arrastre de suelos. Para su construcción se emplea una malla uniaxial de polietileno de alta densidad, sogas de polietileno de alta densidad con protección ultra violeta, canto rodado de tamaño mediano y pasadores de fibra de vidrio (Figura C.8). Este material posee ventaja sobre su resistencia mecánica, química y biológica, las cuales son aptas para trabajar bajo condiciones extremas como agua, vertimientos industriales o lixiviados, sin producir ningún deterioro o corrosión en la geomalla. Representa una opción más económica frente a los pedraplenes y gaviones convencionales de alambre de acero. Al ser relativamente livianos sus componentes se pueden transportar a zonas de difícil acceso.



Fuente: Amanco Geosintéticos (2018).

Figura C.8 Geocolchones extendidas sobre la base del talud

Función del tratamiento con geocolchones		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
✗	Captura	✓	Efectiva en control de erosión Protege del desprendimiento y contiene el material.
✓	Drena Modera el impacto lateral del flujo de agua.	✓	Beneficios a largo plazo considerables Controla deslizamientos que evitan accidentes y reducen la cantidad de material en suspensión.
✓	Refuerza El área de contacto del talud con zonas de drenaje.	✗	Tecnología y mano de obra accesible Requiere de mano de obra especializada
✓	Protege La base del talud de la socavación.	—	Fácil disponibilidad de insumos Material solicitado bajo pedidos especiales.
✓	Mejora La estabilidad del talud al contener el material.	✓	Bajo costo de Mantenimiento Poco mantenimiento y alta durabilidad.
		✓	Material no inflamable Material de alta resistencia y durabilidad, no inflamable

✓ Cumple ✗ No cumple — Neutral

3. Flexocretos: corresponde a una formaleta textil hecha de fibras de nylon y poliéster de doble capa, unida por puntos de filtración de entretejidos. Para su construcción se dispone sobre el talud y se llena en el sitio, utilizando concreto de agregado fino o mortero, con el fin de conformar una pantalla de espesor promedio de 10cm (Figura C.9). Esta práctica

permite la protección del talud contra la erosión. Adicionalmente los puntos de filtración mitigan la diferencia de presión hidrostática y reduce la velocidad de flujo. Puede ser empleado también en recubrimiento de canales, fundaciones de terraplenes de acceso, protección de drenajes y salidas de alcantarillas.



Flexocretos extendidos sobre el talud



Vista a detalle de la estructura del flexocreto

Fuente: Amanco Geosintéticos (2018).

Figura C.9. Flexocretos protegiendo el talud.

Función del tratamiento con flexocretos		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
✓	Captura El agua en los agujeros para filtración.	✓	Efectiva en control de erosión Protege del desprendimiento y contiene el material.
✓	Drena Reduce la velocidad del agua del talud al distribuirla.	✓	Beneficios a largo plazo considerables Controla deslizamientos, posee valor paisajístico, es durable, se adapta a diferentes perfiles del suelo.
✓	Refuerza El área de contacto del talud con zonas de drenaje.	✓	Tecnología y mano de obra accesible De fácil implantación, no requiere de mano de obra especializada.
✓	Protege La superficie del talud, canales y cruces de agua de la escorrentía. Aísla la base del talud de la socavación.	—	Fácil disponibilidad de insumos Material solicitado bajo pedidos especiales, pero de fácil transporte.
✓	Mejora La estabilidad del talud al contener el material.	✓	Bajo costo de Mantenimiento Poco mantenimiento y alta durabilidad.
		✓	Material no inflamable El material es de alta resistencia y durabilidad no inflamable.

✓ Cumple ✗ No cumple — Neutral

4. Empedrado: consiste en cubrir el talud con una capa de grava o piedra de cantera de aproximadamente 10 cm de diámetro. Puede emplearse en la entrada y salida de pasos

de agua, bases de taludes y como protección de canales. Es apropiada para pendientes bajas a moderadas donde la fuerza de gravedad no produzca su arrastre y pérdida de protección (Figura C.10).



Fuente: Navarro (2002).

Figura C.10. Empedrado sobre el talud

Función del tratamiento con empedrado		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
✓	Captura Parte del agua y permite su infiltración entre los espacios de las gravas.	✓	Efectiva en control de erosión Protege del desprendimiento de partículas, pero solo apta para pendientes suaves a medias.
✓	Drena Reduce la velocidad del agua del talud al distribuirla.	✓	Beneficios a largo plazo considerables Directamente asociados a la protección de la superficie del talud.
✗	Refuerza	✓	Tecnología y mano de obra accesible De fácil implantación, no requiere de mano de obra especializada.
✓	Protege La superficie del talud, canales y cruces de agua de la escorrentía.	✓	Fácil disponibilidad de insumos Materiales accesibles.
✗	Mejora	✓	Bajo costo de Mantenimiento Poco mantenimiento.
			Material no inflamable No emplea material inflamable.

✓ Cumple ✗ No cumple — Neutral

5. Adoquines articulados: estructuras compuestas por bloques o placas especiales, fabricadas de concreto o geopolímeros que se adosan a la superficie a manera de

revestimiento, son unidas por dispositivos flexibles lo que les confiere articulación. Entre las aberturas de las placas pueden colocarse plantas en este caso gramíneas.

Función del tratamiento con adoquines articulados		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
	Captura		Efectiva en control de erosión Protege del desprendimiento de partículas mejorada si se combina con gramíneas.
	Drena		Beneficios a largo plazo considerables Ocupa un espacio físico reducido aprovechando mejor el espacio, permite combinaciones que se integran mejor con el paisaje, evita movimientos importantes de sedimentos
	Refuerza La estabilidad de los materiales del talud.		Tecnología y mano de obra accesible De fácil implantación, con mano de obra de nivel intermedio
	Protege El terreno de procesos de erosión en masa.		Fácil disponibilidad de insumos Materiales solicitados a pedido de dimensiones específicas
	Mejora La cohesión de las partículas del suelo.		Bajo costo de Mantenimiento Poco mantenimiento, pero regular monitoreo, altamente resistentes
			Material no inflamable No emplea material inflamable.

 Cumple  No cumple  Neutral

Tratamientos de estabilización en taludes y laderas por anclajes.

Son prácticas orientadas a sostener terrenos con problemas de inestabilidad. Los costos de su implantación generalmente son elevados por lo que se justifica su uso solo en casos especiales.

1. Pilotes: elementos de concreto armado prefabricados, que simulan postes o columnas cilíndricas que se hincan verticalmente por golpes o percusión, atravesando el perfil del terreno de manera que penetre la línea de falla, de corte o círculo crítico de deslizamiento en especial los de tipo rotacional.

2. Anclajes atirantados: funcionan como dispositivos para fijar masas o bloques de rocas, evitando el desprendimiento. Pueden ser perforadas o hincadas. Se debe determinar su ubicación, longitud de penetración, inclinación, número y disposición; distanciamiento y densidad. De tal manera que se atraviere la superficie de falla, para su construcción se dispone una placa de apoyo sobre la superficie del talud que se perfora con el anclaje y asegura con la cabeza del mismo. Este método no es recomendado en materiales arenosos o poco consolidados.

Función del tratamiento de estabilización con pilotes y anclajes		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
	Captura		Efectiva en control de erosión protege el desprendimiento de porciones considerables de terreno
	Drena		Beneficios a largo plazo considerables dan estabilidad a superficies evitando grandes desplazamientos del suelo y daños de infraestructura
	Refuerza la estabilidad de los materiales del talud		Tecnología y mano de obra accesible requiere mano de obra y tecnología especializada
	Protege el terreno de procesos de erosión en masa		Fácil disponibilidad de insumos materiales solicitados mediante pedido, de dimensiones específicas. Costo muy elevado
	Mejora las condiciones geotécnicas del talud		Bajo costo de Mantenimiento puede requerir drenajes limpieza, refuerzos
			Material no inflamable no emplea material inflamable.

 Cumple
  No cumple
  Neutral

Protección de puntos de cruce o descargas de agua.

Disipador: representa una obra complementaria a los tratamientos de regulación, conducción y evacuación de aguas. Evita el socavamiento en bases de taludes, al recibir los flujos hídricos en bruscos cambios de pendiente. Las dimensiones de la obra dependen del caudal que requieran manejar. Se construyen con una mezcla de bolones, gravas y ripios, cercados por una estructura de postes metálicos y malla metálica de doble torsión o geomalla. Son ubicados en los puntos de descargas de agua de los canales, diques o en puntos críticos de cambios de pendiente.

Función del tratamiento de estabilización con disipadores		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
	Captura		Efectiva en control de erosión protege puntos críticos del desprendimiento.
	Drena		Beneficios a largo plazo considerables refuerza el funcionamiento de obras de control de agua superficial.
	Refuerza la estabilidad de los materiales del terreno.		Tecnología y mano de obra accesible Mano de obra y tecnología sencilla.

✓	Protege Amortigua el impacto del agua evitando el socavamiento.	✓	Fácil disponibilidad de insumos Materiales económicos y accesibles.
✓	Mejora Las condiciones de escurrimiento del agua, disminuyendo su velocidad.	✓	Bajo costo de Mantenimiento Requiere poco mantenimiento.
		✓	Material no inflamable No emplea material inflamable.

✓ Cumple ✗ No cumple — Neutral

C.6 Supervisión del manejo y almacenamiento de materiales, residuos y desechos.

Previamente se han expuesto las actividades relacionadas a la fase de construcción que pueden desencadenar procesos de erosión hídrica. Dentro de los impactos generados por estos procesos se encuentra el sellado del suelo, por esparcimiento de materiales de construcción y desechos a partir de la escorrentía. Para abordar este problema es necesario considerar dos aspectos; inicialmente la preparación de la zona de trabajo requiere la compactación del terreno, por lo tanto, existe una reducción en la tasa de infiltración. Toda lámina de lluvia que no penetra el suelo, al unirse con la escorrentía superficial aumenta su caudal tanto en volumen como en velocidad, llegando a tener suficiente energía para arrastrar partículas de suelo, materiales y desechos.

Por otra parte, el almacenamiento de combustibles y desechos puede generar niveles impermeables producto de posibles fugas además de fluidos lixiviados, estos niveles impermeables también son protagonistas en la reducción de la tasa de infiltración. En consecuencia, los tratamientos necesarios requieren controlar la escorrentía como se ha planteado en las secciones anteriores e implementar medidas preventivas para reducir al máximo la exposición de los materiales.

Pautas para el almacenamiento de combustibles y químicos.

1. Las zonas de almacenamiento deben seleccionarse en consideración con los requerimientos de drenaje, los cuales también servirán para capturar contaminantes.
2. Las áreas de almacenamiento deben encontrarse encerradas y con diques, para contener cualquier vertido y facilitar su remoción. En los casos de almacenamiento de productos, manejo y uso de combustible, así como de químicos, es muy importante tener especial cuidado con su limpieza y mantenimiento.
3. Se deben construir diques alrededor de tanques de combustible para contener fugas y accidentales y filtraciones, se recomienda que el área de contención sea de 110 % el volumen del tanque de mayor tamaño. Para el drenaje del agua pluvial de la zona deben considerarse en el diseño canales preferenciales revestidos con gravas, estos drenajes deben dirigirse a un pozo impermeable o tanque por si fuera necesario limpieza de fugas. Adicionalmente, el área de contención no deberá ubicarse cerca de los canales de drenaje para evitar la socavación de los diques o tapadas de seguridad, además deben rodearse de zanjas para aislar la escorrentía.
4. La eliminación de desechos líquidos en pozos no revestidos puede significar un riesgo de contaminación para cuerpos de agua superficial y subterránea. Se sugiere revestir los pozos con material impermeable (por ejemplo, bentonita).

5. Todas las pendientes expuestas deben cubrirse y estabilizarse con métodos de material no inflamable.

6. Los contenedores de almacenamiento temporal de combustible deberán ubicarse a 100 m de la marca de agua más alta de cualquier cuerpo de agua, de tal manera que la fuga o filtración no llegue al agua.

Pautas para el almacenamiento de materiales de construcción.

1. La selección del área de almacenamiento debe considerarse en función de su ubicación respecto al área de trabajo. La relativa cercanía reduce el trayecto de traslado en el cual se puede generar pérdida del material por carga y descarga del mismo.

2. El área debe ubicarse lejos de puntos de drenajes de agua para garantizar su protección contra el barrido del agua de escorrentía y la humedad.

3. Según las dimensiones de los materiales pueden ser almacenados en espacios cerrados protegiéndolos de la intemperie o a cielo abierto donde requieren ser recubiertos por lonas o embalajes reforzados para evitar el transporte de las partículas por la lluvia, así como también sedimentación anómala entorno a los mismos.

4. Debe evitarse el contacto directo de los materiales con el suelo disponiendo barreras protectoras como lonas o bases de materiales resistentes. Además, según sus características pueden ser almacenados en sacos (especial para aquellos que contienen líquidos y material disgregable), contenedores (para piezas pequeñas) o apiladas (para tuberías y cabillas) siempre que un tengan apoyo con suficiente resistencia.

Pautas para el almacenamiento de residuos y desechos.

Los desechos líquidos, tales como aceite de motor, aceite de desecho, grasas, entre otros; deben acumularse en contenedores para su eliminación según el plan de manejo ambiental. Por su parte los sólidos tendrán que ser separados entre orgánicos e inorgánicos. Especialmente los desechos orgánicos responsables de generar productos lixiviados deberán ser dispuestos en contenedores herméticos para ser transportados y eliminados preferiblemente a diario.

Apéndice D

Prácticas de control de erosión hídrica para la etapa de operación y mantenimiento en proyectos de refinación petrolera.

D. 1 Estabilización química de taludes.

Este tipo de estabilización es apropiada para los taludes de los diques operativos, tapadas de seguridad, caminos de servicio, carreteras sin pavimentar, además de áreas específicas que generen alta emisión de sedimentos. Se realiza a través de la aplicación de materiales o sustancias químicas sintéticas o de procedencia industrial, de carácter orgánico o inorgánico, que permiten mediante su proyección en solución acuosa sobre los taludes, medianas u otras zonas, fijar las partículas de terreno de forma que no sean arrastradas por el agua. En este sentido, existen una amplia gama de productos químicos usados para la estabilización entre ellos se encuentran las emulsiones asfálticas, las espumas de urea-formaldehído, o cementos, a los alginatos, las resinas, los aceites, la fibra de vidrio o la pasta de fibras de madera, entre otras. Además de fijar el suelo,

presentan otras propiedades como aumentar la capacidad de retención de agua y la porosidad del suelo, mejorar la estructura edáfica y sus condiciones biológicas.

Estabilización con asfalto y concreto.

Corresponde a técnicas constructivas para mejorar la estabilidad de las partículas del suelo. Para su ejecución se distribuye sobre el talud una capa de aproximadamente 40mm de concreto o emulsión asfáltica conformada por agua, asfalto y agente emulsificante generalmente betún. En ambos casos la capa actúa como recubrimiento superficial que aumenta la adherencia del suelo en el talud y permite la impermeabilización.

Función del tratamiento de estabilización con asfalto y concreto		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
	Captura		Efectiva en control de erosión Efectivo como protección, pero no soporta esfuerzos de tracción.
	Drena		Beneficios a largo plazo considerables control del desprendimiento a menor costo, pero tiene alto impacto visual.
	Refuerza La cohesividad de las partículas del suelo.		Tecnología y mano de obra accesible aplicación sencilla y rápida.
	Protege De la escorrentía al actuar como barrera impermeable.		Fácil disponibilidad de insumos Accesibles y de fácil dosificación.
	Mejora Las condiciones de estabilidad de la superficie.		Bajo costo de Mantenimiento Requiere mantenimiento para evitar su agrietamiento y disfuncionalidad.
			Material no inflamable No emplea.

 Cumple  No cumple  Neutral

Estabilización con polímeros.

Los polímeros se encuentran constituidos por una gran cantidad de moléculas denominadas monómeros que logran formar largas cadenas de macromoléculas. Según su origen pueden ser clasificados como naturales (derivados de plantas y animales), semisintéticos (producto de la modificación química de los naturales), sintéticos (obtenidos de procesos industriales conocidos también como geopolímeros) y orgánicos (fabricados a base de productos orgánicos como los derivados del petróleo y el gas). En este sentido los polímeros poseen excelentes propiedades de resistencia a temperaturas y condiciones extremas. Como estabilizantes de suelos comprenden una amplia variedad de productos que tienen la función de lubricar el suelo al momento de compactarlo. Quintana y Pérez (2022), mencionan los estabilizadores de polímeros más usados dentro del mercado comercial, mostrados en la Tabla D.1.

Tabla D.1. Especificaciones de los polímeros más empleados para estabilización

Nombre del producto	Descripción
Sika® Dust Seal PE	Su composición consta de biopolímeros de origen natural que permiten controlar el polvo en zonas y caminos no pavimentados
Z Polímeros	Compuesto por polímeros que permite una superficie más compacta, impermeable y no tóxica
AggreBind	Compuesto por polímero acrílico de estireno reticulado, que permite la estabilización de suelos, control de polvo y amigables al ambiente

Función del tratamiento de estabilización polímeros		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
	Captura		Efectiva en control de erosión efectivo para el control del desprendimiento de partículas y disgregación del suelo
	Drena		Beneficios a largo plazo considerables ecológicos, no lixivian, a prueba de agua, resistentes a fugas o químicos
	Refuerza la cohesividad de las partículas del suelo		Tecnología y mano de obra accesible no demandan equipo especializado ni mano de obra de alto nivel
	Protege la superficie de la fuerza erosiva de la escorrentía		Fácil disponibilidad de insumos varía según el requerimiento puede requerir importación
	Mejora las condiciones mecánicas del suelo		Bajo costo de Mantenimiento reducido muy localizado
			Material no inflamable no emplea material inflamable.

 Cumple  No cumple  Neutral

Estabilización con nanoformulados.

Este método combina las propiedades de las formulaciones convencionales con la capacidad de interacción a nivel molecular que tienen las nanopartículas incorporadas. La mayor interacción es producto del incremento en la superficie específica del reactivo. López y Tobías (2013), presentan el producto *SoilTek®* a modo de ejemplo práctico, la incorporación de nanohierro cerovalente “ZVI (Fe⁰)”, en el mortero de suelo cemento modifica las condiciones geoquímicas durante el proceso de fraguado con el fin de mejorar las prestaciones mecánicas. Las nanopartículas de hierro reaccionan con los coloides naturales del cemento generando una matriz dura y resistente, aún con muy bajas concentraciones de cemento: 2,5 a 4 %. De tal manera que el nanohierro actúa como aglomerante y sellador, incrementando la impermeabilidad y la cohesión molecular del suelo. Es una excelente opción para suelos con alto contenido de partículas finas activas.

Función del tratamiento de estabilización con nanoformulados		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
	Captura		Efectiva en control de erosión efectivo para el control del desprendimiento de partículas y disgregación del suelo
	Drena		Beneficios a largo plazo considerables reducción de costos al requerir menor cantidad de aditivo por unidad de volumen y minimiza el impacto de agregados no presentes en el suelo
	Refuerza la cohesividad de las partículas del suelo		Tecnología y mano de obra accesible no demandan equipo especializado ni mano de obra de alto nivel
	Protege la superficie de la fuerza erosiva de la escorrentía generando una barrera impermeable		Fácil disponibilidad de insumos varía según el requerimiento puede requerir importación
	Mejora las condiciones mecánicas del suelo incrementado la fuerza dinámica de apoyo en la cobertura		Bajo costo de Mantenimiento reduce la periodicidad de mantenimiento al dar mayor resistencia de fijación en los taludes
			Material no inflamable no emplea material inflamable.

 Cumple  No cumple  Neutral

D.2 Medidas de remediación del suelo.

El suelo representa el primer contacto ante la fuga accidental de sustancias líquidas o sólidas que pueden resultar tóxicas. Si bien el suelo no es el factor más importante en esparcimiento de contaminantes, cuando se combina con el agua se transforma en un

potente agente de dispersión de la contaminación presente. En las refinerías la presencia de instalaciones lineales para el manejo de fluidos como el petróleo, tanques de almacenamiento de productos derivados, unidades de procesos, entre otras, proponen escenarios de riesgo ante este tipo de accidentes. En este sentido, los métodos de remediación buscan controlar, disminuir o eliminar los contaminantes presentes para mejorar las propiedades físico químicas del suelo que se han visto afectadas.

Medidas de remediación in situ y ex situ.

Las técnicas de remediación aplicadas directamente sobre el área afectada, sin secar el terreno, conocidas como “*in situ*” son de menor costo, pero existen muchas dudas sobre sus resultados finales. Por su parte aquellas donde el material a tratar se lleva a un espacio confinado o en instalaciones adecuadas conocidas como técnicas “*ex situ*” se destacan por su efectividad, dado que el suelo contaminado es físicamente eliminado y el suelo nuevo que se incorpora se homogeniza con el anterior no contaminado, pudiendo controlarse mejor el proceso. Sin embargo, estas técnicas tienen un costo elevado. La elección del sistema a elegir dependerá de las características del suelo, el tipo de contaminante y la valoración de los costos (Coria, 2007).

1. Bioventilación (*In situ*): corresponde a la extracción de vapores del suelo mediante una diferencia de presión generada por el bombeo de aire desde el exterior. Se aplica en suelos no saturados contaminados con hidrocarburos. Los gases generados deben ser tratados haciéndolos pasar por filtros que contengan sustancias retenedoras adecuadas para cada gas como, por ejemplo, carbón activado. Es una técnica de bajo costo y mínimo impacto.

2. Extracción de vapores del suelo (*In situ*): Los compuestos volátiles se remueven en fase vapor del suelo mediante la obtención de un gradiente de presión por aplicación de vacío, realizado a través de pozos de extracción. Se aplica para compuestos orgánicos volátiles y algunos combustibles volátiles, pero no es adecuado para aceites hidrocarburos pesados y bifenilos policlorados presentes en sustancias como refrigerantes. No es efectivo en suelos saturados y alto contenido de finos. Es una tecnología disponible comercialmente que funciona bien en condiciones de suelo de permeabilidad alta. Los gases extraídos requieren tratamiento y los líquidos residuales tratamiento y disposición final.

3. Incineración (*Ex situ*): se considera como un método térmico que somete el suelo contaminado con hidrocarburos a altas temperaturas (1200°C) para que los contaminantes se evaporen y se quemen luego en condiciones controladas. Se requiere la depuración de gases.

4. Biorremediación por *Landfarming* (*In Situ* y *Ex Situ*): es un proceso caracterizado por el uso de las habilidades catalíticas de los organismos vivos para degradar y transformar contaminantes. La efectividad de este proceso radica en la capacidad de las enzimas producidas por las células presentes en los microorganismos para aumentar su velocidad de reacciones químicas, y a su vez reducir la masa o lodo contaminante en menos tiempo de manera natural, quedando como material inofensivo o menos tóxico para los seres humanos y el medio ambiente.

El *Landfarming* es un proceso que se realiza a gran escala tanto de forma *In Situ* como *Ex Situ*. Para su ejecución se emplean bacterias cuya función es tomar el contaminante y convertirlo mediante enzimas producidas por las células en dióxido de carbono y agua. Esta técnica es apropiada para aplicarse en suelo contaminados con petróleo de

fracciones livianas y pesadas, aun cuando requieran mayor concentración de microorganismos para estas últimas. Según Sierra (2021), se ha demostrado que la tecnología es efectiva en la remoción de productos químicos orgánicos como el benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos, en hidrocarburos totales de petróleo y en hidrocarburos aromáticos policíclicos como el naftaleno y fenantreno. Su costo es relativamente variable según su aplicación por m³.

Respecto a la eficiencia de los microorganismos varía según la composición del hidrocarburo presente en el suelo, ya que pueden ser más o menos resistentes a su degradación según sea el caso, existiendo factores ambientales que influyen como la temperatura, humedad oxígeno y nutrientes del suelo. Las bacterias más comunes observadas en el suelo corresponden a los *Bacillus* y *Pseudomonas* al igual que los *Actinomicetos* los cuales se desempeñan favorablemente en rangos de pH entre 4 y 10 y son capaces de sobrevivir ante una inundación de terreno. Estos biorremediadores coexisten con los microorganismos endógenos para la descomposición del contaminante. Cuando el entorno que está contaminado no presenta actividad biológica para su recuperación, se recurre a traer microorganismos exógenos estudiados previamente capaces de degradar el material en particular, bajo condiciones específicas como temperatura, pH y nutrientes.

5. Nanoremediación (*In Situ* y *Ex Situ*): representa un método de remediación usado para el tratamiento y limpieza de áreas contaminadas con sustancias peligrosas. Permitiendo la reducción de los contaminantes y la prevención de la erosión del suelo. Para su ejecución se emplean nano materiales reactivos para la transformación de los agentes contaminantes y el tratamiento de suelos contaminados utilizando metales como agentes estabilizadores. Es aconsejable en procesos *Ex Situ* en volúmenes pequeños o con concentraciones de hidrocarburos totales de petróleo bajas. Por el contrario, los tratamientos *In Situ* para aquellos donde se imposibilita el transporte o remoción mecánica del material afectado especialmente los tratamientos subterráneos. Los métodos más empleados para remediación mediante nanotecnología pueden corresponder a los siguientes grupos:

Aplicación del Nanohierro: ZVI (Fe⁰): puede reemplazar los agentes oxidantes convencionales, ozono y peróxido de hidrógeno. El procedimiento se basa en contactar el suelo con las partículas de ZVI en escalas nanométricas en solución acuosa lo que es factible igualmente, ya que, no genera grandes cambios en el pH y no requiere de cambios en este. La eficiencia de eliminación aumenta linealmente con el aumento de hierro.

Aplicación de Nanoemulsiones: son nanoemulsiones formuladas con aceite esencial de naranja y surfactante no iónico correspondiente a partículas 20 a 500nm. Al entrar en contacto con el material la fase de aceite dispersa en la solución acuosa es capaz de encapsular los contaminantes y generar su barrido eficientemente.

Aplicación de Micro-nanoburbujas: son burbujas finas, las cuales están compuestas de aire atmosférico cuyo diámetro puede oscilar entre 1 a 100 micrones. Capturan los contaminantes a través de su sistema en el que penetran espacios porosos diminutos que continuarán con un proceso de descontaminación envolviendo al residuo y obligándolo a desplazarse hacia la superficie o bien sea hacia el lugar al que se desea mover.

Función del tratamiento de remediación del suelo		Criterios de Selección más relevantes según expertos	
	Captura		Efectiva en control de erosión Efectivas al mejorar las propiedades del suelo relacionadas con la infiltración como la porosidad y permeabilidad.
	Drena		Beneficios a largo plazo considerables Permiten la remoción de contaminantes evitando posibles deterioros de la calidad cursos de agua o acuíferos, preserva la calidad ambiental.
	Refuerza	  	Tecnología y mano de obra accesible Térmicos (Extracción de vapor, Incineración). Equipo accesible de baja energía. Físicos químicos (Bioventilación, nanoremediación). Equipo accesible de mano de obra sencilla. Biológicos (Landfarming). Requiere mano de obra especializada para verificación de toxicidad de productos finales además de mayor cantidad de permisos.
	Protege del esparcimiento de contaminantes y la generación de erosión a partir de superficies y niveles impermeables.	  	Fácil disponibilidad de insumos Térmicos (Extracción de vapor, Incineración). Accesible pero los costos aumentan en función del uso de energía y equipo. Físicos químicos (Bioventilación, nanoremediación). Accesibles pero los residuos generados por separación deben tratarse o disponerse aumentando costos. Biológicos (Landfarming). Demandan reproducción de microorganismos específicos por lo que requieren mayor tiempo de tratamiento y necesidad de insumos.
	Mejora las condiciones físico químicas del suelo aportándole mayor estabilidad.	 	Bajo costo de Mantenimiento no aplica solo se usa en casos puntuales. Material no inflamable no emplea material inflamable.

 Cumple
  No cumple
  Neutral