

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL
GRADO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y
DE BIOSISTEMAS

**ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL
DESLIZAMIENTO Y PROPUESTA DE REMEDIACIÓN EN
LA CUENCA DE BARÚ**

STEVEN ELIZONDO SEGURA

CIUDAD UNIVERSITARIA RODRIGO FACIO

SAN JOSÉ, COSTA RICA

JULIO, 2025

Acta de la Presentación Oral del Trabajo Final de Graduación ante el Tribunal Examinador para Optar por el Grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas
 Modalidad: Proyecto de Graduación

Lugar: Sala de Audiovisuales 1, Facultad de Ingeniería	Fecha: 15/07/2025	Hora: 09:00 am	Consecutivo: 13-2025
--	-------------------	----------------	----------------------

Artículo 1: Presentación de los miembros del Tribunal del Trabajo Final y del estudiante. Se explica el procedimiento que consiste en la presentación oral de 45 min, el espacio para preguntas, la deliberación del Tribunal y la comunicación del acuerdo, según los artículos 26 y 27 del Reglamento de Trabajos Finales de Graduación.

Tribunal Examinador	
MIEMBROS DEL TRIBUNAL	ROL
M.Sc. Matías Chaves Herrera	Director TFG
Ph.D. María Melissa Rojas Downing	Miembro del Comité Asesor
Lic. Geovanni Carmona Villalobos	Miembro del Comité Asesor
M.Sc. José Francisco Aguilar Pereira	Lector Invitado
Ph.D. Alejandra Rojas González	Presidenta

Artículo 2: Exposición oral del estudiante
 Nombre del TFG: ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL DESLIZAMIENTO Y PROPUESTA DE REMEDIACIÓN EN LA CUENCA DE BARÚ

NOMBRE DEL POSTULANTE	CARNÉ
Steven Elizondo Segura	B72695

Artículo 3: Sesión de preguntas sobre aspectos propios del trabajo presentado

Artículo 4: Deliberación del Tribunal. Sale de la sala de sesiones el sustentante para la deliberación del Tribunal. Se le avisará al sustentante vía llamada telefónica o el medio acordado con el estudiante.

Observaciones: *En recomendaciones resaltar más las limitantes de los datos y la falta de planificación entre la finca. Especificar el balance hídrico y la generación del factor de humedad del suelo. Ampliar en resultados el análisis de probabilidad de las estaciones y su información y en anexos agregar el resultado de la prueba de bondad de ajuste.*

Artículo 5: Producto de la deliberación se realiza la votación pública:

Votación pública obteniendo: 5 votos a favor y 0 votos en contra.
 Voto disidente: No hay

Calificación del Trabajo Final de Graduación:	Aprobado	<input checked="" type="checkbox"/>	No aprobado	<input type="checkbox"/>
Aprobación con distinción el Trabajo Final de Graduación:	Sí	<input type="checkbox"/>	No	<input checked="" type="checkbox"/>

Artículo 6: La persona que preside el Tribunal comunica a la persona postulante el resultado de la deliberación y se le declara acreedora al grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas. Se le indica la obligación de presentarse al acto público de graduación, para ser juramentado y recibir el diploma correspondiente.

Se da lectura al acta que firman la persona que preside el Tribunal Examinador y la persona postulante, a las 12:02 horas.

 Ph.D. Alejandra Rojas González, persona que preside

Steven _____
 Steven Elizondo Segura, Estudiante

Nota: De conformidad con los artículos 28, 29 y 36, el estudiante deberá entregar las copias con la versión final, incluyendo las modificaciones formuladas en ocasión de la presentación pública, un resumen de 200-500 palabras y la autorización de publicación del trabajo en el repositorio Kérvá. El director del trabajo final de graduación será responsable de que se realicen las correcciones propuestas en la presentación pública y de que la versión final del documento quede debidamente confeccionada.

DEDICATORIA

A Dios, quien me dio guía, fuerzas y paz en mis momentos de tormenta.

A abuelo Tulio, quien me enseñó lo hermoso que es el campo y me dio las mejores
aventuras de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá Shirley, a mi papá Alexander y a mi hermana Valeria, por sus oraciones constantes, por su apoyo incondicional y por ser mis bastiones durante mi carrera y vida.

A mi novia Valery, por su amor, sus correcciones y consejos siempre puntuales.

A la familia Montero Martínez, por acogerme en San José, por sus oraciones, por ser siempre incondicionales en mi vida y en mi carrera universitaria.

Al profesor Matías Chaves Herrera, por creer desde un inicio en este proyecto y darme una guía siempre valiosa en el desarrollo de este.

A los lectores Melissa Rojas Downing y Geovanni Carmona Villalobos, por sus correcciones y apoyo constante en el desarrollo de la tesis.

A mi amigo Anthony Montero, por siempre tener un espacio de ayuda y escucha, tanto para desarrollar esta tesis como en nuestros años de universidad.

A la Universidad de Costa Rica y a la Escuela de Ingeniería de Biosistemas, por darme un espacio de alta calidad de estudio y pensamiento crítico.

RESUMEN

Este estudio analiza la susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca del río Barú, ubicada en la región Brunca, Costa Rica, una región caracterizada por condiciones geológicas y climáticas que favorecen los movimientos en masa, especialmente durante la estación lluviosa. El objetivo principal fue identificar las zonas con susceptibilidad de deslizamientos mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y generar recomendaciones de técnicas de control de deslizamientos basadas en Ingeniería de Biosistemas.

Se aplicó la metodología de Mora-Vahrson (1998), utilizando herramientas como ArcGIS 10.8 y diversas fuentes de información para la recolección, reclasificación y ponderación de variables como pendiente, litología, humedad, intensidad sísmica y precipitación máxima para periodos de retorno (TR) de 5, 10 y 15 años. Cada una de estas variables fue clasificada y combinada en un modelo espacial que permitió generar tres mapas de susceptibilidad a deslizamientos, cuya categorización osciló entre moderada, media y alta susceptibilidad a deslizamiento para los tres TR en cuestión.

Los resultados evidencian que la cuenca Barú presenta un área con factor moderado de 3,42%, 3,42% y 3,41% para un TR de 5, 10 y 15 años, respectivamente; un área con factor medio de 66,01%, 63,86% y 63,11% para un TR de 5, 10 y 15 años, respectivamente; y un área con factor alto de 30,57%, 32,72% y 33,49% para un TR de 5, 10 y 15 años, respectivamente. Los resultados fueron validados mediante el análisis área bajo la curva (AUC por sus siglas en inglés) de una curva Receiver Operating Characteristic (ROC por sus siglas en inglés), formada por la información de una matriz de confusión generada con datos de una superposición de capas, la cual presentó un valor de 0,74, considerado como una predicción de valores aceptable.

Además del análisis geoespacial, el estudio propone la implementación de técnicas de Ingeniería de Biosistemas para tratar las zonas con problemas de deslizamiento y erosión superficial. Dentro de estas técnicas destacan las estructuras de contención del suelo con material vegetal como lo son el estaquillado, las fajinas, los escalones y paquetes de matorral. Se incluyen técnicas de retención y estabilización de taludes como las estructuras de tierra reforzada y muros vivientes; también medidas para el control de la erosión como barreras vivas y barreras con vetiver. Por último, se recomienda como medida de reforestación la siembra de plantas autóctonas como medida de prevención de deslizamientos.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Justificación	1
1.2.	Delimitación del problema.....	2
2.	OBJETIVOS.....	4
2.1.	Objetivo general.....	4
2.2.	Objetivos específicos	4
3.	MARCO TEÓRICO	5
3.1.	Cuenca hidrográfica.....	5
3.1.2.	Desastres naturales	5
3.1.2.1.	Deslizamientos	5
3.1.3.	Susceptibilidad a deslizamiento.....	7
3.1.4.	Sistemas de información geográfica.....	8
3.1.4.1.	Superposición de capas.....	9
3.1.5.	Método de Gumbel	12
3.1.5.1.	Prueba de bondad de ajuste Smirnov Kolmogorov	12
3.1.6.	Metodología Mora-Varhson	13
3.1.6.1.	Uso de la metodología Mora-Varhson para la generación de mapas de susceptibilidad a deslizamiento	14
4.	METODOLOGÍA.....	17
4.1.	Descripción general	17
4.2.	Generalidades de la zona de estudio	18
4.2.1.	Cuenca de Barú.....	18
4.3.	Procesamiento de datos.....	19
4.3.1.	Litología (S ₁).....	19
4.3.2.	Factor de pendiente del terreno	21
4.3.3.	Factor de humedad de suelo	21
4.3.4.	Factor de intensidad sísmica.....	22
4.3.5.	Factor de intensidad de lluvias	23

4.3.6.	Clasificación de susceptibilidad a deslizamiento	24
4.4.	Validación de la metodología Mora-Vahrson.....	24
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
5.1.	Aplicación de la metodología Mora-Vahrson en la Cuenca Barú	27
5.1.1.	Factor litológico (S_l).....	27
5.1.2.	Factor pendiente del terreno (S_r)	28
5.1.3.	Factor humedad del suelo (S_h).....	29
5.1.4.	Mapa de susceptibilidad por factores pasivos	31
5.1.5.	Factor intensidad sísmica (T_s)	32
5.1.6.	Factor intensidad de lluvia (T_p)	34
5.1.7.	Mapa de susceptibilidad a deslizamiento por factores activos.....	36
5.2.	Susceptibilidad a deslizamiento en la cuenca Barú	37
5.3.	Validación de la metodología Mora-Vahrson.....	39
5.3.1.	Matriz de confusión.....	43
5.4.	Propuesta de soluciones y recomendaciones para la prevención de deslizamientos en la cuenca de Barú.....	45
5.4.1.	Tratamiento de deslizamientos por medio de bioingeniería de suelos	46
5.4.1.1.	Estaquillado	47
5.4.1.2.	Fajinas.....	48
5.4.1.3.	Escalones de matorral.....	49
5.4.1.4.	Paquetes de matorral.....	50
5.4.1.5.	Estructuras de tierra reforzada.....	50
5.4.1.6.	Muros vivientes	51
5.4.1.7.	Barreras de erosión con planta vetiver (vetiver zizanoides).....	52
5.4.1.8.	Barreras vivas	53
5.4.1.9.	Tratamiento de deslizamientos por medio de siembra	53
5.4.1.10.	Especies vegetales a utilizar en sistemas de bioingeniería	54
6.	CONCLUSIONES.....	56
7.	RECOMENDACIONES	58
8.	REFEENCIAS	59
9.	ANEXO A	63

10.	ANEXO B	76
-----	---------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curva de ROC, modificada de Arместo (2011).....	11
Figura 2. Ubicación de la Cuenca Barú en Cota Rica.	18
Figura 3. Factor litológico de la Cuenca Barú para el año 2014.	28
Figura 4. Mapa de factor de pendiente de la cuenca Barú.....	29
Figura 5. Factor de humedad de suelo en la cuenca Barú para un periodo de tiempo de 1970-2020.	30
Figura 6. Mapa de susceptibilidad a elementos pasivos en la Cuenca Barú.	31
Figura 7. Aceleración Sísmica (PGA) de la Cuenca Barú.....	32
Figura 8. Factor de Intensidad Sísmica de la Cuenca Barú.	33
Figura 9. Isoyetas de precipitación en la cuenca Barú para periodos de retorno de 5, 10 y 15 años.	35
Figura 10. Factor de intensidad de lluvia en la cuenca Barú para periodos de retorno de 5, 10 y 15 años.	35
Figura 11. Susceptibilidad a deslizamiento por factores activos para periodos de retorno de 5, 10 y 15 años.....	37
Figura 12. Susceptibilidad a deslizamiento en la cuenca Barú para periodos de retorno de 5, 10 y 15 años.....	39
Figura 13. Ubicación visual de deslizamientos por medio de imagen satelital del Sentinel-2 del 21/12/2020.....	40
Figura 14. Ubicación de los deslizamientos 7, 8, 9, 15 y 16 en Google Earth (04/02/2025) en la cuenca Barú.	41
Figura 15. Susceptibilidad a deslizamiento en la cuenca Barú para el año 2020.	42
Figura 16. Superposición de capas de deslizamientos respecto a la susceptibilidad a deslizamiento en la cuenca Barú en el año 2020.	43
Figura 17. Curva ROC del proceso de validación.....	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores característicos de los movimientos de laderas, modificado de Silva (2013)	6
Tabla 2. Zonas de vida de Holdridge para la cuenca Barú, modificado de Porras (2013).	19
Tabla 3. Clasificación del factor de litología para susceptibilidad a deslizamiento.	20
Tabla 4. Clasificación del factor pendiente para susceptibilidad a deslizamiento.	21
Tabla 5. Clasificación de los valores medios mensuales de las precipitaciones.	22
Tabla 6. Factor de humedad resultante de la clasificación de los valores acumulados de los índices promedio de precipitaciones.	22
Tabla 7. Factor de sismicidad de acuerdo con un evento de 100 años en la escala MM.	23
Tabla 8. Factor de intensidad de lluvia resultante de la clasificación de precipitaciones máximas diarias para un periodo de retorno de 5, 10 y 15 años.	24
Tabla 9. Clasificación de susceptibilidad a deslizamiento.	24
Tabla 10. Clasificación de la matriz de confusión a emplear en el proceso de validación.	25
Tabla 11. Porcentaje de área de la cuenca Barú respecto a la susceptibilidad por factores pasivos.	32
Tabla 12. Porcentaje de área de la cuenca Barú para los distintos tipos de intensidad de lluvia y periodos de retorno.	36
Tabla 13. Porcentaje de área de la cuenca Barú para los distintos tipos de susceptibilidad a deslizamiento por factores activos y periodos de retorno.	37
Tabla 14. Porcentaje de área de la cuenca Barú para los distintos tipos de susceptibilidad a deslizamiento.	39
Tabla 15. Porcentaje de área de la cuenca Barú para los distintos tipos de susceptibilidad a deslizamiento para el año 2020.	42
Tabla 16. Matriz de confusión de los puntos deslizamientos y sin deslizamiento respecto a la susceptibilidad a deslizamiento para el año 2020.	44
Tabla 17. Parámetro de eficiencia de la matriz de confusión aplicada al proceso de validación.	45
Tabla 18. Distancia entre fajinas según la geometría del deslizamiento a tratar, modificado de Silva (2013).	48
Tabla 19. Distancia entre escalones de matorral, modificado de Silva (2013).	50

ÍNDICE DE ANEXOS A

Figura A 1. Metodología aplicada para la obtención de mapa de susceptibilidad a deslizamiento en la cuenca Barú	63
Figura A 2. Ubicación de estaciones meteorológicas en la zona de estudio	66
Figura A 3. Isoyetas de lluvia máxima en la cuenca Barú para el año 2020.....	67
Figura A 4. Script para para obtener la curva ROC y AUC en R.....	67
Figura A 5. Diagrama del proceso para la generación del factor humedad de suelo	68
Figura A 6. Visualización de deslizamientos 10 y 11 en Google Earth (04/02/2025)	70
Tabla A 1. Tabla de periodo de retorno de la estación Hacienda Barú	63
Tabla A 2. Tabla de periodo de retorno estación Guapil.....	64
Tabla A 3. Tabla de periodo de retorno estación Repunta	64
Tabla A 4. Tabla de periodo de retorno estación Tinamaste	64
Tabla A 5. Tabla de periodo de retorno estación Arunachala	65
Tabla A 6. Precipitación máxima para el año 2020 registrado en las distintas estaciones meteorológicas de la zona de estudio	65
Tabla A 7. Tabla resumen de los datos de validación utilizados en R	68
Tabla A 8. Datos de precipitaciones máximas en la estación de Hacienda Barú	70
Tabla A 9. Datos de precipitaciones máximas en la estación de Guapil	71
Tabla A 10. Datos de precipitaciones máximas en la estación de Arunachala	71
Tabla A 11. Datos de precipitaciones máximas en la estación de Tinamaste	71
Tabla A 12. Datos de precipitaciones máximas en la estación de Repunta.....	72
Tabla A 13. Prueba de bondad de ajuste por Smirnov-Kolmogorov en la estación de Hacienda Barú	72
Tabla A 14. Prueba de bondad de ajuste por Smirnov-Kolmogorov en la estación de Guapil	73
Tabla A 15. Prueba de bondad de ajuste por Smirnov-Kolmogorov en la estación de Arunachala.....	73
Tabla A 16. Prueba de bondad de ajuste por Smirnov-Kolmogorov en la estación de Tinamaste	74
Tabla A 17. Prueba de bondad de ajuste por Smirnov-Kolmogorov en la estación de Repunta	75

ÍNDICE DE ANEXOS B

Figura B 1. Detalle del corte y siembra por medio del estaquillado (Silva, 2013).....	76
Figura B 2. Visualización lateral del uso del estaquillado (CEDEX, 2011).	76
Figura B 3. Visualización de una fajina (Downs, 2014).	76
Figura B 4. Representación del uso de fajinas en laderas (Downs, 2014).	77
Figura B 5. Guía de diseño de escalones de matorral (Downs, 2014).....	77
Figura B 6. Diseño de técnicas de paquetes de matorral (De la Cruz & Gómez, 2017).	77
Figura B 7. Diseño de una estructura de tierra reforzada (CEDEX, 2011).	78
Figura B 8. Diseño de muros vivientes (Quezada, 2015).	78
Figura B 9. Espacio de siembra recomendado para barreras de vetiver (Downs, 2014).....	78
Figura B 10. Diferencias en pérdidas de suelo entre vetiver (izquierda) y Flemingia congesta, una leguminosa (Rodríguez, 2009).....	79
Figura B 11. Vista frontal del diseño de barreras vivas (Downs, 2014).....	79
Figura B 12. Ejemplos de aplicación de barreras vivas en cárcavas (Pérez C, 2012).....	79
Figura B 13. Aplicación de hidrosiembra en mejora de espacios fluviales (CEDEX, 2011).	80

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

Los deslizamientos son procesos que se generan en todas las latitudes a nivel mundial. Las condiciones y factores que los detonan suelen ser variados, sin embargo, se destacan las fuertes lluvias, sismos, pendiente del terreno y la actividad del ser humano como los factores principales que desencadenan estos eventos (Quesada-Román et al., 2018).

Costa Rica, un país caracterizado por sus cordilleras, periodos de lluvia intensos y prolongados, fuertes pendientes y sismos constantes, factores que, al combinarse, generan deslizamientos de suelo en distintos puntos del territorio nacional. Sumado a lo anterior, los factores sociales y el impacto de la actividad humana en el uso del suelo incrementan la generación de deslizamientos (Carvajal, 2021).

Basado en lo anterior, se ha desarrollado la metodología Mora-Vahrson (1994) en Centro América para el estudio y determinación de zonas susceptibles a deslizamiento. Es un proceso que engloba el uso de Sistemas de Información Geográficas (SIG) y presenta una buena precisión con la determinación de zonas susceptibles a deslizamiento, tomando en consideración la intensidad de lluvias, litología, sismicidad, humedad del suelo y pendiente del terreno (Quesada, 2018). Por medio de esta metodología se pueden generar mapas de susceptibilidad, dando un panorama de zonas en donde se deben aplicar medidas preventivas a este tipo de desastres.

El Estado de la Nación (2015) indicó que el 25% de los desastres naturales ocurridos en Costa Rica en los últimos 30 años corresponden a deslizamientos, debido a la combinación de factores geológicos, hidrometeorológicos y humanos. En el 2022, los datos indican la misma tendencia, ya que los deslizamientos se sitúan en la tercera posición como los desastres más recurrentes a nivel nacional, con un total de 246 hechos de este tipo en este año (Estado de la Nación, 2022).

En los últimos ocho años los deslizamientos se han presentado con mayor incidencia en el área central del país, siendo las provincias de Alajuela y San José las que presentan mayores hechos de este tipo. Esta clase de evento, junto con las fuertes lluvias, afectaron alrededor de 1511178 personas en el 2021, generando pérdidas económicas, estructurales, viales, y dejando la lamentable suma de 11 fallecidos (Estado de la Nación, 2022).

En San José, destacan los cantones de Desamparados, Puriscal, Aserrí y Pérez Zeledón con la mayor cantidad de reportes por deslizamientos, alrededor de 880 reportes se realizaron a la Comisión Nacional de Emergencia (CNE) sobre este tipo de afectaciones. Este tipo de eventos han generado consecuencias a nivel de infraestructura, cultivos, pasos viales, entre otros (Mena, 2022).

Es importante reconocer que muchos de los desastres climáticos se pueden prevenir si se tiene el material adecuado para la toma de decisiones. Los SIG permiten la generación de datos para tomar medidas preventivas y de mitigación frente a los problemas que pueden

generar los deslizamientos. La evaluación de condiciones y causas que generan la pérdida de suelos son de suma importancia en países en vías de desarrollo, que basan su sistema productivo en producción agrícola, como lo es Costa Rica. La determinación de zonas de peligro o zonas susceptibles a ciertos desastres permite tener un recurso para la toma de decisiones e implementación de medidas correctivas o preventivas (Rojas & Aguilar, 2018).

1.2.Delimitación del problema

Los deslizamientos pueden generar fuertes impactos económicos, sociales y afectaciones del entorno natural, de vías de comunicación terrestre, daños de infraestructura como viviendas y edificaciones, entre otra cantidad de problemas significantes. El manejo inadecuado del suelo, el cambio climático, las características geomorfológicas y las condiciones del estado del tiempo son algunos de los activadores de este tipo de desastres.

A nivel nacional, la combinación de fuertes precipitaciones y de altas pendientes del terreno se muestra como el principal desencadenante de deslizamientos. A nivel cantonal, Pérez Zeledón registra eventos de deslizamientos básicamente todos los años, siendo uno de los sitios donde se mantiene la mayor vigilancia y advertencias ante eventos de fuertes lluvias. El cierre de vías de comunicación terrestre, pérdida de terrenos de cultivo o de vivienda, afectaciones en las líneas de comunicación inalámbrica y en los servicios de agua y luz, además de pérdidas de vidas humanas son de las consecuencias que han dejado los deslizamientos en el cantón de Pérez Zeledón (Loaiza, 2022).

En la cuenca de Barú de Pérez Zeledón se han registrado eventos de deslizamientos, afectando vías de comunicación terrestre, vías de telecomunicaciones, daños en infraestructuras y en actividades agropecuarias. El 27 de abril del 2012 se registró un movimiento de ladera en la comunidad de Tierras Morenas de Barú, el cual cortó la comunicación vial entre los poblados de San Isidro del General y Dominical; además, generó la afectación de terrenos pecuarios aledaños a la zona (Quesada, 2012).

Para octubre del 2018, las fuertes lluvias, aparte de provocar el colapso del sistema de alcantarillado, fueron el detonante de 5 deslizamientos en el distrito de Barú de Pérez Zeledón, afectando principalmente el paso vial por esta zona (Cordero, 2018). Por otra parte, el huracán Eta en el año 2020 provocó cerca de ocho deslizamientos a nivel nacional, donde dos de estos fueron en el distrito de Barú (Umaña, 2020). Estos eventos dan respuesta a las afirmaciones de la Comisión Nacional de Emergencias (CNE) que destacan en el cantón de Pérez Zeledón la zona de Barú-Tierras Morenas como una de las zonas con mayor susceptibilidad a deslizamientos (García, 2020).

Uno de los principales problemas de la zona de estudio, es el desconocimiento de las zonas susceptibles a deslizamientos. La mayoría de los casos de este tipo de desastres ocurren en fincas pequeñas, afectando la producción agrícola y ganadera de la zona, y estos hechos no son reportados a las autoridades, por lo que llevar un registro oficial de estos hechos es difícil.

Por otra parte, la pendiente de la zona, las fuertes lluvias y el manejo inadecuado del suelo son los principales artífices de los deslizamientos.

Es importante destacar que, Rojas et al, (2011), en colaboración con el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y el Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET) desarrolló un estudio acerca de la información general de todas las cuencas hidrográficas en Costa Rica, donde se incluye la susceptibilidad a deslizamientos. En este estudio se indica la susceptibilidad a deslizamiento de la cuenca de Barú, sin embargo, no se indica la metodología utilizada, factores que se consideraron y no hay una validación del mapa generado para esta o alguna otra cuenca del estudio.

En el presente trabajo de graduación se desarrolla el estudio con una metodología ya establecida y conocida a nivel centroamericano, donde se establecen los factores a considerar junto con una validación del modelo y el planteamiento de recomendaciones de soluciones en Ingeniería de Biosistemas para tratar y evitar estos movimientos de ladera.

Por medio de la aplicación de la metodología Mora-Vahrson a través de SIG, se pretende generar mapas de susceptibilidad a deslizamiento en el distrito de Barú, para periodos de retorno de 5, 10 y 15 años, esto con el fin de tener una base para la toma de decisiones y de medidas preventivas ante los deslizamientos que puedan ocurrir en esta zona. Además, se desarrollará fotointerpretación de imágenes satelitales de alta resolución para corroborar la información que se va a generar en los mapas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Analizar la susceptibilidad a deslizamiento en la cuenca de Barú, Costa Rica, mediante la metodología Mora-Vahrson a tres periodos de retorno mediante sistemas de información geográfica para recomendar soluciones en ingeniería de control y prevención de futuros eventos de deslizamiento.

2.2. Objetivos específicos

1. Aplicar la metodología Mora-Vahrson en la cuenca de Barú, para analizar los factores pasivos y activos que se ven involucrados en la susceptibilidad a deslizamiento.
2. Generar los mapas de susceptibilidad a deslizamiento en la cuenca de Barú, por medio de sistemas de información geográfica aplicando la metodología Mora-Vahrson a periodos de retorno de 5, 10 y 15 años.
3. Corroborar la metodología Mora-Vahrson por medio de imágenes satelitales de alta resolución aplicando una superposición de capas ráster.
4. Proponer soluciones y recomendaciones para el control de deslizamientos mediante un enfoque de Ingeniería de Biosistemas para evitar y/o prevenir futuros eventos.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Cuenca hidrográfica

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), actualmente una cuenca hidrográfica se refiere a un territorio delimitado por su propia naturaleza y se establece como un espacio social producido por el conjunto de relaciones sociales de apropiación y uso de los recursos que se contienen en sí misma (Fallas, 2015).

Por otra parte, se conoce como cuenca hidrográfica al área o superficie de un terreno que aporta sus aguas de escorrentía a un mismo punto de desagüe o cierre. La escorrentía se define como el agua que fluye por la superficie terrestre tras producirse una precipitación pluvial o aporte de agua y esta comienza a desplazarse a favor de la pendiente (Moreno et al., 2008).

Una cuenca puede incluir sistemas terrestres (bosques, selvas, matorrales, etc) y sistemas acuáticos (ríos, lagos, humedales, entre otros) y sus límites los establece el parteaguas desde donde escurre el agua que precipita hasta el punto de desagüe. Además, una cuenca hidrográfica se suele dividir en tres secciones: baja, media y alta en función de sus características topográficas (Ordoñez, 2011).

De acuerdo con el tipo de escorrentía y lugar donde se depositen las aguas, una cuenca se divide en: subcuenca y microcuenca. La subcuenca se refiere cuando al cauce primario llega un efluente secundario, mientras que una microcuenca representa la agrupación de pequeñas áreas de una subcuenca o parte de esta (Fallas, 2015).

3.1.2. Desastres naturales

Los desastres naturales se establecen como consecuencias de fenómenos naturales (terremotos, huracanes, tormentas, entre otros) desencadenantes de procesos que provocan daños físicos, pérdidas de vidas humanas, golpean económicamente a la sociedad y generan cambios sustanciales en espacio físico donde suceden. Los desastres naturales alteran el orden de la sociedad y afectan económicamente a las personas, generando consecuencias en el corto y mediano plazo (UNICEF, 2014).

3.1.2.1. Deslizamientos

Este tipo de desastres suelen ser nombrados procesos gravitacionales, procesos de ladera, procesos de remoción de masa o simplemente deslizamientos. La combinación de factores naturales como la sismicidad, actividad volcánica, intensidad de lluvia; actividades humanas como la deforestación, urbanización, ganadería o agricultura aumenta la generación de deslizamientos (Quesada-Román et al., 2018).

Los deslizamientos son fenómenos gravitacionales causados por alteraciones en el equilibrio natural de una pendiente por sismos, lluvias torrenciales y cambios en el uso de suelos. Las zonas más susceptibles a deslizamientos son las zonas montañosas tropicales, debido a la topografía, sismicidad, meteorización y lluvias intensas. A su vez, las lluvias prolongadas

saturan los niveles 5 profundos del suelo, facilitando la inestabilidad del suelo y provocando la generación de deslizamientos (González et al., 2023).

Quesada-Román et al. (2018) indican que los deslizamientos en términos de desastres son movimientos en masa que varían en magnitudes bajas a altas, ocurren con relativa frecuencia, su área de extensión es limitada y son de poca duración. Los materiales que lo componen se dividen en roca, detritos (partículas mayores a 2 mm) y suelos (partículas menores a 2 mm).

Los deslizamientos suelen presentar distintas características en términos de forma, zona donde se presentan y condiciones que pueden generar. En la Tabla 1 se presentan los tipos de movimientos de tierra más comunes y una breve descripción de cómo y qué forman

Tabla 1. Factores característicos de los movimientos de laderas, modificado de Silva (2013)

Tipo de deslizamiento	Parte superior de la ladera	Zona baja de la ladera	Geometría	D/L*
Desprendimientos	Terreno rocoso e irregular, escarpado, con material suelto. Grietas posteriores al talud y vegetación limitada.	Acumulación de bloques y de fragmentos rocosos.	Pendientes elevadas mayores a 50°	-
Deslizamientos rotacionales	Grietas curvas orientadas hacia la ladera. Taludes curvos con estrías. Encharcamientos y drenaje deficiente en zonas deprimidas.	Desvío de cauces. Acumulación de depósitos convexos lobulados.	Pendientes entre 20° a 40°	0,1 > D/L < 0,3
Deslizamientos traslacionales	Grietas verticales alineadas al talud. Material en bloques con fisuras. Sin encharcamiento. Drenaje irregular o ausente.	Desvío de cauces. Acumulaciones de material con forma de lóbulos.	Pendientes uniformes	D/L < 1
Deslizamientos laterales	Bloques desplazados y girados. Pendientes suaves. Drenaje interrumpido, cauces bloqueados, valles asimétricos.	-	Pendientes suaves < 10°	-
Flujos de barro	Nichos cóncavos superficiales. Pocas grietas. Contrastes de vegetación y	Lóbulos morfología irregular ondulada.	Pendientes entre 15° a 20°	D/L = 0,005-0,001

	presencia de encharcamientos. Drenaje relativamente continuo.			
Flujos de tierra y derrubios	Concavidades y lóbulos en el área de origen. Depósitos en forma de corriente. Vegetación ausente. Drenaje alterado.	Lóbulos depósitos convexos. Morfología irregular.	Pendientes > 25° D/L muy pequeño	

*D/L = profundidad/longitud de la masa desplazada

Los deslizamientos presentan distintas clasificaciones de acuerdo con la forma en que se están presentando en un momento dado. Los deslizamientos activos son aquellos en donde el desprendimiento del material rocoso o lastre se está presentando de forma continua. Por otra parte, los deslizamientos inactivos son aquellos en donde no se presenta ningún movimiento gravitacional del terreno o desprendimiento de material en un periodo de tiempo mayor a 6 meses, si no se presenta ningún movimiento del terreno en un periodo mayor a 12 meses, el deslizamiento pasa a ser un deslizamiento antiguo (Suarez, 1998).

En algunas ocasiones, los deslizamientos se pueden comportar como latentes, es decir, se mantienen inactivos por periodos cortos de tiempo y se activan por factores como sismos, intensas lluvias o factores humanos. Es común que este tipo de movimientos se presenten por la falta de medidas de prevención a la erosión del suelo (Suarez, 1998).

3.1.3. Susceptibilidad a deslizamiento

Ayala-Carcedo (2002), indican que la susceptibilidad se puede establecer como la propensión o tendencia de una zona a ser afectada o hallarse bajo la influencia de un proceso determinado. Por otra parte, algunos autores establecen que la susceptibilidad indica la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir sobre la base de las condiciones locales de un terreno. Es una propiedad misma del terreno que indican que tan favorables o desfavorables son las condiciones de un terreno para que se pueda generar un deslizamiento (Suarez, 1998) citado por Carvajal (2021)

En este concepto no se considera la frecuencia de ocurrencia del evento en sí, ni tampoco su magnitud, lo que indica la susceptibilidad a deslizamiento es la propensión a que en determinadas zonas se genere este movimiento gravitacional. Se establece como una referencia importante de que en cierta zona existe un espacio con características de que el evento puede ocurrir, aunque pueda suceder de forma inmediata, en días, meses o años. Además, el hecho de que el evento suceda está ligado a la intensidad y recurrencia de los factores detonantes y a las características físicas y de formación geológica de la zona (M. Jiménez, 2022).

La estimación de la susceptibilidad se basa en la correlación de los principales factores (intrínsecos) que contribuyen en la formación de deslizamientos. Se suele partir del análisis de condiciones existentes y del uso de material cartográfico, litológico, geo cartográfico, uso de suelos, vegetación, estructural, entre otros, para extrapolar los resultados y establecer mapas o zonas de susceptibilidad. Los factores por utilizar para el análisis de susceptibilidad a deslizamiento dependen de la zona y metodología a aplicar (Obregón & Lara, 2013).

El hecho de poder identificar la susceptibilidad a deslizamiento en un territorio genera una de las medidas de mayor importancia en términos de prevención y reducción de pérdidas. Existen diferentes métodos de evaluación y zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento, los cuales se dividen en métodos directos o cualitativos y métodos indirectos o cuantitativos, que permiten observar la información final de susceptibilidad por medio de mapas (J. Jiménez & Aristizábal, 2018).

Cabe destacar que, la identificación de las zonas susceptibles por los diferentes métodos genera una herramienta de utilidad por medio de los mapas, en estos no se resume la totalidad de zonas que se pueden ver afectadas y tampoco predicen cuando ocurrirán los procesos. Identificar estas zonas permite generar un medio de toma de decisiones y establecimiento de medidas de correctivas de conservación y mantenimiento (Obregón & Lara, 2013).

Sumado a lo anterior, el hecho de contar con herramientas de toma de decisiones y establecimiento de medidas preventivas brinda un medio por el cual se puede disminuir el riesgo de las poblaciones a que se presenten pérdidas monetarias, estructurales, de producción agrícola y de vidas humanas (Hernández et al., 2006).

3.1.4. Sistemas de información geográfica

Los SIG se pueden definir como un conjunto de herramientas, métodos y datos diseñados para actuar de forma ordenada y lógica para capturar, transformar, almacenar y presentar toda la información geográfica con el fin de satisfacer múltiples propósitos. Permiten gestionar y analizar la información espacial y surgió como resultado de la necesidad de disponer rápidamente de información para resolver problemas y contestar preguntas (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, 2006).

Fallas (2015) indica que los SIG permiten hacer superposiciones de mapas con factores pasivos y activos y construcción de índices, a través de los cuales se puede producir un resultado final que muestre la susceptibilidad de una zona en específico al deslizamiento u otro tipo de desastre natural o antrópico.

Los SIG permiten el análisis de diferentes casos de estudio por medio de la información que ha sido recopilada en campo a través de una referencia geográfica explícita como latitud y longitud o una referencia implícita como un domicilio o un código postal. Los SIG se desarrollan por medio de dos tipos de información: 1) el modelo vector, en el cual la información se almacena en forma de puntos, líneas y polígonos a través de una colección de coordenadas X y Y; por otra parte, 2) el modelo raster, comprende una colección de celdas

(píxel) de una grilla principalmente como un mapa o una figura escaneada (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, 2006).

3.1.4.1. Superposición de capas

Los modelos generados por medio de los SIG presentan información importante y de gran ayuda en toma de decisiones, sin embargo, es importante llevar a cabo la corroboración de los resultados para tener en cuenta el grado de exactitud de los mapas generados. Este tipo de análisis se ha desarrollado basándose en el uso de metodología estadística, llevando a cabo el estudio de las características geométricas de los objetos geográficos.

La superposición de capas o mapas consiste en una combinación de dos o más capas en donde cada una de las celdas (píxel) que conforman dichas capas presentan una misma referencia geográfica. Al realizar la combinación de estas capas, se emplea el operador lógico AND, en donde se le asigna un valor a cada una de las celdas de los ráster, con el fin de establecer los valores verdaderos, por ejemplo, si una celda presenta un valor verdadero se le asigna el número uno, caso contrario, si la celda presenta un valor falso se le asigna el número cero. Una vez generada esta información en cada uno de los ráster, se aplica el operador lógico AND, obteniendo un ráster que combina la información de las capas de entrada (Jaime et al., 2011).

De la mano con la superposición de capas, se suele aplicar una matriz de confusión con el fin de evaluar cuantitativamente la efectividad de la metodología utilizada. Una matriz de confusión se utiliza para conocer cómo se comportó un modelo de clasificación al haber realizado una predicción de datos, es decir, indica que tanto se confunde el modelo al predecir situaciones. Al aplicar una matriz de confusión se analizan valores de precisión, sensibilidad y especificidad, sin embargo, estos valores se componen de los siguientes datos:

- Verdaderos positivos (TP): corresponde a los valores correctamente clasificados dentro de la clase de interés.
- Verdaderos negativos (TN): corresponde a los valores correctamente clasificados fuera de la clase de interés.
- Falsos positivos (FP): corresponde a los valores incorrectamente clasificados dentro de la clase de interés.
- Falsos negativos (FN): corresponde a los valores incorrectamente clasificados fuera de la clase de interés.

Una vez determinados los datos anteriores, es posible estimar los valores de precisión, sensibilidad y especificidad, definidos por medio de las ecuaciones 1, 2 y 3 respectivamente.

$$ACC = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (1)$$

$$SEN = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2)$$

$$SPE = \frac{TN}{TN+FP} \quad (3)$$

El ACC indica que tan bien el modelo ha realizado las predicciones. La SEN se refiere a qué tan bien ha separado el modelo la clase de interés de las demás clases. Mientras que, la SPE indica que tan bien el modelo ha sido capaz de separar las demás clases de la clase de interés (Pérez, 2011).

Los valores de especificidad y sensibilidad dan una idea de cómo se comporta el modelo, sin embargo, sus valores quedan un poco en el aire a la hora de dar un criterio puntual sobre la exactitud de un modelo. Es por esto que el uso de una curva Receiver Operating Characteristic (ROC, por sus siglas en inglés) se ha desarrollado, con el fin de dar una forma gráfica de análisis cuando se evalúan casos donde existen pruebas diagnósticas.

El uso de curvas ROC se remonta a los años 50, donde se comenzó a aplicar en casos de investigaciones médicas. Básicamente, las curvas ROC son gráficos en donde se representa la sensibilidad en función de falsos positivos (1-especificidad) de la prueba realizada y en donde cada punto de la curva representa un par sensibilidad/(1-especificidad) correspondiente a un nivel determinado. Se establece que, para que la prueba realizada presente una capacidad de discriminación buena, debería tener una sensibilidad y una especificidad cercanas al 100%, de modo que conforme más cercana esté la curva al borde superior izquierdo mayor precisión discriminatoria tendrá la prueba y en caso contrario, que la curva se encuentre cercana a la diagonal de 45° la capacidad discriminatoria será menor, lo anterior se observa en la Figura 1 (Armesto, 2011).

Para el análisis de una curva ROC es necesario calcular el área bajo la curva (AUC por sus siglas en inglés) de la misma. Esta área indica un índice de precisión global de la prueba, el cual se espera que esté cercano a un valor de 1 (perfecta discriminación) y lo más alejado de 0,5 (azar) (Armesto, 2011). Se establece que para un AUC cercano a 0,5 el modelo no logra distinguir de forma adecuada los verdaderos positivos y negativos, para valores de AUC entre 0,7-0,8 se considera un modelo aceptable, entre 0,8-0,9 se considera excelente y entre 0,9-1,0 del modelo se desempeña de forma excepcional (García et al., 2023).

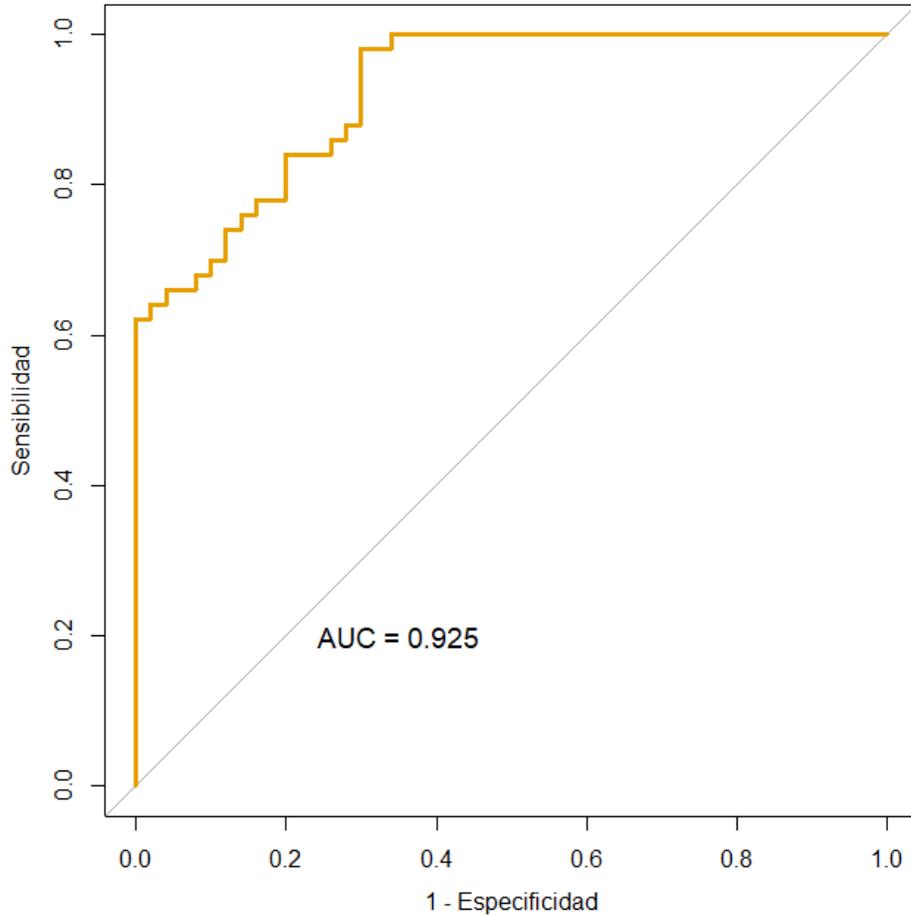


Figura 1. Curva de ROC, modificada de Armesto (2011)

Este tipo de pruebas se han empleado en el estudio de susceptibilidad a deslizamiento, debido al tipo de variables empleadas y a la aplicación de TP y TN. En Honduras se aplicó el estudio de la curva ROC mediante una matriz de confusión previa donde se establecieron puntos con deslizamientos y sin deslizamiento que luego fueron contrastados con mapas de susceptibilidad a deslizamiento. El modelo de curva ROC fue aplicado en el programa R en donde se obtuvo el gráfico de la curva con un valor de AUC de 0,934, un ACC de 0,88, una SEN de 0,93 y una SPE de 0,83, dando como resultado una validación correcta del modelo de susceptibilidad aplicado (Chirinos et al., 2023).

En México se desarrolló la aplicación de curvas ROC para evaluar la efectividad de dos modelos de predicción de deslizamientos utilizando SIG. Se contó con un historial de zonas con deslizamientos el cual fue el marco de la comparación cualitativa y cuantitativa de dos mapas de susceptibilidad que fueron creados con el modelo carto-hidrológico (SINMAP). Se aplicó una matriz de confusión para el cálculo de la sensibilidad y especificidad, una vez obtenida esta información se corrió en un programa llamado SPSS un script con los datos para obtener las ROC de los sistemas SINMAP_{CarbGeoPar} y SINMAP_{CarbDef} en donde se

determinó que el sistema SINMAP_{CarbGeoPar} presenta un mejor valor de AUC (Legorreta Paulín et al., 2018).

3.1.5. Método de Gumbel

Existen varios métodos para determinar los valores máximos de precipitación para un periodo de retorno y una duración determinada. Uno de los más utilizados es el Método de Gumbel, el cual consiste en la modelación de una serie de datos por medio de fórmulas algebraicas que se basan en parámetros que se ajustan a partir de una muestra. Este método consiste en una distribución logarítmica formulada por Gumbel en 1941 y por Chow en 1954, la cual es una distribución logarítmica normal, en donde el valor máximo se obtiene por medio de una ecuación llamada análisis de frecuencia (Chinchilla et al., 2010).

Al desarrollar comparaciones entre métodos estadísticos para la estimación de precipitaciones máximas se reconoce que el método de Gumbel alcanza con exactitud estos valores para periodos de retorno no mayores a 25 años (Ramirez & Ghanem, 2006).

3.1.5.1. Prueba de bondad de ajuste Smirnov Kolmogorov

Las pruebas de bondad evalúan qué tan compatible es una muestra aleatoria con una distribución teórica de probabilidad, ya sea a través de métodos gráficos o mediante el análisis de la frecuencia observada en los datos. En términos simples, permiten determinar qué tan bien se ajusta una distribución teórica a los datos disponibles. Existen distintos enfoques para verificar la adecuación de una función de probabilidad, entre los cuales destaca el método de Kolmogorov-Smirnov (Ortiz, 2021).

Este método se basa en comparar la diferencia entre la distribución empírica de los datos de la muestra y una distribución teórica, utilizando como medida el valor absoluto máximo (D) de la diferencia entre la frecuencia acumulada observada $F_n(x)$ y la frecuencia acumulada teórica $F(x)$. Este valor D se contrasta con un valor crítico (D_t), que depende del tamaño de la muestra y del nivel de significancia (α). El objetivo es determinar si la distribución teórica se ajusta adecuadamente a los datos, aplicando las siguientes hipótesis:

A. Si $D < D_t \Rightarrow$ se considera que la distribución se ajusta bien, al nivel de significancia elegido.

B. Si $D > D_t \Rightarrow$ se concluye que el ajuste no es adecuado, y se sugiere probar con una distribución diferente (Chinchilla et al., 2010).

Es común aplicar la prueba de Smirnov Kolmogorov al utilizar el método de Gumbel, con el fin de tener mayor certeza un panorama acerca de qué tan compatible puede ser la muestra aleatoria con una distribución teórica de los datos que se tienen.

3.1.6. Metodología Mora-Vahrson

La metodología Mora-Vahrson surge como una solución a los modelos geotécnicos, ya que estos brindan información detallada sobre un solo punto específico dando como resultados modelos físicos. Sin embargo, en zonas de mayor extensión donde se requiere la extrapolación de datos los modelos geotécnicos no son suficientes, es aquí donde se aplica dicha metodología (Mora & Vahrson, 1994).

Este método se describe como un modelo directo-cualitativo, basado en el criterio y evaluación de expertos que definen los criterios de susceptibilidad. A su vez, comprende modelos de cartografía geomorfológica directa, análisis jerárquico y ponderación de mapas (Jiménez & Aristizábal, 2018). Se recomienda su uso cuando no se tiene un inventario oficial de deslizamientos y que el estudio sea empleado a niveles regionales (Fallas, 2015).

Mora & Vahrson (1994) aplican en su modelo 5 factores de información, los cuales se dividen en susceptibilidad por elementos pasivos (pendiente, litología, humedad del suelo); y susceptibilidad por elementos activos (intensidad sísmica e intensidad de lluvia). Se define un índice de influencia por cada factor a través de un peso en específico. Se obtiene el nivel de susceptibilidad (H) multiplicando y sumando los índices a través de la Ecuación 4.

$$H = (S_r * S_l * S_h) * (T_s + T_p) \quad (4)$$

En donde:

S_r representa la pendiente del terreno generada a partir de curvas de nivel; S_l indica la litología de la zona, la influencia de los tipos de rocas y suelos en la activación de deslizamientos; S_h representa la humedad del suelo, ya que las fuertes lluvias son un indicador alto de susceptibilidad a deslizamiento; T_s indica la intensidad sísmica, normalmente se utilizan valores reportados en literatura que caracterizan las zonas de estudio respecto a eventos de sismos posteriores; T_p representa la intensidad de lluvia, se toma una reclasificación de la influencia de la lluvia en el tiempo (Mora & Vahrson, 1994).

Los autores indican que para mejores resultados se debe emplear una escala de 1:50000, ya que es un estándar de uso de suelo bastante común y a su vez permite una buena resolución a nivel de topografía. Además, mencionan que este método funciona bastante bien en zonas tropicales típicas de Centroamérica, debido a los factores que consideran. Por otra parte, la validación de los datos finales se debe realizar por medio de visitas de campo donde se establezcan sitios con susceptibilidad y/o con el uso de fotografías en sitio o fotografías aéreas de la zona de estudio (Mora & Vahrson, 1994).

3.1.6.1. Uso de la metodología Mora-Vahrson para la generación de mapas de susceptibilidad a deslizamiento

Fallas (2015) generó un mapa de susceptibilidad a deslizamiento en la microcuenca del río Tibás y en la microcuenca del río Torres, por medio de la metodología Mora-Vahrson. Para este caso de estudio, el 52,48% del área de la microcuenca del río Torres presentó susceptibilidad media y solo un 1,34% de susceptibilidad alta. Por otra parte, la microcuenca del río Tibás presentó un 52,09% del área con susceptibilidad media y un 9,52% de susceptibilidad alta. Además, realizó una comparación del tipo de suelo en la zona de estudio, siendo los suelos con bosque secundario y bosque primario en las microcuencas de los ríos Torres y Tibás, respectivamente, las zonas más propensas a sufrir deslizamientos.

En la región de la zona de los Santos, Costa Rica, se implementó la metodología Mora-Vahrson para la identificación de zonas susceptibles a deslizamiento en las distintas subcuencas de este sitio. El estudio indicó que el área presenta una susceptibilidad entre alta (>50%) y muy alta (<50%). Los autores recomiendan la intervención de zonas por medio de medidas preventivas para el correcto manejo de suelos, sin embargo, dependiendo de las características de la zona, recomiendan dejar el sitio como áreas de protección. No se recomienda la implementación de centros urbanos en esta región (Rojas & Aguilar, 2018).

Se aplicó la metodología Mora-Vahrson para el estudio de susceptibilidad a deslizamiento en el cantón de Montes de Oca. Se determinó que la zona presenta un 0,42%, 36,52%, 62,63% y un 0,43% de susceptibilidad a deslizamiento baja, moderada, media y alta, respectivamente. Además, se validó que el 77,7% de los registros históricos de deslizamientos ocurridos en el cantón se encuentran en la zona determinada como de susceptibilidad media, mientras que el restante 23,3% se encuentra en la zona con susceptibilidad moderada (M. Jiménez, 2022).

Para el análisis de zonas susceptibles a deslizamiento en el corredor Turrialba-Siquirres se implementó la metodología Mora-Vahrson. Los autores determinaron que el 33,9% de la zona presenta susceptibilidad baja, el 25,3% presenta susceptibilidad media y un 13,4% presenta susceptibilidad alta a deslizamiento. Además, se complementó el estudio con fotografías aéreas, donde se pudo comprobar la información generada por el sistema de información geográfica empleado. De igual forma, se identificaron los deslizamientos activos y los antiguos con los cuales se comprobó el producto generado (Segura et al., 2011).

Se desarrolló el estudio de susceptibilidad a deslizamiento en la microcuenca del río Tarbacia, en el cantón de Mora aplicando la metodología Mora-Vahrson. Se determinó que el 1,50%, el 45,70% y el 17,24% del área de estudio presenta una susceptibilidad muy alta, alta y moderada, respectivamente. Además, el autor identificó que en las zonas con susceptibilidad alta existe un alto impacto de las actividades humanas, principalmente en generación de zonas agrícolas productivas y la poca o nula aplicación de normativas de conservación de suelo (Carvajal, 2019).

Por otra parte, se llevó a cabo un estudio de susceptibilidad a deslizamiento en la microcuenca del río Macho por medio del método Mora-Vahrson. El autor determinó que existe un 8%

del área total de la zona de estudio con una susceptibilidad alta a deslizamiento, mientras que un 38,2%, 18,3% y un 35,4% del área presenta una susceptibilidad muy baja, moderada y media. Además, se analizó el tipo de cobertura vegetal en la zona de estudio y se concluyó que se deben hacer realizar restauraciones ecológicas en zonas con pastos, sitios donde predominan las secciones con alta y moderada susceptibilidad a deslizamiento. El autor indica que los factores pendiente y litología son los que se presentan como mayores indicadores de susceptibilidad a deslizamiento en esta zona en específico (Chaverri, 2016).

Por otra parte, en la región sureste de la Reserva Biológica Montecillos, Honduras, se aplicó el método Mora-Vahrson para determinar zonas susceptibles a deslizamiento. La autora identificó que existe un 49,16% y un 39,12% de la zona de estudio con susceptibilidad media y alta, respectivamente. Además, se validaron en campo 25 movientes de ladera que fueron identificados por medio de imágenes aéreas y que se encuentran dentro de las zonas con media y alta susceptibilidad. Por otra parte, se concluyó que las precipitaciones y la pendiente son los factores de mayor peso en la generación de deslizamientos en esta zona de estudio (Ávila, 2019).

En Loja, Ecuador, se determinó la susceptibilidad a deslizamiento por medio de la metodología Mora-Vahrson. Se concluyó que el 8,05% de la zona presenta susceptibilidad muy alta, el 41,89% del terreno presenta susceptibilidad alta y un 35,23% presenta susceptibilidad media. Se realizó además la recopilación de datos de eventos de deslizamiento antiguos y activos, y se determinó que ocho de estos deslizamientos se encuentran en zonas con susceptibilidad alta y los restantes seis se ubican en zonas con susceptibilidad media, verificando la efectividad de la metodología (Carvajal, 2021).

En la zona de Chemesquemena, Colombia, el desarrollo el análisis de susceptibilidad por movimientos de masa por medio de la metodología Mora-Vahrson, en este caso, con una modificación al agregar una capa de uso de suelo y aplicando un sistema de asignación de pesos para cada factor a emplear. Una vez desarrollada la metodología, se determinó que el 70% del área de estudio presenta una susceptibilidad alta, debido a secciones con altas pendientes y alta pluviosidad, además de ser zonas con cultivos permanentes y pastos, el restante 30% de la zona presenta una susceptibilidad entre baja y muy baja. Los autores determinaron que el impacto de la agricultura en la zona de estudio favorece a la formación de deslizamientos, producto de la aplicación poco sistematizada del riego, el cual satura los suelos y del uso de cultivos sin rotación como caña y café (V. Ortiz et al., 2023).

En el 2011, la metodología Mora-Vahrson fue aplicada en Costa Rica para identificar zonas susceptibles a deslizamientos generados por el terremoto de Cinchona. El estudio se centró en aplicar los datos del terremoto de Cinchona como la variable detonante en el factor de sismicidad y contrastarlos mapas obtenido con el historial de deslizamientos generado producto de un sobrevuelo en la zona de estudio días posteriores al terremoto. Los autores determinaron que la metodología Mora-Vahrson presentó una suficiente precisión para establecer la susceptibilidad a deslizamientos a escala media. Recalcan que a nivel de Costa Rica la metodología funciona bastante bien, aunque existen problemas para conseguir datos de litología, elevación y datos meteorológico (Barrantes Castillo et al., 2011).

La aplicación de la metodología Mora-Varhson en Costa Rica es usual. Fallas (2015) desarrolló el estudio de susceptibilidad a deslizamiento en las microcuencas de los ríos Torres y Tibás. El autor determinó que la microcuenca del río Torres presenta un 52,48%, 45,69% y 1,34% del área total con una susceptibilidad media, moderada y alta, respectivamente. Es importante destacar que no se realizó una visita de campo para validar estos resultados. Además, la microcuenca del río Tibás presenta un 52,09%, 35,21% y 9,52% del área total con una susceptibilidad media, moderada y alta, respectivamente.

Por otra parte, se desarrolló el estudio de susceptibilidad a deslizamiento en el cantón de Montes de Oca por medio de la metodología Mora-Vahrson. Se determinó que la zona presenta un 0,42%, 36,52%, 62,63% y un 0,43% de susceptibilidad a deslizamiento baja, moderada, media y alta, respectivamente. Además, se validó que el 77,7% de los eventos de deslizamientos ocurridos en el cantón se encuentran en la zona determinada como de susceptibilidad media, mientras que el restante 23,3% se encuentra en la zona con susceptibilidad moderada (M. Jiménez, 2022).

Rojas & Aguilar (2018) aplicaron la metodología Mora-Vahrson para la identificación de zonas susceptibles a deslizamiento en las distintas subcuencas de la región de la zona de los Santos, Costa Rica. El estudio indicó que el área presenta una susceptibilidad entre alta (>50%) y muy alta (<50%).

4. METODOLOGÍA

4.1. Descripción general

El proceso metodológico de este trabajo final de graduación (TFG) se resumen en la Figura A 1 del apéndice. Primeramente, se comenzó con la recolección de datos para obtener los factores pasivos y activos.

En este caso, el factor litología se obtuvo al aplicar una reclasificación del shape de geología del ATLAS 2014 del Tecnológico de Costa Rica (TEC). Esta fuente de información se convierte en un insumo importante, ya que proporciona la información detallada de la litología de la zona de estudio que permite desarrollar la clasificación acorde a los parámetros de Mora-Vahrson.

En el caso del factor pendiente, se obtuvo los datos de curvas de nivel del Instituto Geográfico Nacional (IGN), en donde se extrajo la información de las curvas de nivel cada 10 metros a escala 1:25000 para poder generar la capa de pendiente adecuada.

Por medio del WorldClim-Global ClimateData, 2000, se obtuvieron los valores de precipitación promedio (mm/mes) para un periodo de tiempo de 1970-2020. Con estos datos se obtuvieron imágenes tipo “tiff” que fueron procesadas en Arcmap para obtener los valores de humedad del suelo en la cuenca de Barú.

Para el factor de intensidad de lluvia, se obtuvieron datos de estaciones meteorológicas del IMN y del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) para un periodo de 2013-2023, en donde se extrajo la información de los valores máximos diarios de precipitación. Se aplicó la metodología de Gumbell para obtener las precipitaciones máximas en periodos de retorno de 5, 10 y 15 años.

Para el factor intensidad sísmica, se utilizaron los datos del ATLAS 2014 del TEC, el cual presenta un mapa de intensidades sísmicas de los últimos 100 años en función de la aceleración sísmica (PGA). Este factor se encuentra relacionado con la escala Mercalli Modificada y permite generar un mapa de intensidad sísmica y clasificarlo de acuerdo con la susceptibilidad dada por Mora y Varhson.

Los datos fueron procesados por medio del software ArcGis 10.8, en el cual, se desarrollaron mapas para cada uno de los factores antes mencionados y al final se generaron tres mapas de susceptibilidad a deslizamiento, uno por cada periodo de retorno, basado en la metodología aplicada por Mora y Varhon (1998).

Se obtuvieron imágenes de alta resolución de la zona de estudio a través de las cuales su ubicaron las zonas con deslizamientos. Con esta información, se generó un ráster con el cual se logró generar una superposición de capas, con el objetivo de desarrollar la validación de los mapas finales. Las imágenes correspondieron a diciembre del 2020, con el fin de corroborar las zonas donde se presentaron eventos de deslizamientos respecto a los mapas

generados. Posteriormente, se desarrolló una validación cuantitativa de la metodología aplicada por medio del uso de una matriz de confusión y un análisis de curva ROC y AUC.

Finalmente, una vez obtenidos los mapas de susceptibilidad, se desarrollaron soluciones ingenieriles desde un enfoque de ingeniería de biosistemas a aplicar en la zona de estudio, para evitar y/o prevenir eventos de deslizamientos.

4.2. Generalidades de la zona de estudio

4.2.1. Cuenca de Barú

La cuenca de Barú se localiza en las coordenadas $9^{\circ}19'13''\text{N}$ $83^{\circ}49'39''\text{O}$ / 9.3202634, -83.8275555 entre el cantón de Pérez Zeledón, Aguirre y Osa, en la región Brunca de Costa Rica. Presenta un área de 541.69 km^2 , cuenta con una población de aproximadamente 2848 personas, para el 2021. Es una zona caracterizada por el turismo, principalmente en los afluentes de los ríos Barú y Guabo; también destaca la actividad ganadera de engorde y la producción agrícola. Esta cuenca se subdivide en dos subcuencas: Barú y Guabo, como las dos principales de la zona, desembocando en la vertiente del pacífico (CTDR, 2023). La ubicación general de la cuenca Barú se visualiza en la Figura 2.

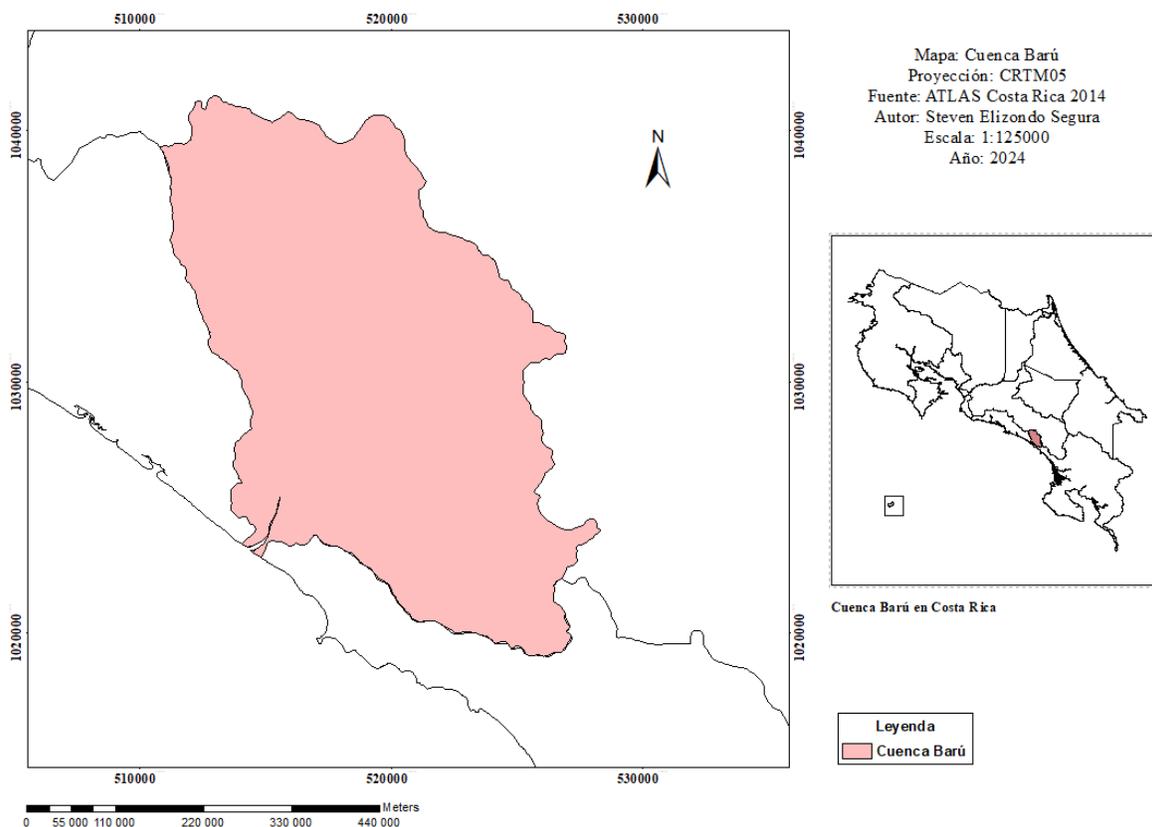


Figura 2. Ubicación de la Cuenca Barú en Cota Rica.

Se reconoce que en la cuenca de Barú predominan tres tipos de zonas de vida de Holdridge las cuales son: bosque muy húmedo tropical (bmh-T), bosque muy húmedo premontano

(bmh-P) y bosque pluvial premontano (bp-P) (Silva, 2013), cuyas características se visualizan en la Tabla 2. Las zonas de vida de Holdridge se consideran como un grupo de asociaciones vegetales dentro de una división natural del clima, tomando en cuenta condiciones edáficas, etapas de sucesión y la fisionomía (Porrás, 2013).

Tabla 2. Zonas de vida de Holdridge para la cuenca Barú, modificado de Porrás (2013).

Zona de Vida	Precipitación (mm)	Altitud (msnm)	Temperatura (°C)
Bosque muy húmedo tropical (bmh-T)	4000-6000	0-700	+24
Bosque muy húmedo premontano (bmh-P)	1850-4000	700-1400	18-24
Bosque pluvial premontano (bp-P)	4000-6000	700-1400	18-24

4.3. Procesamiento de datos

Tal como se observó en la Ecuación 4., se requieren de cinco factores para el desarrollo del proyecto, estos factores se agrupan en dos conjuntos, los factores por elementos pasivos (pendiente, litología, humedad del suelo) y los; factores por elementos activos (intensidad sísmica e intensidad de lluvia). La obtención de la información se describe a continuación al igual que el procesamiento de estos. Este procesamiento de datos se hizo siguiendo la metodología Mora & Vahrson (1994) para el estudio de susceptibilidad a deslizamientos por medio de SIG. Se obtuvieron mapas parciales para cada uno de los factores, posteriormente se aplicó la Ecuación 1 para obtener los mapas finales de susceptibilidad a deslizamiento. La Figura A 1 resume la metodología aplicada en este TFG.

4.3.1. Litología (S_i)

Para la obtención de la capa de litología, se hizo una reclasificación de la capa de geología proporcionada por el ATLAS 2014 del TEC. Se realizó un clip de la capa de geología respecto a la zona de estudio. Posteriormente, de acuerdo con la información del tipo de litología, se realizó una clasificación basada en la Tabla 3, donde se le asignó un peso basado al tipo de litología indicado. Una vez realizada esta categorización, se transformó el polígono en ráster con un tamaño de celda de 30x30 y se le asignó una escala de color, donde verde oscuro representa un valor de 1 (bajo), así de forma ascendente hasta el rojo un valor de 5 (muy alto).

Tabla 3. Clasificación del factor de litología para susceptibilidad a deslizamiento.

Litología	Clasificación	Peso S₁	Color sugerido
Aluviones: gruesos, permeable, compacto, con nivel freático bajo. Calizas: duras, permeables. Intrusivos: poco fisurados, bajo nivel freático. Basaltos, andesita, ignimbritas y similares: sanas, permeables y poco fisuradas. Rocas metamórficas: sanas, poco fisuradas, nivel freático bajo.	Bajo	1	Verde oscuro
Rocas sedimentarias: poco alteradas, estratificación maciza (decamétrica o métrica), poco fisuradas, nivel freático bajo. Rocas intrusivas, calizas duras, lava, ignimbritas o metamórficas: medianamente fisuradas o alteradas, nivel freático o profundidades intermedias.	Moderado	2	Verde claro
Rocas sedimentarias, rocas intrusivas, calizas duras, lava ignimbritas, tobas poco soldadas o metamórficas: medianamente alteradas. Coluvios, lahares, arenas, suelos regolíticos levemente compactados: drenaje poco desarrollado, niveles freáticos relativamente altos.	Medio	3	Amarillo
Aluviones fluvio-lacustres, suelos piroclásticos poco compactados, sectores de alteración hidrotermal, rocas fuertemente alteradas y fracturadas con estratificaciones y foliaciones a favor de la pendiente, con rellenos arcillosos, niveles freáticos someros.	Alto	4	Anaranjado
Materiales aluviales, coluviales y regolíticos de muy baja calidad mecánica: con estado de alteración avanzado, drenaje pobre, se incluyen las categorías 3 y 4 con niveles freáticos muy someros, sometidos a gradientes hidrodinámicos muy elevados.	Muy alto	5	Rojo

4.3.2. Factor de pendiente del terreno

Para el desarrollo de este factor, se trabajó con la capa de curvas de nivel a cada 10 metros en escala 1:25000 del IGN. Se insertó la capa de curva de nivel en formato shapefile al ArcGis, donde se realizó un clip de las curvas de nivel respecto a la cuenca en estudio. Posteriormente, se transformó esta capa en un TIM para poder pasar la información de la cuenca Barú en un ráster, de esta forma la capa ráster fue procesada en ArcGis para obtener la pendiente del terreno. Una vez obtenida la pendiente del terreno, esta fue clasificada de acuerdo con la Tabla 4. Finalmente, una vez llevada a cabo la clasificación de la pendiente, se generó el mapa de pendiente de la cuenca Barú.

Tabla 4. Clasificación del factor pendiente para susceptibilidad a deslizamiento.

Rangos de pendiente (grados)	Peso S_r	Condiciones del terreno	Colores sugeridos
0-2	1	Plano casi completamente	Medio verde oscuro
2-4	2	Inclinación suave	Verde ligero
4-8	3	Pendiente inclinadas	Amarillo ligero
8-16	4	Modelo escarpado	Amarillo anaranjado
16-35	5	Escarpado	Rojo claro
35-55	6	Muy escarpado	Rojo oscuro
>55	7	Extremadamente escarpado	Púrpura

4.3.3. Factor de humedad de suelo

En este caso se descargaron los datos del programa WorldClim-Global ClimateData, 2000, sistema que brinda la información en formato tiff (imagen de alta resolución), estas imágenes contienen información respecto a la precipitación mensual (mm/mes) para todo el mundo de un periodo de 1970 hasta 2020, a una resolución de 1 km², la cual es la mejor resolución del sistema. En total se descargaron 12 imágenes, una por cada mes del año, cada una contiene la precipitación media mensual (mm/mes) para el periodo de tiempo de 1970 al 2020.

Una vez descargada la información, se importaron las imágenes a ArcGis 10.8 para su debido procesamiento. Seguidamente, se realizó un resample a cada una de las imágenes para ajustar la resolución del píxel a 30x30 m, con el fin de que todos los mapas tengan el mismo tamaño de píxel y poder aplicar la Ecuación 4., de manera que se logre mantener una hegemonía del tamaño de los datos.

En este caso, se aplicó un balance hídrico simplificado, en donde se estableció una evapotranspiración potencial promedio para la zona de estudio de 125 mm/mes. Esta evapotranspiración fue restada de los datos de precipitación media mensual para obtener el contenido de humedad del suelo, para cada una de las imágenes descargadas del WorldClim-

Global ClimateData, 2000. Por lo tanto, de acuerdo con la Tabla 5, valores de precipitación media mensual menores a 125 mm/mes no indican un aumento en el contenido de humedad del terreno; para valores entre 125 y 250 mm/mes si indica un aumento en el contenido de humedad y valores mayores a 250 mm/mes indican un contenido elevado de humedad, lo que favorece la saturación de agua en el suelo. Esto se realizó para cada una de las 12 imágenes descargadas, ya que se requería la información para cada mes, desde enero hasta diciembre.

Seguidamente, se realizó una suma de las imágenes ya reclasificadas de acuerdo con la Tabla 5 para obtener una imagen final con pesos que oscilaron entre 0-24 unidades. A esta imagen se le realizó una reclasificación basada en la Tabla 6 para obtener el mapa final de humedad del suelo de acuerdo con los valores acumulados de los índices de precipitación.

El proceso para el desarrollo de este índice se resume en la Figura A 5 de la sección de ANEXO A, donde se muestra la aplicación de un resample en ArcGis a cada una de las imágenes descargadas, pasando de una calidad de 1 km² a un tamaño de 30 m², para comenzar a trabajar en cada imagen en la misma calidad de las demás capas. Posteriormente, se realiza en balance hídrico explicado con anterioridad y las clasificaciones de acuerdo con la Tabla 5 y Tabla 6.

Tabla 5. Clasificación de los valores medios mensuales de las precipitaciones.

Precipitación media mensual (mm/mes)	Peso S_h
<125	0
125-250	1
>250	2

Tabla 6. Factor de humedad resultante de la clasificación de los valores acumulados de los índices promedio de precipitaciones.

Valores acumulados de los índices de precipitación	Clasificación	Peso S_h	Color sugerido
0-4	Muy bajo	1	Verde oscuro
5-9	Bajo	2	Verde claro
10-14	Medio	3	Amarillo
15-49	Alto	4	Anaranjado
20-24	Muy alto	5	Rojo

4.3.4. Factor de intensidad sísmica

Para el factor de intensidad sísmica, se trabajó con la capa tipo polígono de intensidad sísmica del ATLAS Costa Rica del TEC, de los últimos 100 años, hasta el 2014. Se aplicó un clip respecto al área de estudio y se realizó una categorización basada en el valor de promedio

cuadrático de aceleración del suelo (PGA, por sus siglas en inglés). Posteriormente, de acuerdo con la Tabla 7, se realizó una asignación de pesos, basado en una clasificación de acuerdo con el PGA que indica un valor aproximado de aceleración para la intensidad sísmica de la Escala Mercalli Modificada (MM), a su vez, esto indica un grado de susceptibilidad para este factor. Finalmente, se generó un mapa basado en el PGA y este se transformó en un ráster con la categorización de pesos con un tamaño de celda de 30x30 m, el cual muestra un mapa con la intensidad sísmica.

Tabla 7. Factor de sismicidad de acuerdo con un evento de 100 años en la escala MM.

Intensidad MM	PGA (m/s²)	Grado de susceptibilidad	Peso T_s
III	0,098 - 1,226	Leve	1
IV	1,227 - 2,011	Muy Bajo	2
V	2,012 - 2,894	Bajo	3
VI	2,895 - 3,679	Moderado	4
VII	3,680 - 4,365	Medio	5
VIII	4,366 - 5,445	Elevado	6
IX	5,446 - 6,426	Fuerte	7
X	6,427 - 7,210	Bastante Fuerte	8
XI	7,211 - 8,388	Muy Fuerte	9
XII	>8,389	Extremadamente Fuerte	10

4.3.5. Factor de intensidad de lluvias

Para este factor, se obtuvieron datos de cuatro estaciones meteorológica del IMN y una del ICE, en donde se obtuvieron las precipitaciones máximas diarias para un periodo de tiempo del 2013-2023. A estas precipitaciones se les realizó un análisis de Kolmogorov-Smirnov para conocer si el método de Gumbell para diferentes periodos de retorno cumplía con los parámetros para ser aplicado con los datos de las estaciones. Una vez verificado el modelo, se procedió con el cálculo de la posible lluvia máxima para periodos de retorno de 5, 10 y 15 años. Esta información se encuentra en el Anexo A. No se emplearon datos del WorldClim-Global ClimateData, 2000, ya que el software no muestra datos máximos de precipitación, sino, datos promedio y datos totales mensuales, por lo que, para este caso, no es aplicable.

Una vez obtenida la información de los tres periodos de retorno, se cargó al ArcGis en formato tabla con sus respectivas coordenadas y los datos de lluvia (mm) para los tres periodos de retorno en cuestión.

Se aplicó una interpolación ráster en IDW para obtener las isoyetas, con esto se obtiene un estimado de la intensidad de lluvia en toda la cuenca de acuerdo con la información de las cinco estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca Barú. La interpolación se realizó con un tamaño de celda de 30 metros para mantener la homogeneidad con los demás mapas.

Posteriormente, se aplicó una reclasificación de acuerdo con la Tabla 8, donde se le asigna un peso basado en la precipitación máxima.

Tabla 8. Factor de intensidad de lluvia resultante de la clasificación de precipitaciones máximas diarias para un periodo de retorno de 5, 10 y 15 años.

Precipitación máxima	Clasificación	Peso T_p	Color
< 100	Muy Bajo	1	Verde Oscuro
101-200	Bajo	2	Verde claro
201-300	Medio	3	Amarillo
301-400	Alto	4	Anaranjado
>400	Muy alto	5	Rojo

4.3.6. Clasificación de susceptibilidad a deslizamiento

Una vez obtenidos todos los mapas de los 5 factores de susceptibilidad, se aplicó la Ecuación 4., en donde se obtuvo un mapa con valores entre 6 y 1250. Posteriormente, se realizó una reclasificación de acuerdo con la Tabla 9 para obtener el mapa final de susceptibilidad a deslizamiento. Se obtuvieron en total 4 mapas de susceptibilidad a deslizamiento, uno para cada periodo de retorno y uno más que conforma el mapa de validación de lo realizado.

Tabla 9. Clasificación de susceptibilidad a deslizamiento.

Valor de la ecuación (H)	Clase	Susceptibilidad a deslizamiento	Color
<6	I	Muy Bajo	Verde oscuro
7-32	II	Bajo	Verde claro
33-162	III	Moderado	Amarillo
163-512	IV	Medio	Anaranjado
513-1250	V	Alto	Rojo
>1250	VI	Muy alto	Púrpura

4.4. Validación de la metodología Mora-Vahrson

Para este proceso, primeramente, se buscaron imágenes satelitales en el sistema Sentinel-2 de acceso libre. Según las referencias de Umaña (2020), se buscaron imágenes desde el año 2018 al 2021 con el fin de encontrar una imagen que permitiera localizar eventos de deslizamientos que se originaran posteriormente a algún evento de lluvia. Basado en Umaña (2020), para el año 2020 se generaron cerca de 8 deslizamientos en la cuenca de Barú producto de las fuertes lluvias y en el Sentinel-2 se localizó una imagen satelital con fecha

del 21/12/2020, la cual se utilizó para ubicar visualmente los deslizamientos generados hasta esta fecha.

Se insertó la capa de la cuenca de Barú en formato KML y se realizó un recorte de la imagen satelital para solo tener la imagen con la ubicación exacta. Dicha imagen se descargó en la mejor calidad (10x10 m) para que la ubicación de los deslizamientos fuese más accesible y disminuir errores en la localización de estos. Posteriormente, la imagen se cargó a ArcGis y se insertaron puntos en una nueva capa shapefile para ir almacenando la ubicación de los deslizamientos.

Por otra parte, de acuerdo con la información de las estaciones meteorológicas del ICE y del IMN, se extrajeron las precipitaciones máximas del año 2020 y se insertaron en ArcGis por medio de un sistema de puntos georreferenciados. A través de una interpolación IDW, se crearon las isoyetas de precipitaciones máximas del 2020 para posteriormente clasificarlas de acuerdo con la Tabla 8. Una vez obtenida esta clasificación, se aplicó la Ecuación 4., con las capas de factores pasivos y activos que ya se habían obtenido con anterioridad. Es importante recalcar, que los factores pasivos y el factor de intensidad sísmica se supuso el mismo para el proceso de validación, solamente se agregó la nueva capa de intensidad de lluvia máxima del año 2020.

Una vez aplicada la Ecuación 4., se realizó una superposición de capas de los deslizamientos encontrados respecto a la susceptibilidad a deslizamiento para el año 2020 por medio de la herramienta “Extract values to points” que permite identificar la cantidad de deslizamientos que se ubican en cada una de las categorías de susceptibilidad a deslizamiento. Con esto, se obtuvo el porcentaje de deslizamientos respecto a la susceptibilidad a deslizamiento.

Además, se desarrolló una matriz de confusión, con el objetivo de identificar cuantitativamente la eficiencia de la metodología aplicada. Para esto, aparte de los 19 puntos identificados como deslizamientos, se agregaron otros 19 puntos donde no se aprecian deslizamientos en la imagen satelital. Una vez agregados estos puntos, se procedió a desarrollar la matriz de confusión y se aplicaron las Ecuaciones 1, 2 y 3 para conocer la efectividad de la metodología Mora-Vahrson para la cuenca Barú.

En este caso, la susceptibilidad a deslizamiento para el proceso de validación se clasifica en tres valores: moderado, medio y alto, esto de acuerdo con la metodología empleada. Se parte del hecho de que las regiones con medio y alto valor de susceptibilidad se toman como regiones donde deberían existir deslizamientos, mientras que el valor de susceptibilidad “moderado” será tomado como las regiones donde no deberían existir deslizamientos. Lo anterior con el fin de desarrollar la matriz de confusión de la forma en que se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Clasificación de la matriz de confusión a emplear en el proceso de validación.

Valor de Susceptibilidad	Hay deslizamiento	No hay deslizamiento
Alto	TP	FN
Medio	TP	FN
Moderado	FN	TN

Se utilizó el software R para llevar a cabo la curva ROC y el cálculo del AUC, el script que se desarrolló en R se muestra en la Figura A 4. Para este caso, es necesario contar con la probabilidad de ocurrencia de deslizamiento para cada píxel del mapa de susceptibilidad, como ArcGis no muestra este dato en particular, se estableció una probabilidad de ocurrencia de deslizamiento de 0,90 para las regiones con susceptibilidad alta, un valor de 0,50 para las regiones con susceptibilidad media y un valor de 0,10 para los valores con susceptibilidad moderada. Además, los puntos con deslizamientos fueron identificados con el número 1 (TP) y los puntos sin deslizamientos fueron identificados con el número 0 (TN), esto siguiendo la metodología de validación de V. Ortiz et al. (2023). En R se cargó el paquete pROC, el cual permite graficar la curva ROC y calcular el AUC con los datos de entrada de probabilidades predichas por ArcGis y las etiquetas otorgadas a los puntos con deslizamientos y sin deslizamientos. En la Tabla A 7 se muestra un resumen con la información de probabilidad predicha, grados de susceptibilidad y realidad observada de cada punto con o sin deslizamiento.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Aplicación de la metodología Mora-Vahrson en la Cuenca Barú

5.1.1. Factor litológico (S_i)

En la Figura 3 se muestra el factor litológico de la cuenca Barú, en donde se recalca que un 0,11% de la cuenca presenta un factor moderado caracterizado por rocas sedimentarias de tipo arenisca volcanoclástica, este tipo de litología se presenta en la parte más alta de la cuenca.

Por otra parte, un 98,43% presenta un factor medio donde predominan rocas sedimentarias como calizas, areniscas, lutita y turbidita. Estas características litológicas son el reflejo de las condiciones de formación de relieve antiguo, donde se encuentran formaciones de cuerpos intrusivos granitoides así como rocas sedimentarias y lavas (Alvarado et al., 2009).

Finalmente, un 1,46% presenta un factor muy alto caracterizado principalmente por depósitos superficiales como fanglomerados, depósitos de deslizamientos, pantanosos y de playa, esto corresponde a la parte más baja de la cuenca, principalmente en el margen de la desembocadura del río Barú.

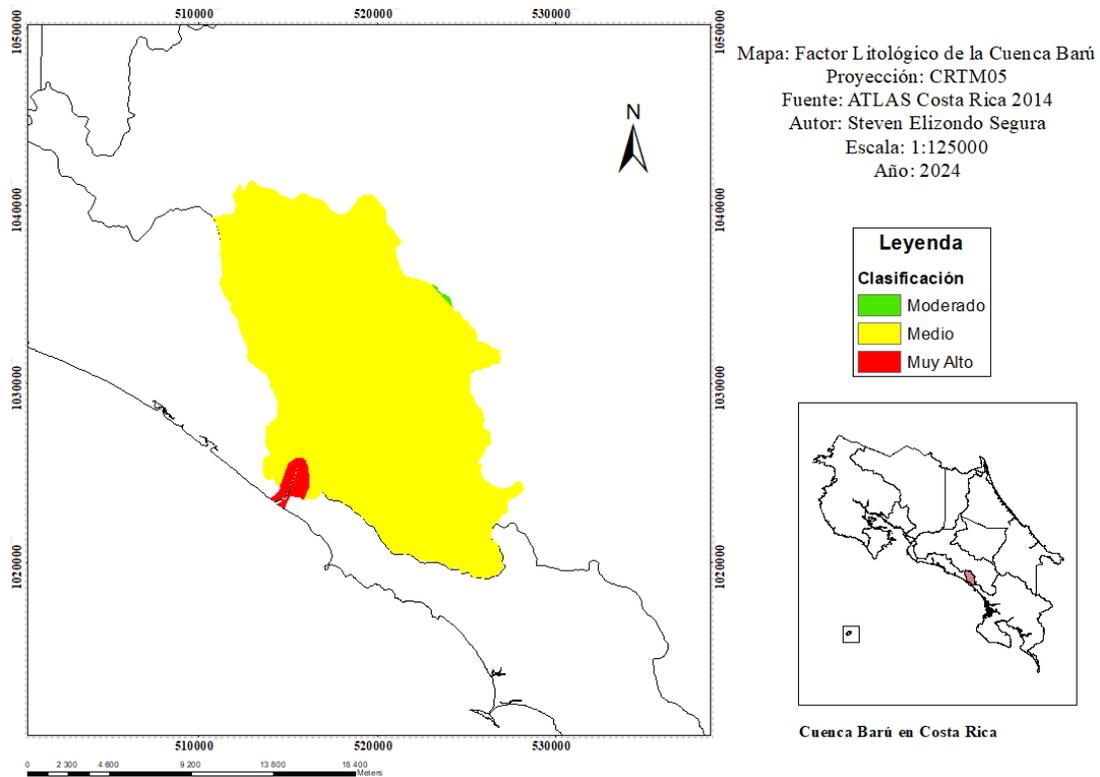


Figura 3. Factor litológico de la Cuenca Barú para el año 2014.

5.1.2. Factor pendiente del terreno (S_r)

En la Figura 4 se observa el mapa de factor de pendiente del terreno en la cuenca Barú. Esta imagen nos muestra como la zona se caracteriza por presentar pendientes categorizadas en factores entre 4 y 5, es decir, entre medio y alto, con pendientes entre 8° a 16° y 16° a 35° , respectivamente. Las secciones de terreno donde el factor de pendiente oscila entre muy bajo y moderado corresponden a sectores que bordean los márgenes de lo río Barú y Guabo. La sección norte y noreste de la cuenca presentan los valores de pendientes más altos, con factores de pendiente entre muy alto y extremadamente alto, superando los 55° de inclinación, es decir, zonas en donde las condiciones del terreno son extremadamente escarpadas.

La zona de estudio se caracteriza por presentar cañones profundos excavados por ríos y quebradas, que dan como resultados pendientes abruptas tanto en zonas altas como en zonas bajas, como lo es el caso de la cuenca Barú, que se caracteriza como una zona baja con elevaciones entre 10 a 1400 m.s.n.m, pero con pendientes importante entre 15° a 50° . Estas características del terreno son típicas de la fuerte formación productos de actividad volcánica antigua (Alvarado et al., 2009).

Autores indican que terrenos donde se localizan pendientes altas, entre 20° a 45°, son altamente susceptibles a deslizamientos, generando movimientos de tierra importantes, con barrancos de hasta 100 m. Lo anterior se presenta, con mayor frecuencia, producto de la combinación de fuertes lluvias, erosión, explotación del terreno producto de actividades agropecuarias y actividad sísmica frecuente (Aceves et al., 2016).

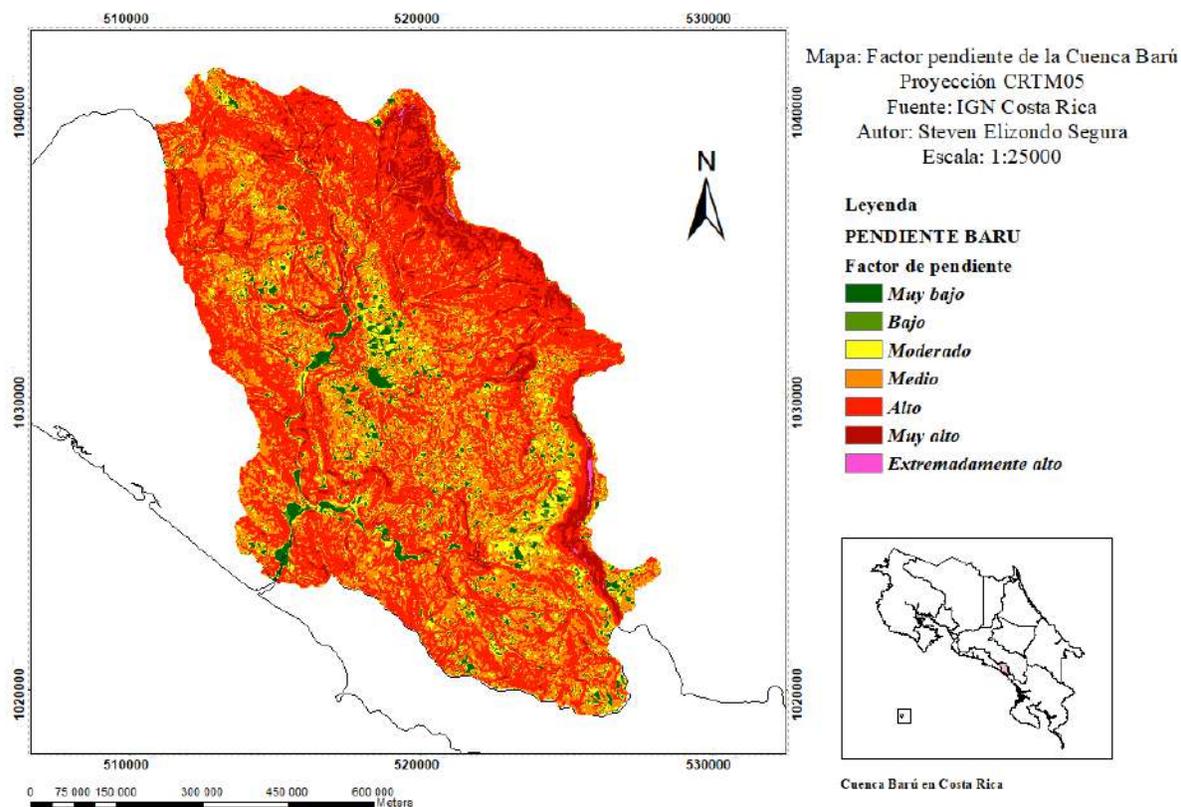


Figura 4. Mapa de factor de pendiente de la cuenca Barú.

5.1.3. Factor humedad del suelo (S_h)

En la Figura 5 se observa el factor de humedad de suelo para la cuenca de Barú para un periodo de tiempo de 1970-2020. Se denota que en la cuenca Barú existe un 7,04% del área con un valor medio de humedad de suelo esto corresponde a la parte noreste de la cuenca y una pequeña sección al suroeste en la desembocadura del río Barú; mientras que el restante 92,96% del terreno presenta un factor de humedad alto, sección que abarca básicamente toda el área de la cuenca en todas sus direcciones.

El contenido de humedad en el suelo se refiere a la cantidad de agua presente entre los poros y capas del terreno. A mayor contenido de humedad habrá una mayor separación de las partículas en el suelo, disminuyendo significativamente la cohesión entre estas, provocando una disminución en la defensa frente a las gotas de lluvia, generando problemas de erosión y deslizamientos.

El factor de humedad se relaciona directamente con el comportamiento del suelo, con su litología y por ende con su consistencia. El suelo puede pasar por diversas formas como plástica y pegajosa o blanda cuando el factor de humedad es alto. Por el contrario, a menor contenido de humedad el suelo adquiere una consistencia rígida. Además, con un suelo con un factor alto de humedad, se suele alcanzar una saturación del mismo, provocando la escorrentía superficial, factor que erosiona el relieve y es un detonante en la generación de deslizamientos por pérdida de cobertura superficial (Suazo, 2014).

En la cuenca Barú, el factor de humedad del suelo se aprecia como un factor alto en más del 90% del terreno, punto importante en la consideración de la formación de deslizamientos debido a la separación de las partículas del terreno y escorrentía que se puede generar producto del alto contenido de agua en el suelo de la zona.

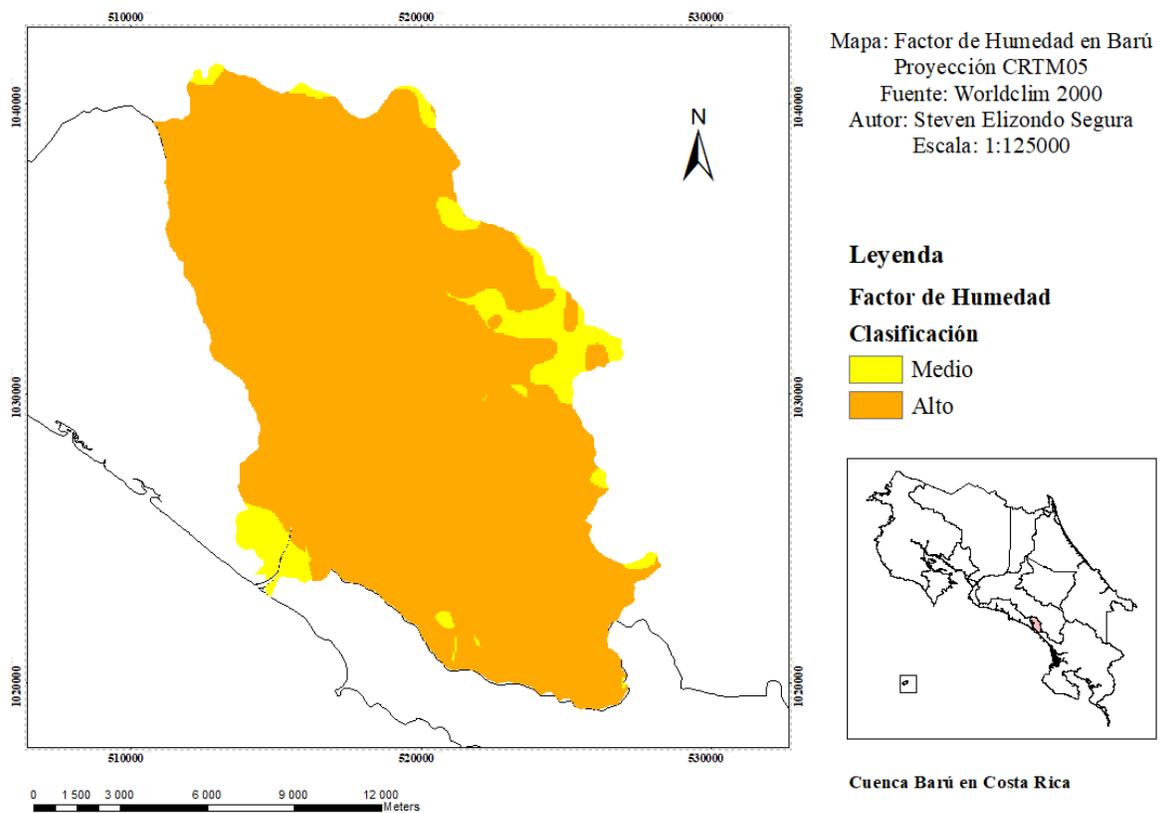


Figura 5. Factor de humedad de suelo en la cuenca Barú para un periodo de tiempo de 1970-2020.

5.1.4. Mapa de susceptibilidad por factores pasivos

En la Figura 6 se observa el mapa de susceptibilidad por factores pasivos (litología, humedad del suelo y pendiente) en la cuenca de Barú obtenido por medio de la Ecuación 4., y es el resultado del producto de los ráster de pendiente, litología y humedad del terreno. Estos factores, por su esencia, se consideran constantes para la zona de estudio, ya que no van a cambiar a menos que suceda alguna situación extraordinaria que altere por completo estas variables.

Se determina que un 31,91% de la cuenca presenta un índice de susceptibilidad medio, mientras que un 45,54% presenta un índice de susceptibilidad alto, los cuales suman el 77,45% del área total de la cuenca. Las secciones con valores muy altos de índice de susceptibilidad se localizan principalmente en la región norte y este de la cuenca, influenciados principalmente por las altas pendiente de la zona. Por otro lado, la sección suroeste de la cuenca, cerca de la desembocadura del río Barú, también presenta un índice de susceptibilidad muy alto, sin embargo, está más influenciado por el tipo de litología según el mapa mostrado en la Figura 3. En la Tabla 11 se muestra el porcentaje de área para los demás índices de susceptibilidad.

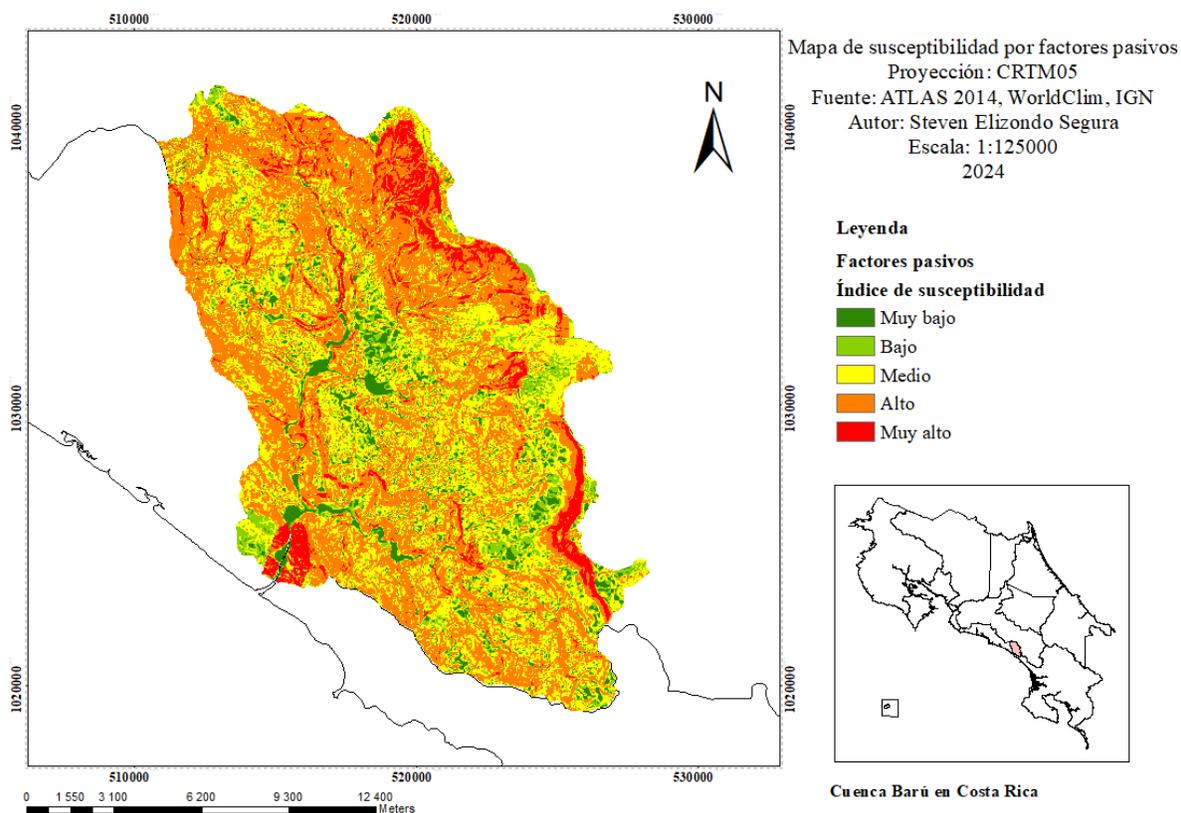


Figura 6. Mapa de susceptibilidad a elementos pasivos en la Cuenca Barú.

Tabla 11. Porcentaje de área de la cuenca Barú respecto a la susceptibilidad por factores pasivos.

Índice de susceptibilidad	Porcentaje de área
Muy bajo	5,72%
Bajo	9,82%
Medio	31,91%
Alto	45,54%
Muy alto	7,01%

5.1.5. Factor intensidad sísmica (T_s)

En la Figura 7, se puede observar el valor de aceleración sísmica (PGA) para la cuenca de Barú. Se determina que en la región predominan dos valores de aceleración, la parte norte de la cuenca presenta una aceleración entre 0,400-0,450 m/s^2 . Estos valores se clasificaron de acuerdo con la escala Mercalli Modificada, como categoría VIII, con un grado elevado de susceptibilidad y se denota con un color naranja en la Figura 8 y representa un 57,86% del área de la cuenca.

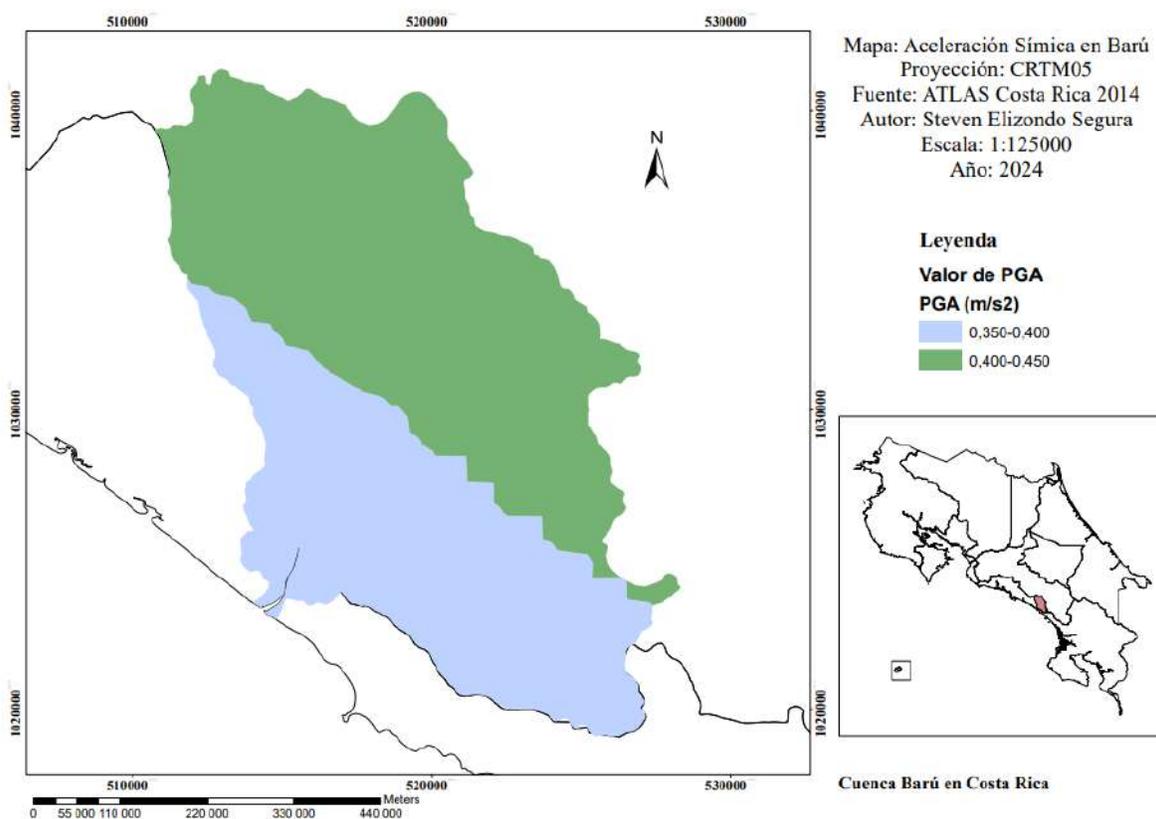


Figura 7. Aceleración Sísmica (PGA) de la Cuenca Barú.

Por otra parte, en la Figura 7, se aprecia que la sección sur de la cuenca presenta un valor entre 0,350-0,400 m/s^2 , valor que se clasifica como VII de acuerdo con la escala Mercalli Modificada, con grado medio de susceptibilidad y se denota con un color amarillo en la Figura 8, representando un 42,14% del área de estudio.

Algunos estudios indican que la zona de Pérez Zeledón ha registrado fuertes sismos años atrás, los cuales han alcanzado intensidades de VIII y IX en la escala de Mercalli Modificada. Mientras que en la zona central de este cantón, los valores promedios de sismos han rondado intensidades de VII y VIII, dejando a su paso severas consecuencias como deslizamientos de aproximadamente $4,6 \times 10^6 m^3$, principalmente en regiones montañosas (M. Mora & Peraldo, 2011). Se recalca que la zona norte de la cuenca Barú, se localiza en el cantón de Pérez Zeledón, sitio donde se presenta un valor elevado de intensidad sísmica según la Figura 8.

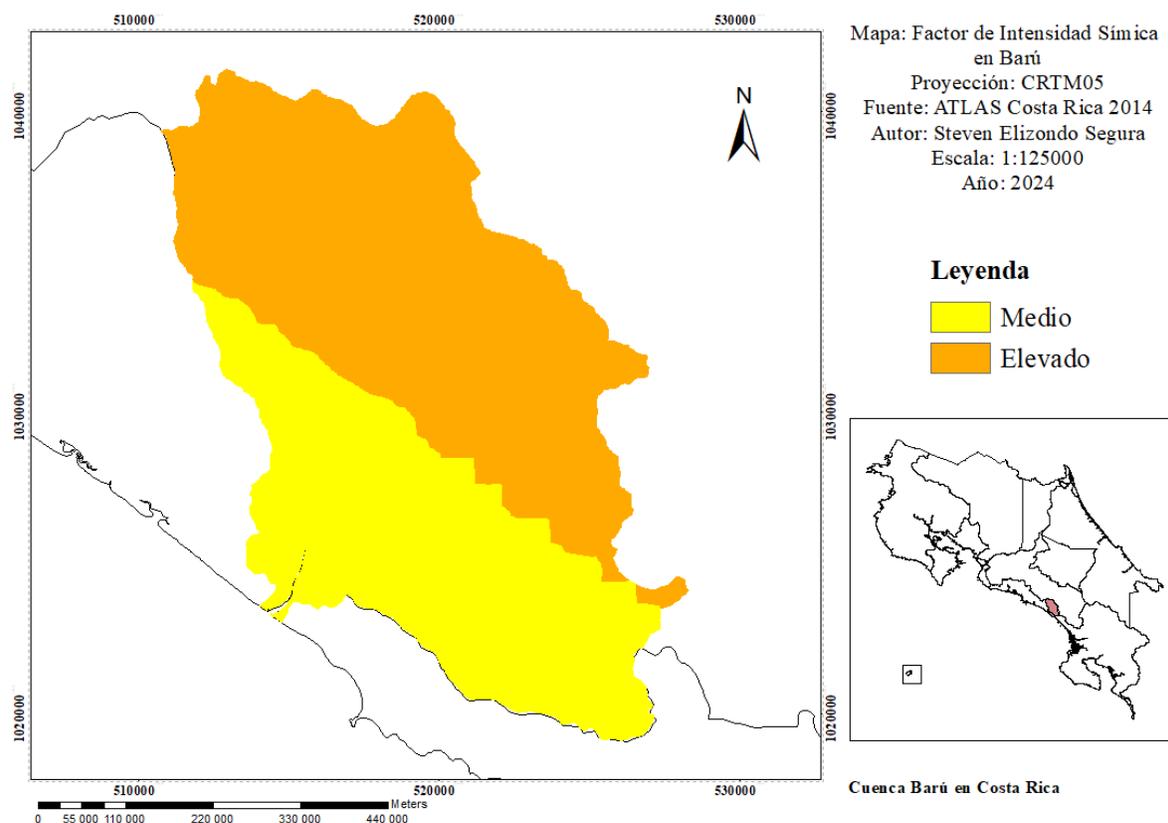


Figura 8. Factor de Intensidad Sísmica de la Cuenca Barú.

5.1.6. Factor intensidad de lluvia (T_p)

En esta sección se muestran los mapas de intensidad de lluvia para tres periodos de retorno distintos, los cuales son de 5, 10 y 15 años. Esto se realizó con el fin de presentar diferentes escenarios de lluvia de acuerdo con los registros de cinco estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio. Cabe recalcar, que la intensidad de lluvia es la única variable que se muestra cambiante en este trabajo, las demás variables se supondrán constantes de acuerdo con los valores ya obtenidos con anteriormente.

La Figura 9 muestra las isoyetas de precipitación en la zona de estudio para los distintos periodos de retorno. Para los tres periodos de retorno se mantiene la misma distribución de las lluvias, siendo las mínimas en la sección suroeste de la cuenca, para ir en aumento en dirección sureste y norte.

Se reconoce que las precipitaciones van aumentando conforme incrementa el periodo de retorno. Para el TR de 5 años se presentan precipitaciones mínimas entre 123-137 mm y máximas entre 236-251 mm. Para el TR de 10 años se presentan precipitaciones mínimas entre 138-155 mm y máximas entre 256-286 mm. Finalmente, para el TR de 15 años las precipitaciones mínimas se sitúan entre 147-165 mm y las máximas entre 288-305 mm. Lo anterior se resume como un aumento de las precipitaciones máximas de 54 mm entre TR 5 años y TR 15 años.

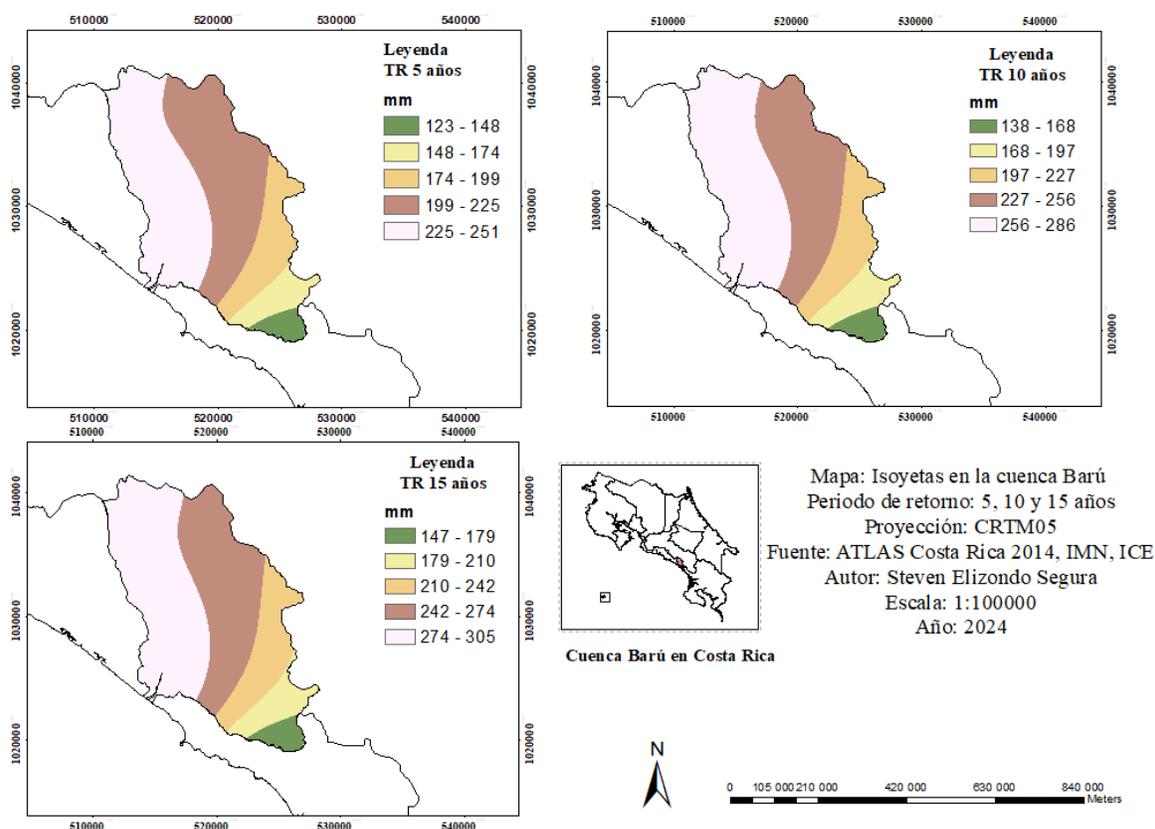


Figura 9. Isoyetas de precipitación en la cuenca Barú para periodos de retorno de 5, 10 y 15 años.

Por otra parte, en la Figura 10 se observa el factor de intensidad de lluvia para los tres periodos de retorno en cuestión. Para el periodo de retorno de 5 años, se determina que el factor de intensidad de lluvia se encuentra en un nivel medio para el 75,98% del área de estudio, mientras que un 24,02% de la cuenca presenta un factor bajo. La misma tendencia se presenta para el periodo de retorno de 10 años, en donde el 89,22% del área presenta un valor medio de intensidad de lluvia y un 10,78% un valor bajo. Para el periodo de retorno de 15 años el factor de intensidad de lluvia cambia ligeramente, ya que se presenta el factor alto en un 2,56% del área, mientras que la demás zona presenta un valor de medio y bajo en el 89,26% y 7,78% del área total de la cuenca. La Tabla 12 resume los valores de porcentaje de área para los distintos factores de intensidad de lluvia en la cuenca Barú.

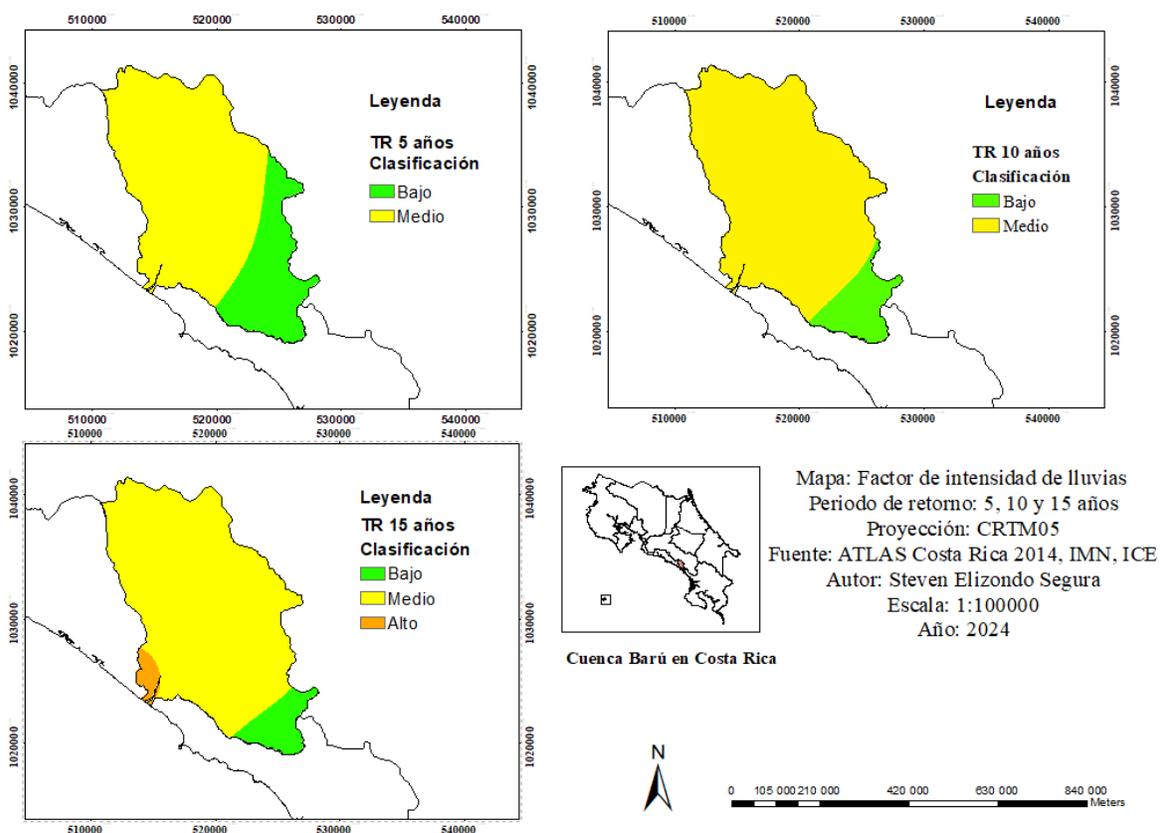


Figura 10. Factor de intensidad de lluvia en la cuenca Barú para periodos de retorno de 5, 10 y 15 años.

Tabla 12. Porcentaje de área de la cuenca Barú para los distintos tipos de intensidad de lluvia y periodos de retorno.

Clasificación	TR 5	TR 10	TR 15
Bajo	24,02%	10,78%	7,78%
Medio	75,98%	89,22%	89,66%
Alto	0,00%	0,00%	2,56%

5.1.7. Mapa de susceptibilidad a deslizamiento por factores activos

La Figura 11 muestra la susceptibilidad a deslizamiento por factores activos en la cuenca Barú para los periodos de retorno de 5, 10 y 15 años. Los factores activos corresponden a la intensidad de lluvia y a la intensidad sísmica, que de acuerdo con la Ecuación 4., corresponde a la suma del ráster de intensidad sísmica con los ráster de intensidad de lluvia para cada periodo de retorno.

Basado en la Figura 11 y en la Figura 8, se aprecia como para los tres periodos de retorno existe una marcada diferencia que corta a la cuenca por la mitad diagonal en dirección sureste-suroeste producto del factor de intensidad sísmica. Ya que, la intensidad sísmica presenta un factor elevado para la sección norte y un factor medio para la sección sur, siguiendo la misma línea de corte diagonal mencionada anteriormente.

A su vez, la Figura 11 muestra como el factor de susceptibilidad a deslizamiento “alto” se encuentra presente para los tres periodos de retorno aumentando conforme se aumentan los periodos de retorno, ocupando un 44,86%, 56,84% y un 60,00% para TR de 5, 10 y 15 años, respectivamente. Para el periodo de retorno de 15 años, la susceptibilidad por factores pasivos alcanza el nivel alto en toda la sección norte de la cuenca, y una pequeña sección en la parte sureste, cerca de la desembocadura del río Barú.

En cuanto a el factor medio de susceptibilidad a deslizamiento por factores activos, este se presenta en la sección sur de la cuenca, disminuyendo conforme se aumentan los periodos de retorno, pasando de abarcar un 36,66% del área de la cuenca para un TR de 5 años a un 32,72% para un TR de 15 años. Caso similar sucede con el factor bajo de susceptibilidad a deslizamiento por factores activos, donde pasa de abarcar un 14,69% del área de la cuenca para un TR de 5 años a abarcar un 7,28% del área para el TR de 15 años. Estas disminuciones en estos factores corresponden al aumento de las precipitaciones máximas de acuerdo a los periodos de retorno, que hacen aumentar el factor alto.

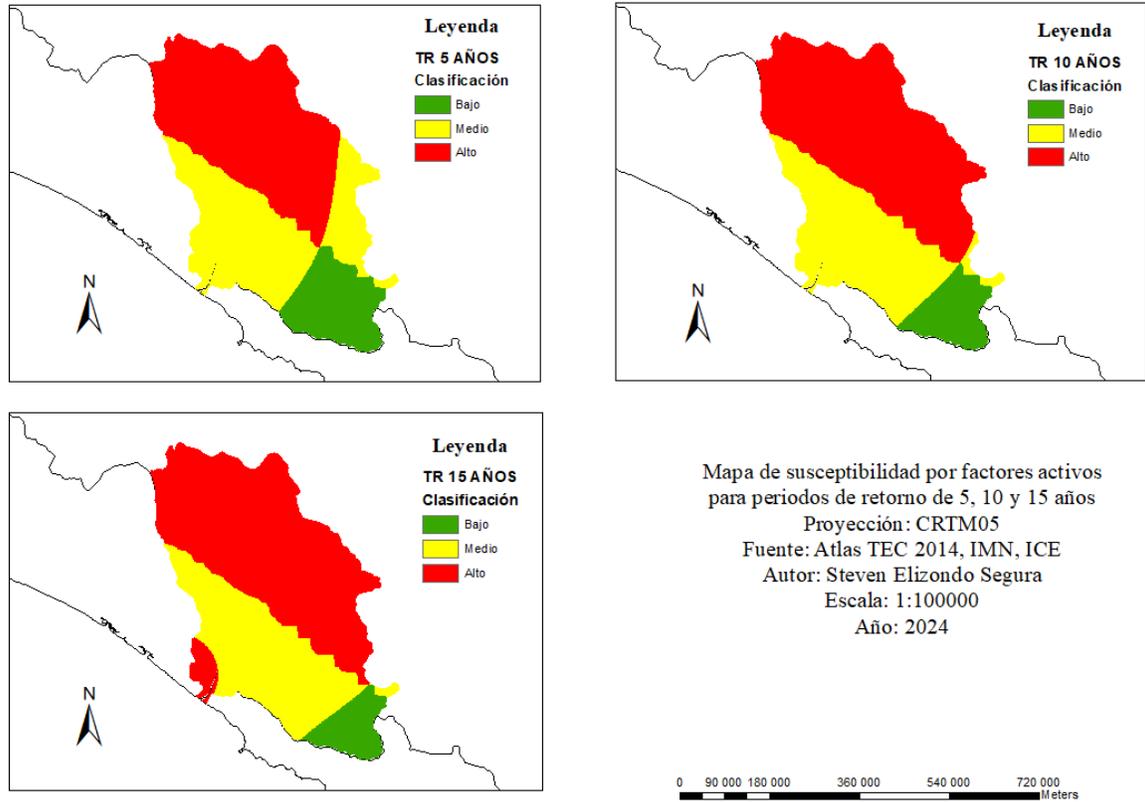


Figura 11. Susceptibilidad a deslizamiento por factores activos para periodos de retorno de 5, 10 y 15 años.

Tabla 13. Porcentaje de área de la cuenca Barú para los distintos tipos de susceptibilidad a deslizamiento por factores activos y periodos de retorno.

Clasificación	TR 5	TR 10	TR 15
Bajo	14,69%	8,45%	7,28%
Medio	36,66%	33,51%	32,72%
Alto	48,65%	56,84%	60,00%

5.2. Susceptibilidad a deslizamiento en la cuenca Barú

En la Figura 12 se observan los tres mapas de susceptibilidad a deslizamiento en la cuenca Barú para los periodos de retorno de 5, 10 y 15 años. La susceptibilidad a deslizamiento en la cuenca se encuentra entre valores de moderado, medio y alto, siendo el valor “medio” el que predomina para los tres periodos de retorno, con un 66,01%, 63,86% y 63,11% del área de la cuenca para los periodos de retorno de 5, 10 y 15 años respectivamente.

Por otra parte, la cuenca presenta valores de 30,57%, 32,72% y 33,49% del área total como zonas con valores de alta susceptibilidad para periodos de retorno de 5, 10 y 15 años, respectivamente. Cerca de un 90% del área con susceptibilidad alta se encuentra en la sección norte y noroeste de la cuenca, en donde se presentan las mayores pendientes del terreno y una susceptibilidad alta por factores pasivos, como se refleja en la Figura 4 y en la Figura 11, respectivamente.

En la sección sureste de la cuenca, cerca de la desembocadura del río Barú, para el periodo de retorno de 15 años, se observa, en la Figura 12, una susceptibilidad alta, proporcionada por la influencia de la litología de la zona y del incremento de las lluvias en esta sección, como se aprecia en la Figura 3 y en la Figura 10, respectivamente. Por otra parte, la Tabla 14 resume el porcentaje del área de la cuenca que presenta los diferentes tipos de susceptibilidad, y es importante apreciar que, aunque la diferencia se marca en tres puntos porcentuales, conforme aumenta el periodo de retorno de las lluvias máximas, aumenta el porcentaje de área con susceptibilidad alta, disminuyendo el área con susceptibilidad media y moderada.

Los datos de precipitaciones máximas, calculadas por medio de la metodología de Gumbell, para los periodos de retorno de 5, 10 y 15 años de las cinco estaciones meteorológicas utilizadas se muestran en la sección de ANEXO A, específicamente desde la Tabla A 1 hasta la Tabla A 5. Además, los cálculos de las pruebas de bondad de ajuste realizados por medio de Smirnov-Kolmogorov se muestran en esta misma sección, específicamente desde la Tabla A 13 hasta la Tabla A 17, en las cuales se aprecia que las pruebas de bondad se ajustan de forma correcta.

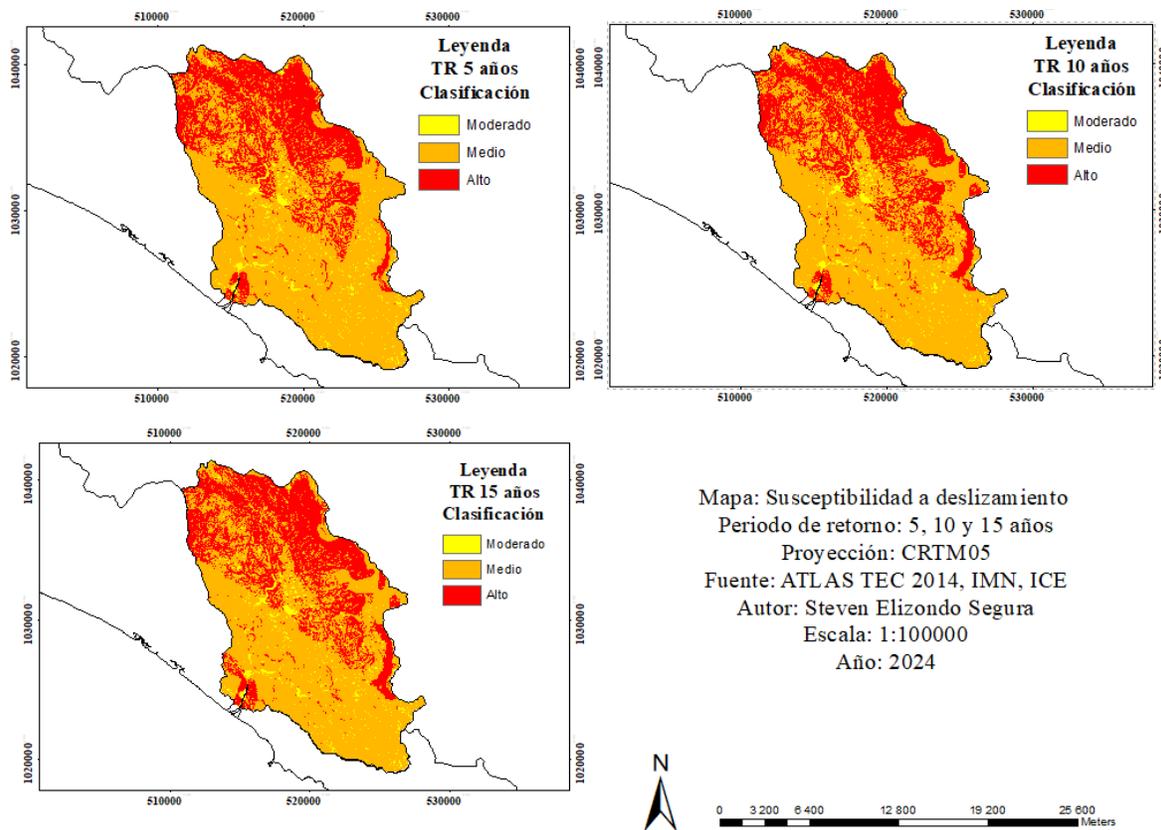


Figura 12. Susceptibilidad a deslizamiento en la cuenca Barú para periodos de retorno de 5, 10 y 15 años.

Tabla 14. Porcentaje de área de la cuenca Barú para los distintos tipos de susceptibilidad a deslizamiento.

Clasificación	TR 5	TR 10	TR 15
Moderado	3,42%	3,42%	3,41%
Medio	66,01%	63,86%	63,11%
Alto	30,57%	32,72%	33,49%

5.3. Validación de la metodología Mora-Vahrson

En la Figura 13 se aprecia la ubicación de 19 deslizamientos que se lograron localizar por medio de interpretación visual en la cuenca de Barú. Cabe destacar que posiblemente existan más deslizamientos, específicamente en la sección noroeste y sureste, sin embargo, no es posible ubicarlos debido a la nubosidad de la imagen, la cual, es la menor nubosidad encontrada en la zona por medio del Sentinel-2. Cerca de ocho deslizamientos se logran

visualizar en la zona más montañosa y alta de la cuenca, mientras que los restantes once se localizan en la sección central de la cuenca, donde se destaca el desarrollo agropecuario y vial de esta región.

El factor nubosidad se presenta como una limitante en la identificación de los deslizamientos por medio de la fotointerpretación, ya que las imágenes mostradas en el Sentinel-2 cuentan con alto grado de nubosidad, haciendo difícil la obtención de imágenes más precisas e identificación de zonas con deslizamientos. Este hecho disminuye la presión en la ubicación de zonas afectadas por eventos de deslizamientos, por lo que se debe tener en cuenta en la validación del modelo.

Algunos deslizamientos fueron ubicados en Google Earth a la fecha del 4 de febrero del 2025, y se logran visualizar de mejor forma en la Figura 14. Se aprecia que los deslizamientos identificados en diciembre del 2020 siguen presentes en febrero del 2025, posiblemente con un incremento en su área. Además, se observa que existen áreas aledañas a los deslizamientos identificados con pérdidas de suelo producto de actividades erosivas y la influencia de actividades agropecuarias (sitios encerrados con cuadros rojos). No se visualizan medidas de corrección o prevención a deslizamientos/erosión en esta zona, la cual es un sitio central de la cuenca donde se desarrolla gran parte de las actividades pecuarias.

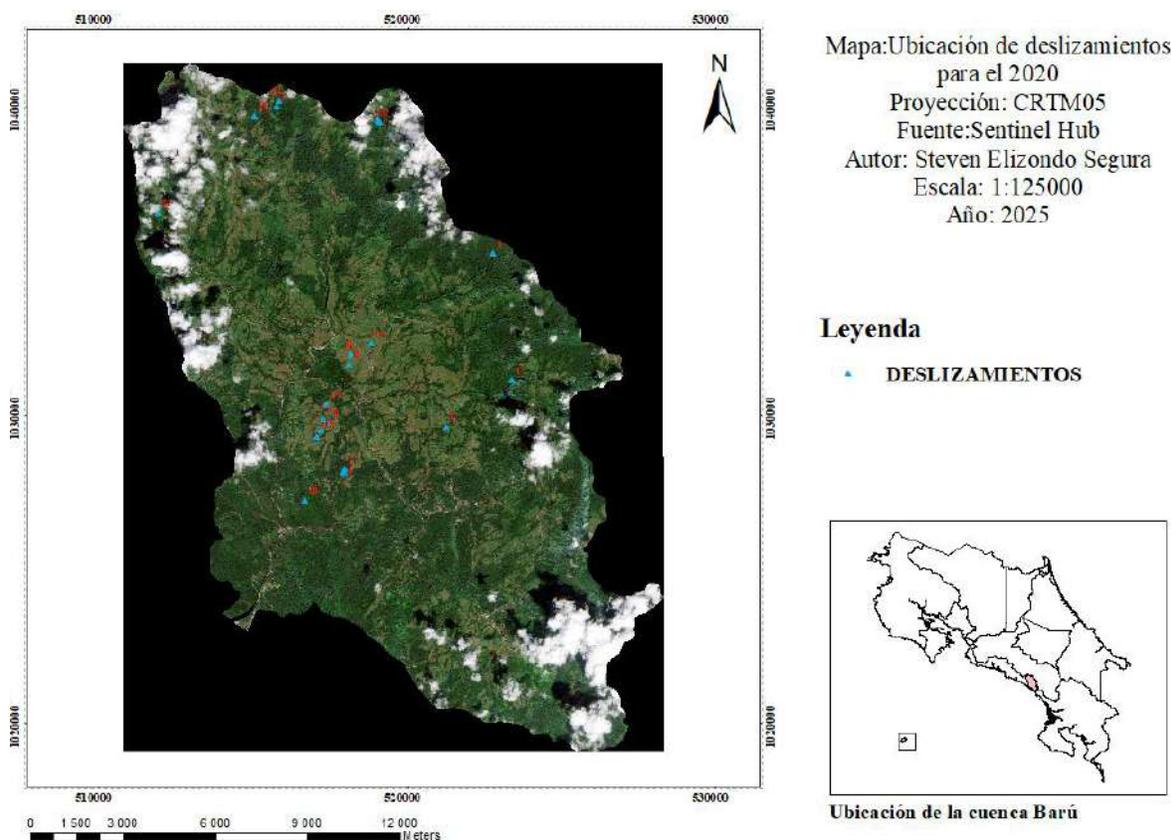


Figura 13. Ubicación visual de deslizamientos por medio de imagen satelital del Sentinel-2 del 21/12/2020



Figura 14. Ubicación de los deslizamientos 7, 8, 9, 15 y 16 en Google Earth (04/02/2025) en la cuenca Barú.

Nota: Sitios encerrados con cuadros rojos representan las áreas aledañas a los deslizamientos identificados con pérdidas de suelo producto de actividades erosivas y la influencia de actividades agropecuarias.

La Figura 15, muestra la susceptibilidad a deslizamiento en la cuenca Barú en el año 2020. Se identifica que, el 3,42% de la zona presenta una susceptibilidad moderada, un 88,19% presenta una susceptibilidad media y el 8,39% de la cuenca presenta una susceptibilidad alta. Esta información se resume en la Tabla 15.

La susceptibilidad moderada se localiza principalmente en la sección central de la cuenca, aunque existen puntos distribuidos por toda el área, influenciado principalmente por zonas con baja pendiente. Por otra parte, la susceptibilidad alta predomina en la región norte, noroeste y al este, donde se ubican las mayores pendientes, además, engloba una sección al

sur en la desembocadura el río Barú, influenciado principalmente por la litología de la región. Finalmente, la susceptibilidad media se localiza en la mayor parte de la zona, variando principalmente por las pendientes y lluvias que se logran dar en la región.

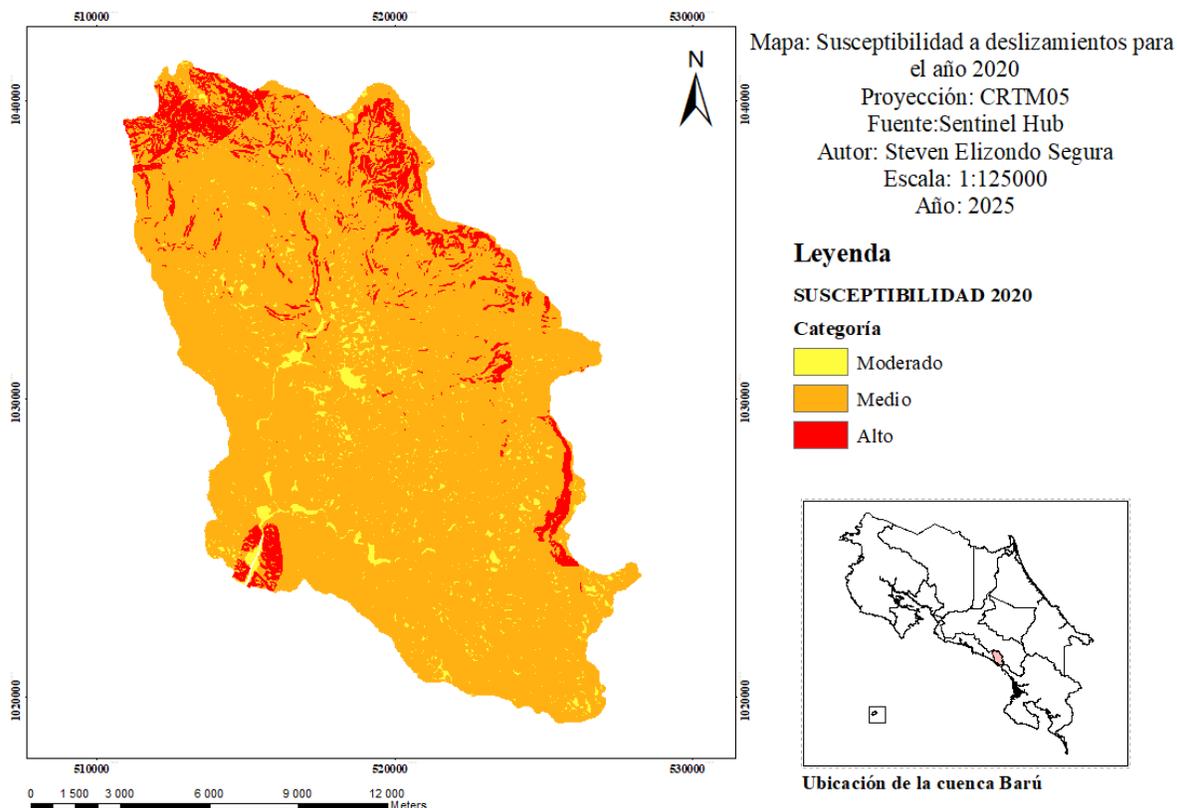


Figura 15. Susceptibilidad a deslizamiento en la cuenca Barú para el año 2020.

Tabla 15. Porcentaje de área de la cuenca Barú para los distintos tipos de susceptibilidad a deslizamiento para el año 2020.

Moderado	Medio	Alto
3,42%	88,19%	8,39%

Por otra parte, en la Figura 16 se visualiza la superposición de capas de los deslizamientos ubicados en la cuenca respecto a la susceptibilidad a deslizamiento para el año 2020. De acuerdo con la superposición realizada, se determina que un 5% de los deslizamientos encontrados se localizan en zonas con susceptibilidad moderada, un 69% con susceptibilidad media y un 26% con susceptibilidad alta.

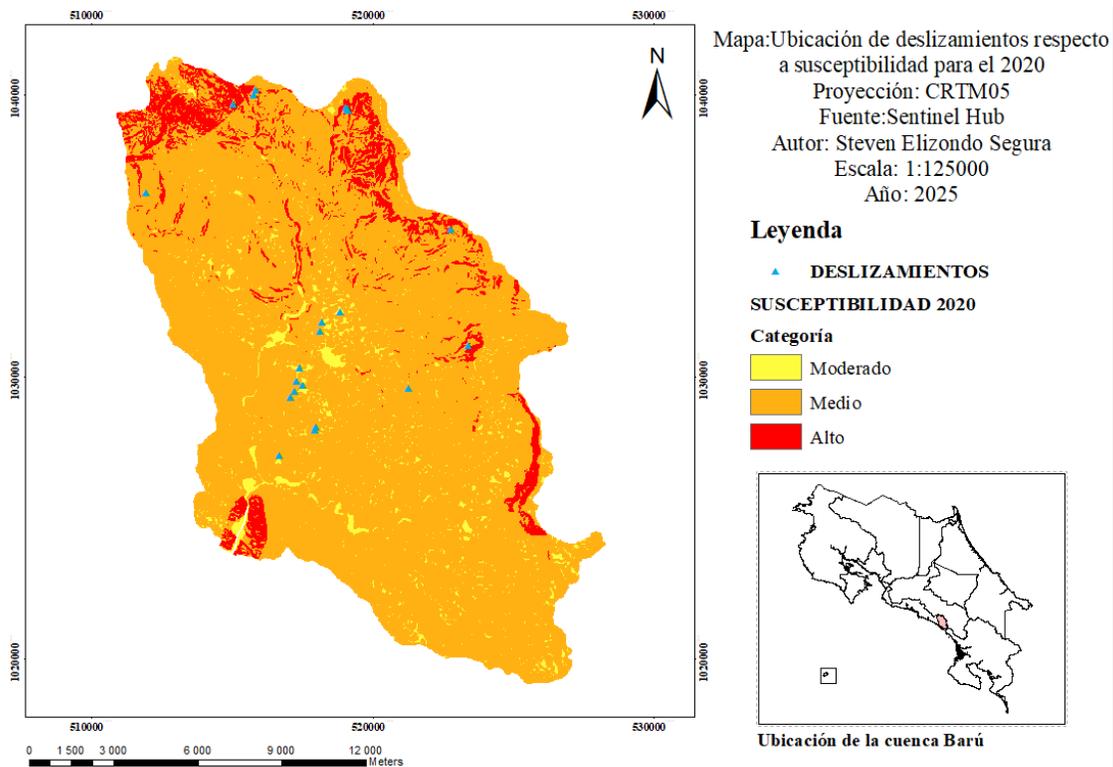


Figura 16. Superposición de capas de deslizamientos respecto a la susceptibilidad a deslizamiento en la cuenca Barú en el año 2020.

5.3.1. Matriz de confusión

La matriz de confusión desarrollada para la validación del presente trabajo se muestra en la Tabla 16 en la cual se logra apreciar la cantidad de puntos con deslizamiento y sin deslizamiento de acuerdo con cada valor de susceptibilidad. Basado en la matriz de confusión que se muestra en la Tabla 10 y de la Tabla 16 de acuerdo con las Ecuaciones 1, 2 y 3 se obtuvieron los valores de precisión (ACC), sensibilidad (SEN) y especificidad (SPE).

En el caso de la precisión se obtuvo un valor de 0,66, es decir, la metodología empleada para el análisis de susceptibilidad a deslizamiento fue efectiva en un 66% de las muestras encontradas, tanto para los puntos con deslizamiento como los puntos donde no se visualizan deslizamientos. Es importante analizar que el modelo ajusta de mejor forma los puntos donde se localizan deslizamientos, ya que 18 de 19 deslizamientos se localizan en regiones con valores de alta y media susceptibilidad, esto se relaciona con la sensibilidad, la cual indica la efectividad con que el modelo ubica correctamente los puntos con deslizamientos, valor que se establece en un 95%, un valor muy bueno en este caso, ya que solamente un deslizamiento de 19 se localiza en una región con moderada susceptibilidad a deslizamiento.

Por otra parte, se puede observar que 12 de 19 puntos donde no se visualizan deslizamientos se ubican en sitios con valor medio de susceptibilidad, lo cual se refleja en la especificidad,

parámetro que indica que tan bien el modelo ubica correctamente los puntos donde no hay deslizamientos, valor que se sitúa en un 37%. Lo anterior se encuentra relacionado con que el 88% del área de la cuenca presenta una susceptibilidad media a deslizamiento. Sin embargo, esto no indica que toda esta región deba presentar deslizamientos, solamente existe una mayor susceptibilidad y que por factores externos a los analizados en este trabajo, no se han presentado deslizamientos.

En la Figura 17 se muestra la curva ROC obtenida en el programa R con los datos de especificidad en el eje X y sensibilidad en el eje Y. El AUC presenta un valor de 0,74, es decir, el modelo presenta un rendimiento general de predicción del 74% según los criterios de la curva ROC. Roy-García et al. (2023), señalan en su artículo que para valores de AUC entre 0,70-0,80 el modelo de predicción se considera aceptable.

Trabajos de validación de susceptibilidad a deslizamiento utilizando análisis de AUC de una curva ROC se han desarrollado en diferentes regiones. En Ecuador se aplicó esta metodología para validar mapas de susceptibilidad a deslizamiento, donde se obtuvo un AUC de 0,84, una predicción bastante buena (Cargua, y otros, 2024). Esta variación del 10% respecto a la metodología empleada en este trabajo puede atribuirse a que Cargua et al. (2024), consideraron las capas de uso y cobertura de suelo, capa de proximidad a ríos y carreteras, las cuales podrían dar una mayor exactitud a la ubicación de deslizamientos.

Se considera que el modelo de predicción es aceptable, aunque se podría trabajar en algunas variables que se analizan, incluir o excluir algunas otras. Además, debido a la poca disponibilidad de imágenes con bajo grado de nubosidad en la zona de estudio, se dificultó la ubicación de más sitios con deslizamientos o la precisión de ubicación de estos. Por otra parte, el índice de humedad se puede considerar sobreestimado, debido al tamaño de los píxeles (1 km²) del ráster original y a la ejecución del comando “resample” para ajustar el área del píxel, lo cual, se muestra como una limitante en el cálculo de susceptibilidad, ya que la exactitud de los datos de precipitación puede ser muy general al área de estudio.

En resumen, se puede decir que la metodología Mora-Vahrson logra distinguir o ubicar de forma aceptable los sitios que presentan susceptibilidad a deslizamiento en la cuenca de Barú.

Tabla 16. Matriz de confusión de los puntos deslizamientos y sin deslizamiento respecto a la susceptibilidad a deslizamiento para el año 2020.

Valor de susceptibilidad	Hay deslizamiento	No hay deslizamiento
Alto	5	0
Medio	13	12
Moderado	1	7

Tabla 17. Parámetro de eficiencia de la matriz de confusión aplicada al proceso de validación.

Parámetro de eficiencia	Valor
Precisión	0,66
Sensibilidad	0,95
Especificidad	0,37
AUC	0,74

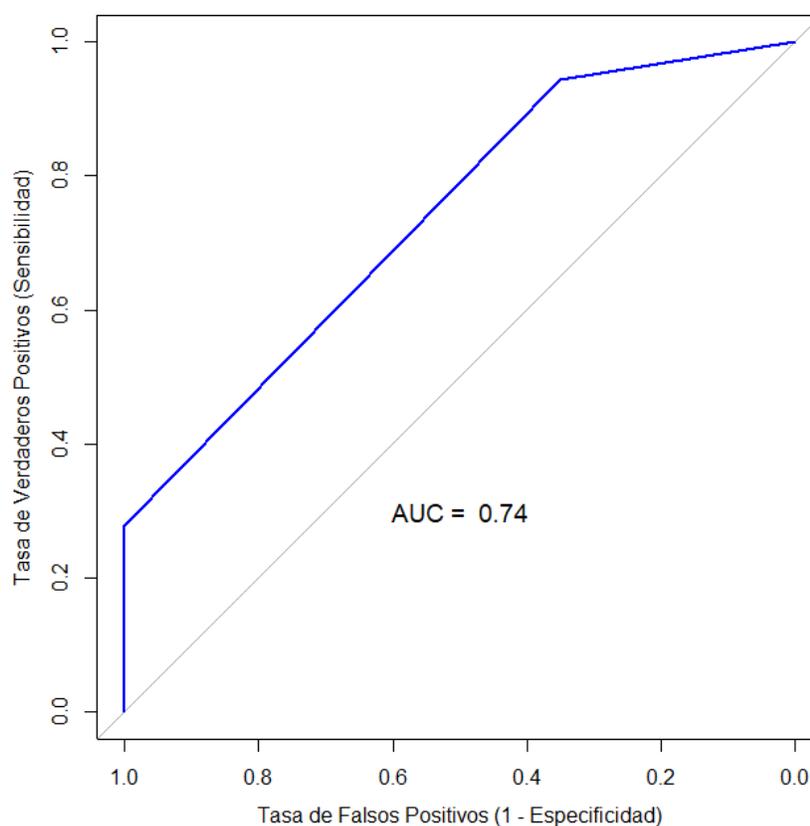


Figura 17. Curva ROC del proceso de validación.

5.4. Propuesta de soluciones y recomendaciones para la prevención de deslizamientos en la cuenca de Barú

Como se describió en secciones anteriores, la cuenca Barú presenta, en promedio, un 3% de su superficie con susceptibilidad moderada, un 63% con susceptibilidad media y un 33% con susceptibilidad alta a deslizamiento. Esto en promedio para los tres periodos de retorno, con tendencia a aumentar las secciones con mayor susceptibilidad conforme se aumenta el periodo de retorno de la intensidad de lluvias. Basado en esto, de manera general, la cuenca Barú es una zona susceptible a deslizamientos, evidenciado en el proceso de validación, por

lo tanto, es importante tener una guía base para dar soluciones y prevención a sitios con deslizamientos y aquellos donde puedan ocurrir.

Esta sección engloba una serie de recomendaciones basadas en Ingeniería de Biosistemas o en Bioingeniería para la prevención y tratamiento de deslizamientos en la cuenca de Barú. Se parte de varios aportes escritos desarrollados por autores en Costa Rica, en regiones tropicales de América Latina y un artículo desarrollado en España para tratar áreas erosivas, que brindan una guía de técnicas que se pueden desarrollar en regiones como la cuenca Barú.

5.4.1. Tratamiento de deslizamientos por medio de bioingeniería de suelos

Las técnicas de bioingeniería de suelo, también conocidas como estabilización biotécnica, consisten en el uso de vegetación para estabilizar taludes o zonas afectadas por deslizamientos. Estas técnicas emplean una variedad de especies vegetales, que incluyen árboles, arbustos y pastos, seleccionadas según las características del terreno. Su aplicación está orientada principalmente a taludes poco profundos y a laderas que presentan inestabilidad superficial, contribuyendo así a la prevención de deslizamientos y mejorando la seguridad del área. La bioingeniería presenta una serie de beneficios como lo es la mejora contra la erosión, efecto mecánico en el talud debido a un aumento de la resistencia al esfuerzo cortante y resistencia de tracción en el suelo (Grajales Saavedra et al., 2021).

Por otra parte, las técnicas de bioingeniería se presentan como una opción más económica de estabilización de taludes y reducción de la erosión, en comparación con métodos de estabilización por medio de obras civiles. Además, brindan un aporte ambiental importante, debido a la implementación de especies vegetales que ayudan a la fijación de carbono, mejoran el paisajismo del lugar y a su vez a dan sostén al suelo (Quezada, 2015).

El buen funcionamiento de la vegetación en estabilización de taludes depende de factores como la morfología, la resistencia, distribución e interacción del sistema radical con el suelo. Además, el uso de vegetación en suelos con problema de erosión y deslizamientos generan un aumento de la cohesión que es provocada por la unión de los compuestos fibra/suelo y la adhesión de la partícula de suelo a las raíces (Morgan & Rickson, 2005).

El tipo de sistema radical afecta directamente sobre la estabilización de taludes. Existen tres tipos de raíces que se explican a continuación, según (Quezada, 2015):

- Raíz pivotante: este tipo de sistema radical cuenta con características de ser vertical, centrado y profundo con algunas ramificaciones pequeñas.
- Raíz radial: se extiende lateralmente en forma de arco de buena forma, lo cual es ideal en la estabilización de deslizamientos poco profundos.
- Raíz lateral: presenta la característica de que el crecimiento lateral es mayor a la profundidad de las raíces. Su uso se emplea principalmente en paralelo a la superficie del talud.

Para un correcto desarrollo de técnicas de bioingeniería sobre la estabilización de taludes se recomienda la mezcla de especies vegetales de diferentes edades, lo cual brinda una mejor fijación del suelo. Los pastos son utilizados como cobertura superficial ante la erosión, por otra parte, el uso de árboles y arbustos se encargan de dar soporte y sostén a la sección más profunda del suelo. El uso de una sola especie vegetal para la estabilización de taludes retrasará el proceso de mejora, por esto se recomienda el uso de más de una especie, procurando siempre el uso de pastos o hierbas, ya que estas son de gran ayuda durante los primeros meses, mientras los árboles/arbustos se logran establecer

Se ha realizado un filtrado de las principales medidas a utilizar, de las cuales se tiene estructuras de contención del suelo con material vegetal como lo son el estaquillado, las fajinas, los escalones y paquetes de matorral. Se incluyen técnicas de retención y estabilización de taludes como las estructuras de tierra reforzada y muros vivientes; como también medidas para el control de la erosión como barreras vivas y barreras con vetiver. Por último, se recomienda como medida de reforestación la siembra de plantas autóctonas como medida de prevención de deslizamientos.

5.4.1.1. Estaquillado

El estaquillado consiste en la introducción de esquejes o estaquillas vivas no ramificadas sobre la superficie de un terreno, con el fin de que el desarrollo radical estabilice la zona y la proteja ante la erosión (CEDEX, 2011). Las estacas presentan la característica de enraizar al mismo tiempo que le quitan humedad a la zona cercana al deslizamiento, además, se deben utilizar estacas de especies entre dos a cinco años, se debe aplicar un corte en ángulo en el lado que se va a introducir en el suelo, mientras que la parte superior lleva un corte perpendicular (Silva, 2013), este detalle se aprecia en la Figura B 1.

Esta técnica funciona de buena forma para tratar pequeños deslizamientos y es común aplicarla o combinarla con mantas orgánicas o geotextiles para controlar de mejor manera la erosión superficial (Silva, 2013). Dentro de las ventajas de aplicar esta técnica se encuentran que no requiere una preparación exhaustiva del terreno, permite un recubrimiento rápido y una buena cobertura vegetal a bajo coste, reduce la velocidad de la corriente cerca de las orillas ya que aumenta la rugosidad del terreno (CEDEX, 2011). En la Figura B 2 se aprecia la forma en que se da el crecimiento radical y de la planta en la técnica de estaquillado.

El estaquillado es recomendado aplicarlo para estabiliza deslizamientos pequeños que presentan un alto porcentaje de humedad. Las estacas vivas brindan refuerzo y cohesión en el terreno, mientras que reduce la humedad, permitiendo un correcto drenaje del sitio (Downs, 2014).

Para la instalación de las estacas vivas, primeramente, se les debe cortar la sección superior de forma normal al eje y la parte inferior debe presentar forma de punta para facilitar la inserción en el suelo. La estaca debe ser clavada en forma normal a la superficie del

deslizamiento, de forma que queden las yemas hacia arriba, procurando una densidad de siembra de 4 estacas por metro cuadrado. Se recomienda que haya al menos 1,5 m entre estaca y que estas sean clavadas al menos 50 cm de profundidad (Downs, 2014).

El uso del estaquillado se puede dar en sitios como donde se localizan los deslizamientos 10 y 11 del Figura A 6 y los deslizamientos 8 y 16 de la Figura 14, ya que son sitios donde se da pérdida de material por erosión, sin formación de una cárcava como tal.

5.4.1.2. Fajinas

Las fajinas consisten en manojo de ramas vivas de plantas leñosas con reproducción vegetativa, que son atadas formando estructuras de forma cilíndricas, las cuales son colocadas al pie del talud o en terrazas, siguiendo las curvas de nivel del terreno y se cubren de forma parcial. Esta técnica reduce la pendiente del área de los deslizamientos al crearse discontinuidades, generando una reducción inmediata a la erosión superficial (CEDEX, 2011).

Las fajinas crean un conjunto de barrera en el talud, lo que ayuda a disminuir la velocidad de escorrentía y atrapa diferentes sedimentos. Por otra parte, reducen la pendiente del terreno, ya que generan un escalonado, quedando dividida en tramos cortos. Su uso se recomienda en sitios con poca pendiente, en donde la fuerza de arrastre es pequeña y en donde la principal causa de deslizamiento sea por erosión pluvial (Downs, 2014), tal como se presenta en los sitios con actividad ganadera en la cuenca Barú, que se aprecian en la Figura A 6 y la Figura 14.

El diseño de estas estructuras consiste en semicilindros de ramas o de hierbas, cuyos diámetros oscilan entre 0,20-0,40 m, con 2-9 m de longitud, los cuales se atan con alguna sogá, o mecate cada 0,3-0,4 m. En la Figura B 3, se aprecia una fajina y el correcto amarre de esta (Downs, 2014).

Respecto a la instalación de las fajinas, se debe comenzar por la construcción de una zanja con una profundidad de unos 20 cm y siguiendo las líneas de pendiente del terreno. Las fajinas se colocan semienterradas en las zanjas, posteriormente, se fijan con estacas, las cuales pueden ser vivas o inertes y deben presentar una longitud de entre 0,50-0,75 m. Luego, se cubren las fajinas ligeramente con suelo mixto (arena, grava y arcilla). Se debe sembrar pastos o hierbas en medio de las fajinas, ya sea por medio de semillas o de siembra (Silva, 2013). Por otra parte, el distanciamiento entre las fajinas depende de la inclinación y geometría del deslizamiento a tratar, esto se muestra en la Tabla 18. En la Figura B 4, se muestra la colocación de fajines en laderas.

Tabla 18. Distancia entre fajinas según la geometría del deslizamiento a tratar, modificado de Silva (2013).

Pendiente (°)	Distancia entre fajinas (m)	Longitud máxima de la pendiente (m)
45-33	0,80-1,25	5
33-25	1,25-1,50	6
25-20	1,50-2,00	9
20-18	2,00-2,50	12
18-14	2,50-2,75	15
14-11	2,75-3,00	18

5.4.1.3. Escalones de matorral

Los escalones de matorral es una técnica que se emplea con frecuencia para prevenir deslizamientos rotacionales. Este método mejora significativamente las condiciones de infiltración en suelos secos y drena suelos con altos contenidos de humedad. El diseño de este método se basa en la creación de pequeñas zanjas en el talud colocando ramas que tengan características de enraizar rápidamente, formando terrazas. Estas ramas se deben colocar en un ángulo perpendicular al talud, variando la profundidad a un máximo de dos metros (Silva, 2013).

Para la correcta colocación de los escalones se deben realizar zanjas con un ancho de 0,50-1,00 m siguiendo las curvas de pendiente del terreno, a un ángulo de 10°-20° de contrapendiente con el talud y a una profundidad mínima de 1 m. El distanciamiento entre las zanjas depende de la pendiente y de la humedad del talud, por lo que se recomienda el uso de la Tabla 19 para establecer el correcto distanciamiento. Se siembran ramas de forma perpendicular a la superficie del deslizamiento, de manera que las yemas de crecimiento apunten hacia fuera de la superficie, procurando que $\frac{3}{4}$ de la longitud de las ramas queden enterradas. Finalmente, las zanjas son cubiertas con tierra, tal como se muestra en la Figura B 5 (Downs, 2014).

Los escalones de matorral difieren de las fajinas en la orientación de las ramas y en la profundidad a las que son sembradas, ya que las plantas en la técnica de escalones de matorral se introducen de forma perpendicular al deslizamiento o al perfil de la ladera, mientras que las fajinas van de forma paralela al perfil, siendo sembradas de forma un poco más superficial. Los escalones de matorral se ubican como una de las mejores técnicas de estabilización de deslizamientos y de control de erosión en laderas (De la Cruz & Gomez, 2017), como los sitios que se encuentran poco protegidos de cubierta vegetal en la sección central de la cuenca Barú.

Tabla 19. Distancia entre escalones de matorral, modificado de Silva (2013).

Pendiente (H:V)	Distancia entre zanjas (m)		Longitud máxima de pendiente (m)
	Talud húmedo	Talud seco	
2:1 a 2,5:1	1,00-1,25	1,50-1,75	4,50
2,5:1 a 3:1	1,25-1,50	1,75-2,50	4,50
3,5:1 a 4:1	1,50-1,75	2,00-3,00	6,00

5.4.1.4. Paquetes de matorral

Los paquetes de matorral constituyen una técnica para el refuerzo y dar estabilidad a zonas con deslizamientos por fenómenos erosivos. De forma general, consiste el rellenar la zona de deslizamiento con capas alternas de ramas de matorral con características enraizantes, estacas de madera y tierra de relleno junto con tierra vegetal (De la Cruz & Gómez, 2017). De esta forma, brinda un doble anclaje, el proporcionado por las estacas verticales que van hacia el fondo del talud y el anclaje de la vegetación de matorral (Quezada, 2015).

Para un correcto diseño de los paquetes de matorral, se inicia con la colocación vertical de estacas de madera, las cuales deben presentar entre 1,5-2,5 m de longitud, en la zona más baja del deslizamiento a una profundidad de 1-1,25 m, con un distanciamiento de 30-50 cm. Posteriormente, se inserta una capa de ramas entre 10-15 cm de espesor en el fondo del talud, entre las estacas verticales, de forma que queden perpendiculares a la cara del deslizamiento. Los paquetes de matorral deben tocar el fondo del deslizamiento y sobresalir unos centímetros en la superficie, procurando que las yemas de las ramas queden orientadas hacia la superficie del talud. Cada conjunto de ramas debe ser cubierto con tierra vegetal compactada, para garantizar un crecimiento óptimo del conjunto vegetal (De la Cruz & Gómez, 2017).

Esta técnica es recomendable a aplicar en sitios con formaciones de cárcavas poco profundas, de unos 60 cm de profundidad con una longitud máximas de 10 metros (Downs, 2014), la formación de estas cárcavas es visible por medio de las imágenes satelitales, principalmente el zonas agropecuarias en la cuenca Barú. El diseño de paquetes de matorral se logra visualizar en la Figura B 6.

5.4.1.5. Estructuras de tierra reforzada

Esta técnica requiere una mayor inversión inicial y es más laboriosa que las anteriores. Sin embargo, su aplicación se centra principalmente en la estabilización de taludes con alta inclinación, ya que proporciona una cubierta vegetal casi inmediata y un control eficaz de la erosión. Es importante destacar que la pendiente del terreno donde se aplicará la estructura de tierra reforzada no debe superar los 60°, ya que este límite favorece el adecuado aporte de agua de lluvia a las plantas, optimizando su crecimiento y fortalecimiento (CEDEX, 2011).

Básicamente, el sistema de estructura de tierra reforzada consiste en un conjunto de capas de ramas entrecruzadas que se colocan en la superficie del deslizamiento en combinación con un sistema de envoltura de mantas sintéticas u orgánicas, las cuales dan soporte y confinamiento del suelo (Downs, 2014).

Para el diseño de esta técnica es necesario realizar una zanja en el pie del talud o deslizamiento y rellenarla con roca de escollera, estas rocas es común encontrarlas en márgenes de ríos o quebradas, las cuales funcionan como soporte estructural. Una vez colocada esta roca, se coloca una capa de tierra de al menos 0,15 m con ramas entrelazadas, las cuales debe sobresalir un 25% sobre la zona que ha sido excavada. Las ramas utilizadas deben quedar en contacto con la cara del deslizamiento, para que comiencen a enraizar en esta dirección. Finalmente, se coloca un geotextil sobre la capa de relleno, el cual se debe sujetar mediante estacas y se utiliza una tabla guía para dar forma y soporte al geotextil (Silva, 2013).

Downs (2014) recomienda el uso de suelos mixtos en esta técnica, es decir, una mezcla de arcilla, grava, arena y, preferiblemente, materia orgánica o con nutrientes de abono. Se busca que la cobertura de suelo utilizada sea lo suficientemente permeable para permitir la presencia de aire y a la vez impermeable para brindar sostén y dar humedad a las plantas utilizadas por largos periodos de tiempo.

En la Figura B 7, se muestra una vista en sección y en perspectiva de un diseño de estructura de tierra reforzada, donde se detallan algunas dimensiones y disposición espacial de los elementos a utilizar. Se recomienda la aplicación de esta técnica en sitios con deslizamientos más desarrollados, como los visible en la Figura 14, principalmente el 7, 9 y 15.

5.4.1.6. Muros vivientes

En este caso, se utilizan muros en forma de cajón o estructuras de tronco huecas, los cuales son rellenos con tierra y ramas para dar soporte o anclaje a las estructuras de madera contra la superficie del deslizamiento, haciendo de contrafuerte debido a su tamaño y peso (Quezada, 2015). La pendiente del deslizamiento y del terreno en general, no debe superar los 60°, esto para favorecer el crecimiento de plantas y el aprovechamiento del agua llovida. Aunque es un proceso más costoso que los anteriores, brinda un soporte y seguridad similar a construcciones de gaviones o muros de contención en situaciones similares (CEDEX, 2011).

Al igual que lo muros de tierra reforzada, los muros vivientes requieren de una mayor inversión inicial y de un proceso más laborioso, ya que se requiere hacer una excavación en contra pendiente de 10° a 15° al pie del talud o deslizamiento, lo cual requiere en la mayoría de casos el uso de maquinaria pesada. Una vez realizada esta excavación, se coloca piedra de escollera para dar soporte estructural. Seguidamente, se introducen largueros con diámetros de entre 0,1-0,25 m, los cuales van paralelo a la superficie del deslizamiento y con una

separación de entre 1-2 m. Sobre los largueros se colocan travesaños, idealmente con el mismo diámetro de los largueros, en dirección perpendicular a la superficie del deslizamiento con un distanciamiento de 1 m; estos travesaños deben sobresalir entre 0,15-0,75 m de los puntos de apoyo (Silva, 2013). En la Figura B 8 se detallan las vistas del diseño de muro vivientes.

5.4.1.7. Barreras de erosión con planta vetiver (*vetiver zizanoides*)

Los problemas erosivos que se dan en la cuenca Barú producto de las lluvias generan constantes desgastes al suelo y pérdida de material, además, producen desestabilización del suelo generando influencia a deslizamientos. Para este tipo de problemas resulta muy conveniente el uso de barreras de vetiver (*vetiver zizanoides*), un tipo de planta que ha sido utilizado por varios años en diferentes sitios para el control de la erosión.

Las características del vetiver se describen a continuación (Ridríguez, 2009):

- Raíces profundas que alcanzan entre 3-4 metros de profundidad en el primer año.
- Resistente a plagas, enfermedades e incendios.
- Tallos erguidos y firmes que soporta la fuerte escorrentía.
- Tolerancia a pH, desde 3,3 hasta 12,5.
- Alta eficiencia en absorción de nitrógeno y potasio.
- Tolerancia climas fuertes como sequía, inundaciones o temperaturas extremas de hasta -15°C a +55°C.
- Forma una densa barrera al ser plantado a una distancia corta, actuando como un filtro de sedimentos.

El uso de las barreras vivas de vetiver permite una reducción de la velocidad del agua que escurre sobre la pendiente o superficie del terreno. Se debe colocar estas barreras en sentido contrario a la pendiente, esto genera una reducción del flujo de agua incrementando la infiltración en el suelo y atrapando sedimentos que son transportados por el flujo de agua (Rodríguez, 2009).

Para la siembra del vetiver en sitios con deslizamientos se deben de seguir una serie de pasos sencillos, los cuales consisten: en la preparación de huecos para la siembra de unos 70-100 mm de profundidad y 50 mm de ancho, posteriormente se rellena el hueco con tierra firmemente (Downs, 2014). El espaciamiento de siembra de las barreras vetiver se observa en la Figura B 9.

La aplicación de barreras vetiver en la cuenca Barú funcionarían de buena forma en la reducción de pérdida de suelo por erosión y formación de zanjas de escorrentía, como las que se aprecian en la Figura 14. Rodríguez (2009) enfatiza en el aporte de reducción de pérdida de suelo por escorrentía superficial y el aumento en la firmeza del suelo al usar vetiver como barrera viva, esto se visualiza en la Figura B 10, en donde se aprecia una menor pérdida de tierra por arrastre al utilizar vetiver sobre otro tipo de plantas.

5.4.1.8. Barreras vivas

En la Figura 14, se observa que los deslizamientos 7, 9 y 15, presentan una forma de cárcava, la cual presenta una zanja principal en la sección central del deslizamiento producto del paso de agua llovida por este sector. Lo anterior genera arrastre de material superficial y una desestabilización del deslizamiento presente. En este tipo de casos, resulta conveniente aplicar el diseño de barreras vivas de retención.

Básicamente, las barreras vivas de retención consisten en un conjunto de hileras de arbustos, plantas o árboles que son plantados en dirección perpendicular a la pendiente del terreno. Se diseñan con el fin de disminuir la erosión hídrica, de generar retención e infiltración del agua al suelo. Además, atrapa el sedimento que baja por la cárcava, retiene el material que se ha erosionado, permite el reforzamiento de los costados de la cárcava y reduce la velocidad de escorrentía (C. Pérez, 2012).

Para el diseño de estas barreras se recomienda la preparación de fardos de unas 4 a 5 estacas de madera dura. Posteriormente, el fardo debe ser colocado al costado de la cárcava, a una profundidad de 0,3-0,5 m y se debe compactar el suelo de forma que haya contacto entre las estacas y la superficie de la cárcava, ya que es en este punto donde se va a desarrollar el crecimiento radicular. Se recomienda el uso de vetiver en el borde de la cárcava, para evitar la caída de material lateral al centro de la cárcava y dar sostén en estos bordes que suelen ser inestables (Downs, 2014). La Figura B 11 muestra la vista frontal del diseño de barreras vivas y la Figura B 12 muestra ejemplos de aplicaciones de estas estructuras en el tratamiento de deslizamientos.

5.4.1.9. Tratamiento de deslizamientos por medio de siembra

El método de siembra como solución y propuesta de remediación en la cuenca Barú, consiste en revegetar de forma manual o mecánica los taludes o zonas susceptibles por medio de una mezcla de semillas de especies autóctonas, en algunas ocasiones acompañado de una composición orgánica tipo “mulch”, con el objetivo de establecer una cubierta vegetal protectora que evite la erosión.

Esta metodología funciona de buena forma en zonas extensas o puntos focalizado y se puede desarrollar de forma manual o mecanizada, siempre y cuando las condiciones de pendiente y características del suelo lo permitan. No se recomienda en sitios donde existen taludes pronunciados o zonas donde se puedan desarrollar inundaciones, ya que las semillas pueden ser arrastradas. El uso de estas técnicas se presenta principalmente como medio de prevención de deslizamiento (CEDEX, 2011).

La siembra de las especies vegetales se puede dar por medio de hidrosiembra, la cual consiste en el esparcimiento de semillas, agua, fijadores, fertilizantes y aditivos, los cuales favorecen la adhesión de las semillas al terreno y brindan una mejor germinación. Es un método que

brinda buenos resultados, sin embargo, es importante acotar que se requiere de maquinaria especial para realizar la aspersión mecanizada y de terrenos relativamente estables y con poca pendiente para evitar accidentes. Algunas de las ventajas de esta metodología son:

- La vegetación se logra establecer entre un 20-25% más rápido que con cualquier otra técnica mecánica o manual.
- El uso del “mulch” permite condicione favorables para que la germinación sea más efectiva.
- El “mulch” permite dar una cubierta temporal al suelo, previniendo problemas por erosión.
- Las semillas y demás componentes se distribuyen de manera uniforme.

Se recomienda el uso de esta técnica en sitios donde las precipitaciones son bajas y con temperatura altas en época de verano (Silva, 2013). En la Figura B 13, se muestra un ejemplo de la aplicación de esta técnica.

Por otra parte, también se puede dar la siembra al voleo convencional se basa en una distribución de semillas autóctonas o adaptables a la zona que se desea tratar, se hace directamente en el suelo sin ningún tipo de aditivo, fertilizantes o algún otro agente que favorezca la germinación. Esta técnica es aplicable en terrenos de baja pendiente, sin embargo, se puede aplicar en taludes pequeños donde se haga la siembra de forma ascendente y en varias direcciones de manera que en la parte alta del talud y hacia los bordes haya mayor cantidad de semillas (Silva, 2013).

Se busca que las semillas sean colocadas de manera superficial en sitio donde hayan grietas o materiales de textura gruesa. Por otra parte, si se trata de terrenos finos, es recomendado utilizar algún tipo de mulch o enterrar un poco la semilla de forma que no se vea expuesta a agentes como el viento, la lluvia o el sol (Silva, 2013).

Además, existe la técnica de siembra en hoyos. Esta es una de las técnicas más comunes para evitar la erosión en sitios susceptibles. Básicamente, consiste en la siembra directa de semillas en hoyos previamente excavados. Para la estabilidad de taludes se recomienda un follaje medio, ya que el viento puede afectar las especies más grandes. Usualmente, los hoyos presentan profundidades de entre 0,10-0,20 m, con diámetros de entre 0,10-0,15 m y la distancia promedio entre hoyos es de 1-5m, dependiendo del tipo de planta a utilizar (Silva, 2013).

5.4.1.10. *Especies vegetales a utilizar en sistemas de bioingeniería*

Dentro de las principales especies de pastos y hierbas que se pueden utilizar como medio de protección ante la erosión en los suelos de la cuenca Barú destacan: Zacate amargo (*Paspalum conjugatum*), Escobilla (*Sida rhombifolia*), Santa María negra (*Piper aduncum*), Zacate cabezón (*Paspalum paniculatum*), Zacatón (*Paspalum vurgatum*), Pasto elefante (*Pennisetum purpureum*), entre otras especies. Los pastos se sitúan entre las especies más

efectivas para el control de erosión y la estabilización de taludes, actuando como la primera barrera ante la erosión en campos (Alvarado., et al, 2010).

Algunos autores como V. Alvarado et al. (2010), Downs (2014), Silva (2013), De la Cruz & Gómez (2017), entre otros, mencionan que se debe procurar establecer una combinación de especies vegetales para lograr una estabilización de deslizamientos y un control de erosión efectivo. Es por esto que se recomienda el uso de especies arbóreas y arbustivas de crecimiento vegetativo, en combinación con los pastos y hierbas mencionados anteriormente, para la cuenca Barú, como las siguientes: Achiote (*Bixa orellana*), Amapola (*Malvaviscus tintotia*), Guanábana (*Annona muricata*), Guácimo (*Guazuma ulmifolia*), Nancite (*Byrsonima crassifolia*), Calistemon (*Callistemon viminalis*), Aromo (*Acacia famesiana*), Itabo (*Yucca guatemalensis*).

El uso del Itabo (*Yucca guatemalensis*), resulta muy útil en los suelos de Costa Rica a nivel general, debido a su adaptabilidad al clima, suelo y a la gran capacidad que presenta para amarrar y dar sostén al suelo. El itabo fue recomendado por más del 50% de expertos consultados por V. Alvarado et al. (2010), por lo que se sitúa como una de las especies vegetales predilectas para ser utilizada en la cuenca Barú.

6. CONCLUSIONES

- La cuenca Barú presenta un área de 5,72%, 9,82%, 31,91%, 45,54% y 7,01% con susceptibilidad muy baja, baja, media, alta y muy alta, respectivamente, a deslizamiento por factores pasivos. El área con susceptibilidad alta es el factor que más predomina en la zona de estudio, influenciado por las elevadas pendientes de la zona, un contenido alto de humedad y un factor litológico medio.
- Respecto a la susceptibilidad a deslizamiento por factores activos, la cuenca Barú presenta un área con factor bajo de 16,69%, 8,45% y 7,28% para un TR de 5, 10 y 15 años, respectivamente; un área con factor medio de 33,66%, 33,51% y 32,72% para un TR de 5, 10 y 15 años, respectivamente; y un área con factor alto de 48,56%, 56,84% y 60% para un TR de 5, 10 y 15 años, respectivamente. Se concluye que el aumento en las precipitaciones para los TR en estudio incide de forma directa en el aumento del área con susceptibilidad alta y en la disminución de las áreas con susceptibilidad baja y media.
- Considerando la combinación de los factores pasivos y activos para susceptibilidad a deslizamiento, se concluye que la cuenca Barú presenta un área con factor moderado de 3,42%, 3,42% y 3,41% para un TR de 5, 10 y 15 años, respectivamente; un área con factor medio de 66,01%, 63,86% y 63,11% para un TR de 5, 10 y 15 años, respectivamente; y un área con factor alto de 30,57%, 32,72% y 33,49% para un TR de 5, 10 y 15 años, respectivamente. El factor medio y alto que engloba a la cuenca Barú se ven influenciados principalmente por las altas pendientes del terreno, por un contenido alto de humedad en el suelo y un aumento en las precipitaciones respecto a los TR en cuestión, esto último da como resultado un aumento de las áreas con susceptibilidad alta.
- La metodología Mora-Vahrson fue correctamente validada por medio del análisis de una curva ROC generada con la información de la matriz de confusión, con un valor de AUC de 0,74, que se considera aceptable para este tipo de casos.
- La aplicación de técnicas de bioingeniería, como el estaquillado, las fajinas, los escalones y los paquetes de matorral, se recomienda especialmente en áreas con susceptibilidad media y alta. En estos sitios, donde los problemas de deslizamientos y erosión son evidentes y progresivos, estas técnicas resultan fundamentales para lograr la estabilización del terreno y reducir la erosión superficial, un problema presente y creciente en la cuenca. La aplicación de las técnicas mencionadas en este escrito va a depender del tipo de deslizamiento encontrado, el tipo de suelo, el uso de suelo y la factibilidad económica para implementarlos.
- Se recomienda el uso de vegetación nativa y de rápido crecimiento radicular para su aplicación en la cuenca Barú. Según la información recopilada en la revisión bibliográfica, especies vegetales como el achioté, la guanábana, entre otras mencionadas en este trabajo, son especialmente adecuadas para esta región. Además, se destaca la importancia de utilizar plantas como el vetiver y el itabo, debido a sus

características particulares que favorecen la estabilidad del suelo y control de la erosión en la cuenca Barú.

- Las técnicas de siembra, como la hidrosiembra, siembra al voleo y la siembra en hoyos, deben aplicarse principalmente en áreas con susceptibilidad moderada. El objetivo de estas técnicas es revegetar las zonas más desprotegidas de cubierta vegetal, contribuyendo así a la prevención de deslizamientos y mejorando la estabilidad del terreno.

7. RECOMENDACIONES

- Para un proceso de validación más amplio y profundo, se recomienda la ejecución de visitas de campo a diferentes sectores de la cuenca Barú con el fin de validar de forma presencial sitios donde se presentan o se han presentado problemas por deslizamientos, ya que algunos sitios no son visibles por medio de imágenes satelitales debido a presencia de nubosidad, alta vegetación o tamaño del deslizamiento.
- Es recomendable la medición de la humedad del suelo por medio de sistemas en campo, ya que es probable que los datos del software WorldClim-Global ClimateData, 2000 se encuentren ligeramente sobreestimados debido a la obtención de la información de forma global, la cual, puede inducir a este tipo de errores, que se asumen despreciables por el tamaño de la cuenca, pero para efectos más precisos o de espacios menores, pueden afectar.
- Se recomienda la aplicación de metodologías similares a la de Mora y Vahrson que incluyan el uso de suelos, vegetación o cualquier otra información que se considere relevante para complementar los factores analizados en este caso.
- Se recomienda indagar acerca de las soluciones y técnicas empleadas por entes gubernamentales y población en general para dar solución y/o prevención a sitios con deslizamientos en la cuenca Barú.
- Es importante hacer un esfuerzo entre instituciones privadas y públicas para tener mejores y mayor cantidad de equipos como estaciones meteorológicas en regiones como la cuenca de Barú, ya que el encontrar de estas estaciones con datos actualizados y fiables fue una de las limitantes más importantes de este proyecto.
- Se recomienda el desarrollo de metodologías de cuantificación de erosión en zonas agropecuarias de la sección central de la cuenca, con el fin de crear un registro para conocer el comportamiento o tendencia erosiva en la zona y ejecutar medidas preventivas, como las abarcadas en este trabajo, para evitar la formación de deslizamientos.
- En caso de utilizar el sistema WorldClim-Global ClimateData, 2000, se recomienda aplicar el resample, si se requiere, una vez generado el mapa final de factor de humedad, ya que esto podría mejorar la calidad del proceso y tener un pixel mas adecuado en el mapa generado.

8. REFERENCIAS

- Aceves, F., Lengorreta, G., & Lugo, J. (2016). Sistemas de información geográfica y cartografía geomorfológica aplicados al inventario de deslizamientos y cartografía de susceptibilidad en la cuenca del río El Estado, Pico de Orizaba, México. *Investigaciones Geográficas*, 43–55. <https://doi.org/doi:https://doi.org/10.14350/rig.46503>
- Alvarado, G., Barquero, R., Taylor, W., Mora, M., Peraldo, G., Salazar, G., & Aguilar, T. (2009). Geología de la hoja de San Isidro, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 40, 111–122.
- Armesto, D. (2011). Pruebas diagnósticas: Curvas ROC. *Burgos: Revista Electrónica de Biomedicina*. <https://www.biomed.uninet.edu/2011/n1/armesto.pdf>
- Ávila, D. (2019). Estimación de la susceptibilidad a deslizamientos en la región sur-este de la Reserva Biológica Montecillos a través del método Mora-Vahrson. *REVISTA SICES*, 1(2), 51–59. https://www.researchgate.net/profile/Wilfredo-Flores-6/publication/330872938_EVALUACION_DEL_DESEMPEÑO_DE_LA_CONCESION_DE_LA_DISTRIBUCION_DE_LA_ENERGIA_ELECTRICA_EN_HONDURAS_HASTA_MAYO_2017/links/5d30f7e7299bf1547cc25f66/EVALUACION-DEL-DESEMPEÑO-DE-LA-CONCESION-DE-LA-DISTRIBUCION-DE-LA-ENERGIA-ELECTRICA-EN-HONDURAS-HASTA-MAYO-2017.pdf#page=57
- Barrantes Castillo, G., Barrantes Sotela, O., & Núñez Roman, O. (2011). Efectividad de la metodología Mora-Vahrson modificada en el caso de los deslizamientos provocados por el terremoto de Cinchona. *Revista Geográfica de América Central*, 47, 141–162.
- Carvajal, F. (2019). *Análisis de vulnerabilidad ambiental por deslizamiento en la microcuenca del río Tabarcia, cantón de Mora, república de Costa Rica*. Universidad de Costa Rica.
- Carvajal, F. (2021). *Susceptibilidad al deslizamiento mediante el uso de SIG, a escala 1:10000, del tramo vial comprendido desde: el Redondel del Rarrio el Plateado hasta el antiguo peaje del cantón Catamayo, provincia de Loja*.
- Chaverri, I. (2016). *Zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento, por medio de la metodología Mora-Vahrson, en la microcuenca del Río Macho, San José, Costa Rica; Zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento, por medio de la metodología Mora-Vahrson, en la microcuenca del Río Macho, San José, Costa Rica* [Tecnológico de Costa Rica]. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/7054/Zonificacion_susceptibilidad_deslizamiento_metodologia_mora_vahrson.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Chinchilla, R., Fonseca, G., & Herrera, V. (2010). *Propuesta de un procedimiento de elaboración de pronósticos para la evaluación financiera de proyectos según el análisis de la variabilidad de los valores promedios del tipo de cambio registrados entre el 17 de octubre del 2006 y 28 de febrero 2010*. Tecnológico de Costa Rica.

- Chirinos, J., Ruiz, M., & Carrdona, A. (2023). Modelo estadístico para predicción de deslizamiento generados por precipitación en la zona occidental de Honduras. *Universidad y Sociedad*, 246–255. <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v15n2/2218-3620-rus-15-02-246.pdf>
- CTDR. (2023). *Plan de desarrollo rural territorial Pérez Zeledón*. <https://www.inder.go.cr/perez-zeledon/Plan-de-Desarrollo-Rural-Territorial-Perez-Zeledon-2023-2028.pdf>
- Estado de la Nación. (2022). *Informe Estado de la Nación 2022*. www.estadonacion.or.cr28
- Fallas, N. (2015). *Mapas de susceptibilidad al deslizamiento en las microcuencas de los ríos Torres y Tibás, Costa Rica*. Tecnológico de Costa Rica.
- García, R., Paredes, C., Moreno, J., Rivas, R., & Flores, A. (2023). Curvas ROC: características generales y su uso en la práctica clínica. *Comunicaciones breves*, 61. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10754459/pdf/04435117-61-Suppl3-S497.pdf>
- González, F., Olguin, J. L., Guevara, R., & Palomera, C. (2023). Identificación espacial del riesgo por deslizamiento de tierra en el municipio de Autlán de Navarro, Jalisco, México. *Revista Geográfica de América Central*, 1(70), 349–376. <https://doi.org/10.15359/rgac.70-1.13>
- Grajales Saavedra, F., Vallarino, R., Mejía, G., & Centella, D. (2021). Bioingeniería de taludes: evaluación del uso de árboles y arbustos como posible mecanismo para incrementar el factor de seguridad. *Revista de Iniciación Científica*, 7(2), 26–38. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v7.2.3336>
- Hernández, W., Rivas, C., Rubio, J., & Torrecilla, C. (2006). *Guía para la gestión local de riesgo por deslizamientos*.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. (2006). Los sistemas de información geográfica 1. *Geoenseñanza*, 11(1), 107–116. <http://www.humboldt.org.co/humboldt/mostrarpagina.php?codpage=70001>
- Jaime, E., Larín, R., & Garea, E. (2011). *Towards Raster Spatial Analysis Methods at the Semantic Level*. 15(1), 91–106.
- Jiménez, J., & Aristizábal, E. (2018). Propuesta metodológica para la zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en proyectos lineales: Caso de estudio Tramo 2, vía Medellín - Turbo. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 43, 14–23. <https://doi.org/10.15446/rbct.n43.64683>
- Jiménez, M. (2022). Propuesta y evaluación metodológica para la delimitación de la evolución del uso del suelo y las zonas de amenaza mediante el uso de sig, en el cantón de Montes de Oca. En *Universidad de Costa Rica*. Universidad de Costa Rica.

- Legorreta Paulín, G., Alanís Anaya, R. M., Arana Salinas, L., & Aceves Quesada, F. (2018). Evaluación de la eficiencia de predicción a deslizamientos usando un modelo cartográfico-hidroológico: Caso de estudio Cuenca la Carbonera, flanco SE del Volcán Pico de Orizaba. *Investigaciones Geográficas*, 95. <https://doi.org/10.14350/rig.58387>
- Mena, M. (2022, septiembre 2). *CNE registra 880 deslizamientos; hay 125 zonas susceptibles a estos eventos en Costa Rica*. El Observador.
- Mora, M., & Peraldo, G. (2011). Análisis macrosísmico del terremoto de Buena Vista de Pérez Zeledón. *Revista Geológica de América Central*, 44, 41–70. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rgac/n44/a03n44.pdf>
- Mora, S., & Vahrson, W. (1994). Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination. *Environmental & Engineering Geoscience*, xxxi (1), 49–58. <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.xxxi.1.49>
- Moreno, R., Blanquer, G., & Ml, J. (2008). *Morfología de las cuencas hidrográficas*. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10782/Morfologia%20cuenca.pdf?sequence=1>
- Morgan, R., & Rickson, R. (2005). *slope stabilization and erosion control: A bioengineering approach*.
- Obregón, C., & Lara, J. (2013). *El mapa de susceptibilidad a movimientos en masa: una herramienta para la gestión sostenible del territorio*. 25, 49–64. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/espacioydesarrollo/article/view/10622/11094>
- Ordoñez, J. (2011). *¿Qué es cuenca hidrológica?* https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf
- Ortiz, J. (2021). *Modelación hidrológica de la subcuenca del río Balsar en el distrito de Ciudad Cortés*.
- Ortiz, V., Polo, C., Giraes, D., & Manco, D. (2023). Análisis de susceptibilidad por movimientos en masa implementando el método Mora-Vahrson modificado para el corregimiento de Chemesquemena (Cesar, Colombia). *TECNURA*, 77(27), 46–69.
- Pérez, A. (2011). *Dieño de un sistema basado en bosques aleatorio para la detección de tumores cerebrales mediante imágenes hiperespectrales*. https://oa.upm.es/66908/1/TFG_ALBERTO_MARTIN_PEREZ.pdf
- Porras, J. (2013). *Guía de dieño bioclimático según clasificación de zonas de vida de Holdridge* [Universidad de Costa Rica]. <https://cedi.ucr.ac.cr/tesis/EA/EA-057.pdf>
- Quesada, A. (2012, abril 27). Deslizamiento amenaza comunidades en el Sur. *Al Día*, 1–1. http://www.aldia.cr/ad_ee/2012/abril/27/nacionales3153063.html

- Quesada, A. (2018). Comparación de la Metodología Mora-Vahrson y el Método Morfométrico para Determinar Áreas Susceptibles a Deslizamientos en la Microcuenca del Río Macho, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 1(60). <https://doi.org/10.15359/rgac.61-2.1>
- Quesada-Román, A., Moncada-López, R., Paz-Tenorio, J. A., Espinoza-Jaime, E., Gutiérrez-Gutiérrez, C., Castellón-Meyrat, A., & Acosta-Galeano, N. (2018). Las investigaciones sobre movimientos de laderas en Costa Rica, Honduras, México y Nicaragua: enseñanzas desde la academia, las agencias de cooperación y las instituciones públicas. *Revista Geográfica de América Central*, 1(60), 17. <https://doi.org/10.15359/rgac.60-1.1>
- Quezada, L. (2015). *Estabilización de taludes con métodos de bioingeniería*.
- Ramirez, M., & Ghanem, A. (2006). Estudio comparativo de los diferentes métodos utilizados para la predicción de intensidades máximas de precipitación para el diseño adecuado de estructuras hidráulicas. Saber, Universidad de Oriente. *Universidad Oriente*, 18(1), 189–196. <https://www.redalyc.org/pdf/4277/427739430012.pdf>
- Rojas, A., & Aguilar, J. (2018). *Mejoramiento de la sostenibilidad, cantidad y calidad del agua en el. San José: Universidad de Costa Rica*.
- Segura, G., Badilla, E., & Obando, L. (2011). Landslide susceptibility in the Siquirres-Turrialba corridor. *Revista Geológica de América Central*, 45, 101–121.
- Suarez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales* (Ingeniería de Suelos Ltda., Ed.; I, Vol. 1). Ingeniería de Suelos Ltda. <https://desastres.medicina.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101.pdf>
- Suazo, A. (2014). *Influencia de la humedad inicial en la erosión hídrica de talud* [Universidad del Bio-Bio]. http://repositorio.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/392/1/Pardo_Barrera_Victor_Jose.pdf
- UNICEF. (2014). *Manual para la Evaluación de Desastres*. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/df2fa48c-418c-4b2a-957c-0bdd97181d27/content>

9. ANEXO A

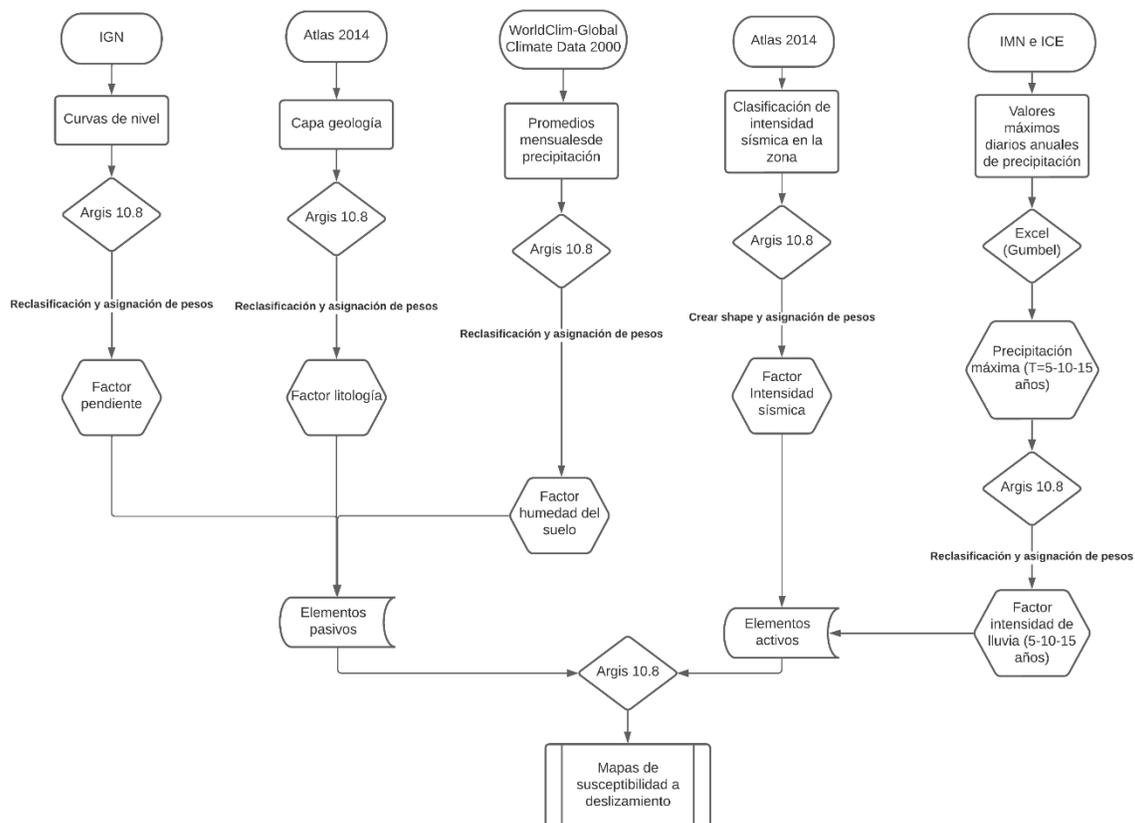


Figura A 1. Metodología aplicada para la obtención de mapa de susceptibilidad a deslizamiento en la cuenca Barú

Tabla A 1. Tabla de periodo de retorno de la estación Hacienda Barú

Periodo de retorno	Variable reducida	Precipitación mm	Probabilidad de ocurrencia	Corrección intervalo fijo
Años	Y_t	$X_t(\text{mm})$	$F(x_t)$	$X_t(\text{mm})$
2	0,36651	180,4636	0,50	203,92
5	1,49994	235,5946	0,80	266,22
10	2,25037	272,0961	0,90	307,47
15	2,67375	292,6899	0,93	330,74

Tabla A 2. Tabla de periodo de retorno estación Guapil

Periodo de retorno	Variable reducida	Precipitación mm	Probabilidad de ocurrencia	Corrección intervalo fijo
Años	Yt	Xt(mm)	F(xt)	Xt(mm)
2	0,36651	170,133	0,50	192,25
5	1,49994	208,014	0,80	235,06
10	2,25037	233,0946	0,90	263,40
15	2,67375	247,2448	0,93	279,39

Tabla A 3. Tabla de periodo de retorno estación Repunta

Periodo de retorno	Variable reducida	Precipitación mm	Probabilidad de ocurrencia	Corrección intervalo fijo
Años	Yt	Xt(mm)	F(xt)	Xt(mm)
2	1,49994	95,64172	0,80	108,08
5	2,52519	108,9094	0,92	123,07
10	2,86193	113,267	0,94	127,99
15	3,11335	116,5206	0,96	131,67

Tabla A 4. Tabla de periodo de retorno estación Tinamaste

Periodo de retorno	Variable reducida	Precipitación mm	Probabilidad de ocurrencia	Corrección intervalo fijo
Años	Yt	Xt(mm)	F(xt)	Xt(mm)
2	0,36651	70,98175	0,50	80,21
5	1,49994	88,10843	0,80	99,56
10	2,25037	99,44779	0,90	112,38
15	2,67375	105,8454	0,93	119,61

Tabla A 5. Tabla de periodo de retorno estación Arunachala

Periodo de retorno	Variable reducida	Precipitación mm	Probabilidad de ocurrencia	Corrección intervalo fijo
Años	Yt	Xt(mm)	F(xt)	Xt(mm)
2	0,36651	154,9112	0,50	175,05
5	1,49994	202,957	0,80	229,34
10	2,25037	234,7675	0,90	265,29
15	2,67375	252,7147	0,93	285,57

Tabla A 6. Precipitación máxima para el año 2020 registrado en las distintas estaciones meteorológicas de la zona de estudio

Estación	Precipitación máxima (mm)
HACIENCA BARÚ	169,6
GUAPIL BARÚ	182,8
REPUNTA	108,08
TINAMASTE	100,73
ARUNACHALA	214,2

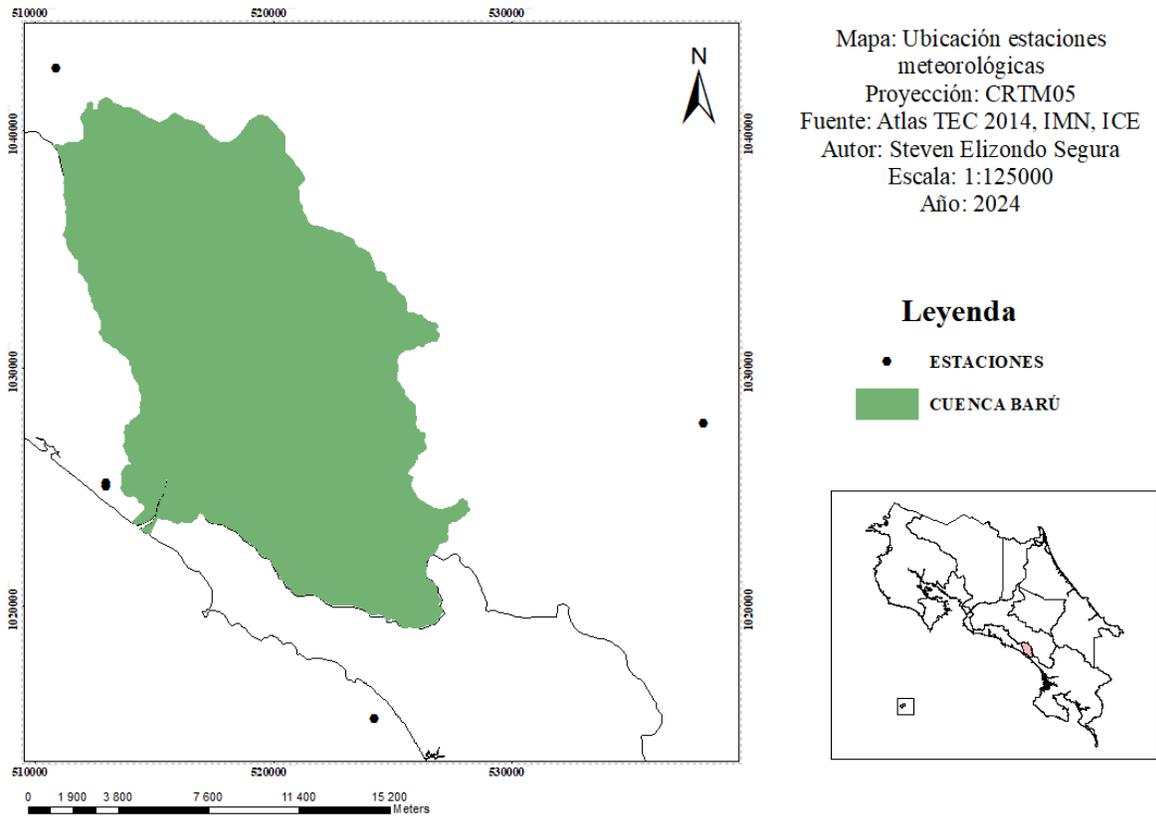


Figura A 2. Ubicación de estaciones meteorológicas en la zona de estudio

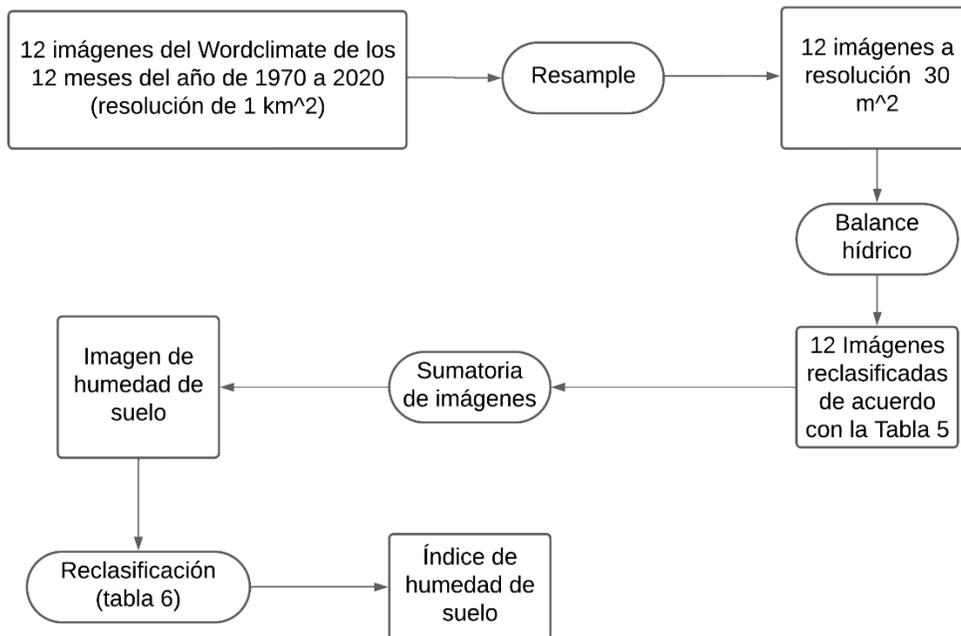


Figura A 5. Diagrama del proceso para la generación del factor humedad de suelo

Tabla A 7. Tabla resumen de los datos de validación utilizados en R

PUNTO	SUSCEPTIBILIDAD	PROBABILIDAD	REALIDAD	REALIDAD
1	ALTO	0,9	1	SI
2	ALTO	0,9	1	SI
3	ALTO	0,9	1	SI
4	ALTO	0,9	1	SI
5	ALTO	0,9	1	SI
6	MEDIO	0,6	1	SI
7	MEDIO	0,6	1	SI
8	MEDIO	0,6	1	SI
9	MEDIO	0,6	1	SI
10	MEDIO	0,6	1	SI
11	MEDIO	0,6	1	SI
12	MEDIO	0,6	1	SI

13	MEDIO	0,6	1	SI
14	MEDIO	0,6	1	SI
15	MEDIO	0,6	1	SI
16	MEDIO	0,6	1	SI
17	MEDIO	0,6	1	SI
18	MEDIO	0,6	0	NO
19	MEDIO	0,6	0	NO
20	MEDIO	0,6	0	NO
21	MEDIO	0,6	0	NO
22	MEDIO	0,6	0	NO
23	MEDIO	0,6	0	NO
24	MEDIO	0,6	0	NO
25	MEDIO	0,6	0	NO
26	MEDIO	0,6	0	NO
27	MEDIO	0,6	0	NO
28	MEDIO	0,6	0	NO
29	MEDIO	0,6	0	NO
30	MEDIO	0,6	0	NO
31	MODERADO	0,1	1	SI
32	MODERADO	0,1	0	NO
33	MODERADO	0,1	0	NO
34	MODERADO	0,1	0	NO
35	MODERADO	0,1	0	NO
36	MODERADO	0,1	0	NO
37	MODERADO	0,1	0	NO
38	MODERADO	0,1	0	NO



Figura A 6. Visualización de deslizamientos 10 y 11 en Google Earth (04/02/2025)

Tabla A 8. Datos de precipitaciones máximas en la estación de Hacienda Barú

Datos	
Año	PP (mm)
1	139,2
2	145,1
3	147,5
4	152,2
5	163,1
6	169,6
7	200
8	200
9	208,6
10	212,5
11	360

Tabla A 9. Datos de precipitaciones máximas en la estación de Guapil

Datos	
Año	PP (mm)
1	139
2	142,3
3	144,6
4	147,6
5	148,9
6	149,2
7	182,8
8	187,4
9	213,9
10	223,6
11	269,6

Tabla A 10. Datos de precipitaciones máximas en la estación de Arunachala

Datos	
Año	PP (mm)
1	114,3
2	117,4
3	118,1
4	119,6
5	122,8
6	153,2
7	200
8	214,2
9	218,4
10	260,4

Tabla A 11. Datos de precipitaciones máximas en la estación de Tinamaste

Datos	
Año	PP (mm)
1	48,09
2	56,77
3	59,9
4	64,15

5	64,49
6	66,08
7	67,13
8	87,81
9	100,3
10	100,36
11	100,73

Tabla A 12. Datos de precipitaciones máximas en la estación de Repunta

Datos	
Año	PP (mm)
1	59,9
2	64,15
3	65,5
4	66,08
5	87,6
6	98
7	100,36
8	122,8
9	144,6
10	182,8
11	214,2

Tabla A 13. Prueba de bondad de ajuste por Smirnov-Kolmogorov en la estación de Hacienda Barú

Gumbell			
F(xm) Gumbell	Fo(xm)- F(xm)	F(Xm) Log- Gumbell	Fo(xm)-F(xm) Log Gumbell
0,166186513	0,08285318	0,110032108	0,026698775
0,205921469	0,039254802	0,165676896	0,000989771
0,223004623	0,026995377	0,190567989	0,059432011
0,257704009	0,075629324	0,241777463	0,09155587
0,342344139	0,074322528	0,364675333	0,051991334
0,393862004	0,106137996	0,435344381	0,064655619
0,616464733	0,033131399	0,691954721	0,108621388
0,616464733	0,050201934	0,691954721	0,025288054
0,669064287	0,080935713	0,741503209	0,008496791
0,691105865	0,142227468	0,76115509	0,072178243
0,984759654	0,068092987	0,980027186	0,063360519

α	46,37732783	α	0,202386496
μ	166,321785	μ	5,096126252
Dcritico	0,410005		
Dmax	0,142227468	Dmax	0,108621388
Dcritico>Dmax	Si se ajusta	Dcritico>Dmax	Si se ajusta

Tabla A 14. Prueba de bondad de ajuste por Smirnov-Kolmogorov en la estación de Guapil

Gumbell			
F(xm) Gumbell	Fo(xm)- F(xm)	F(Xm) Log- Gumbell	Fo(xm)-F(xm) Log Gumbell
0,141103734	0,057770401	0,125231094	0,041897761
0,171081648	0,004414982	0,16441737	0,002249296
0,193463048	0,056536952	0,193956198	0,056043802
0,224230926	0,109102408	0,234473961	0,098859372
0,238040647	0,17862602	0,252526821	0,164139846
0,241263706	0,258736294	0,256723566	0,243276434
0,609340896	0,026007563	0,66823269	0,084899357
0,651296796	0,015369871	0,706527324	0,039860657
0,829713517	0,079713517	0,85437406	0,10437406
0,871372768	0,038039434	0,886309945	0,052976612
0,968016115	0,051349448	0,961383361	0,044716694
α	31,86632613	α	0,167050643
μ	160,4159653	μ	5,056623156
Dcritico	0,410005		
Dmax	0,258736294	Dmax	0,243276434
Dcritico>Dmax	Si se ajusta	Dcritico>Dmax	Si se ajusta

Tabla A 15. Prueba de bondad de ajuste por Smirnov-Kolmogorov en la estación de Arunachala

Gumbell			
F(xm) Gumbell	Fo(xm)- F(xm)	F(Xm) Log- Gumbell	Fo(xm)-F(xm) Log Gumbell
0,131866082	0,040956991	0,121762692	0,030853601
0,153253603	0,013413064	0,152508679	0,014157988
0,158295026	0,091704974	0,159792307	0,090207693
0,169346833	0,1639865	0,175760239	0,157573095
0,193984767	0,222681899	0,211174228	0,205492439
0,462977287	0,037022713	0,542976751	0,042976751
0,786232351	0,202899018	0,820395833	0,2370625

0,844547827	0,17788116	0,86229876	0,195632094
0,858817724	0,108817724	0,872422098	0,122422098
0,947849841	0,114516508	0,937157007	0,103823673
α	40,21452374	α	0,236642478
μ	142,6933765	μ	4,915039803
Dcritico	0,43007		
Dmax	0,222681899	Dmax	0,2370625
Dcritico>Dmax	Si se ajusta	Dcritico>Dmax	Si se ajusta

Tabla A 16. Prueba de bondad de ajuste por Smirnov-Kolmogorov en la estación de Tinamaste

Gumbell			
F(xm) Gumbell	Fo(xm)- F(xm)	F(Xm) Log- Gumbell	Fo(xm)-F(xm) Log Gumbell
0,027026628	0,056306706	0,010023965	0,073309368
0,13850753	0,028159137	0,144459991	0,022206675
0,203760191	0,046239809	0,231819371	0,018180629
0,305922745	0,027410589	0,359919546	0,026586213
0,314491385	0,102175282	0,370075864	0,046590803
0,354897546	0,145102454	0,416734899	0,083265101
0,381702505	0,201630829	0,446587872	0,136745462
0,795133809	0,128467143	0,82015141	0,153484744
0,908156322	0,158156322	0,905753794	0,155753794
0,908519996	0,075186663	0,906033451	0,072700118
0,910732626	0,00593404	0,907737084	0,008929583
α	14,40732639	α	0,191459041
μ	66,58851871	μ	4,165367061
Dcritico	0,410005		
Dmax	0,201630829	Dmax	0,155753794
Dcritico>Dmax	Si se ajusta	Dcritico>Dmax	Si se ajusta

Tabla A 17. Prueba de bondad de ajuste por Smirnov-Kolmogorov en la estación de Repunta

Gumbell			
F(xm) Gumbell	Fo(xm)- F(xm)	F(Xm) Log- Gumbell	Fo(xm)-F(xm) Log Gumbell
0,116094941	0,032761608	0,069139197	0,014194136
0,145421461	0,021245206	0,114377797	0,052288869
0,155419264	0,094580736	0,130681712	0,119318288
0,1598097	0,173523633	0,137920523	0,19541281
0,350608671	0,066057995	0,431932993	0,015266326
0,449414966	0,050585034	0,550725713	0,050725713
0,471320607	0,112012727	0,574178206	0,009155127
0,657200248	0,009466419	0,740759155	0,074092488
0,788064045	0,038064045	0,833245629	0,083245629
0,915545684	0,08221235	0,914539526	0,081206193
0,961743132	0,045076465	0,946366841	0,029700175
α	38,46906579	α	0,328339487
μ	89,40667209	μ	4,415332457
Dcritico	0,410005		
Dmax	0,173523633	Dmax	0,19541281
Dcritico>Dmax	Si se ajusta	Dcritico>Dmax	Si se ajusta

10. ANEXO B

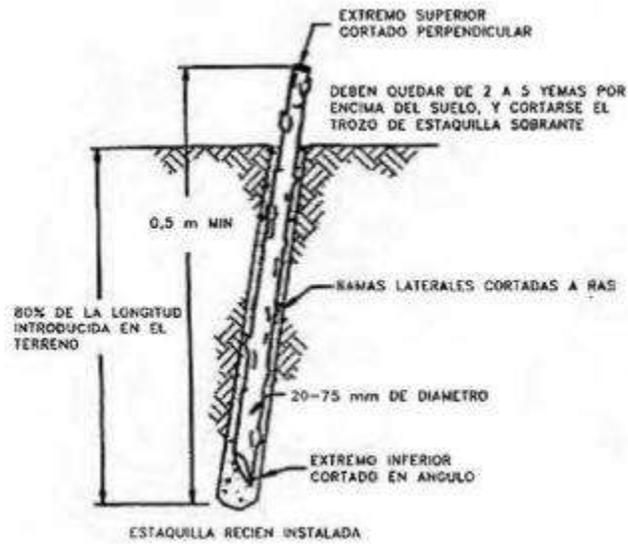


Figura B 1. Detalle del corte y siembra por medio del estaquillado (Silva, 2013).

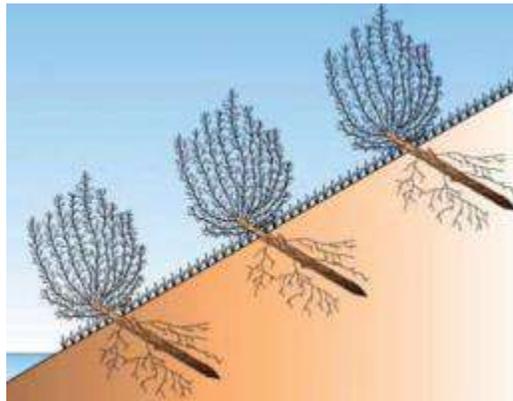


Figura B 2. Visualización lateral del uso del estaquillado (CEDEX, 2011).

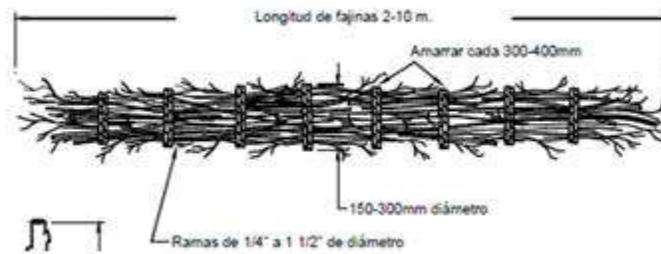


Figura B 3. Visualización de una fajina (Downs, 2014).

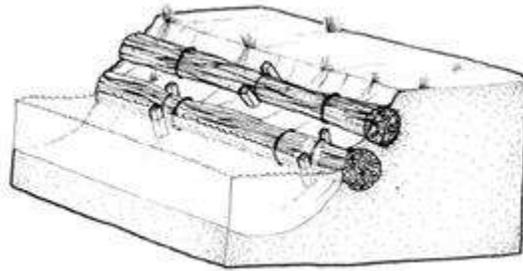


Figura B 4. Representación del uso de fajas en laderas (Downs, 2014).

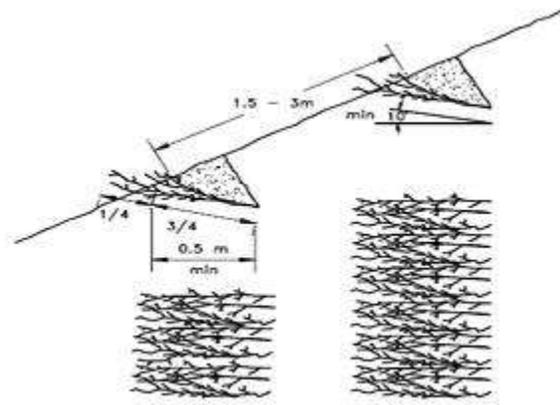


Figura B 5. Guía de diseño de escalones de matorral (Downs, 2014).

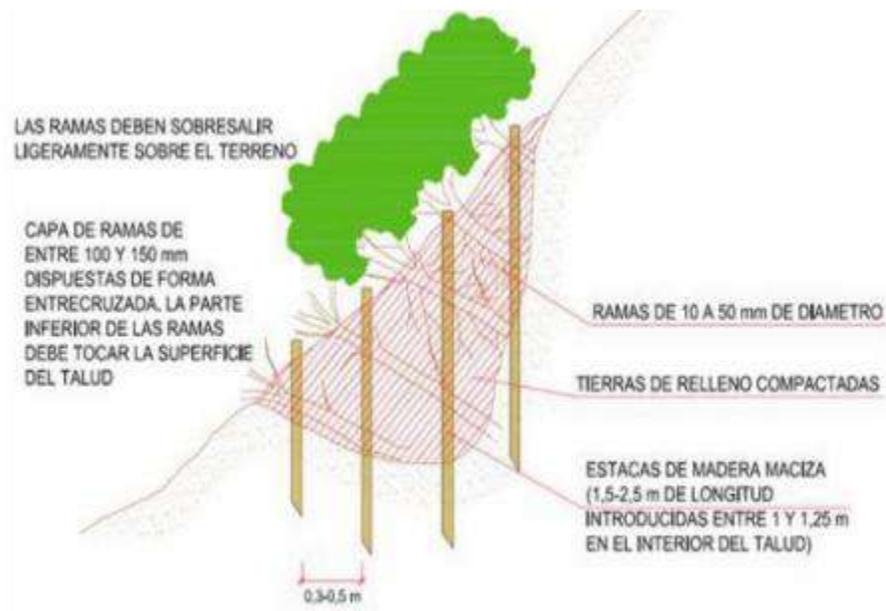


Figura B 6. Diseño de técnicas de paquetes de matorral (De la Cruz & Gómez, 2017).

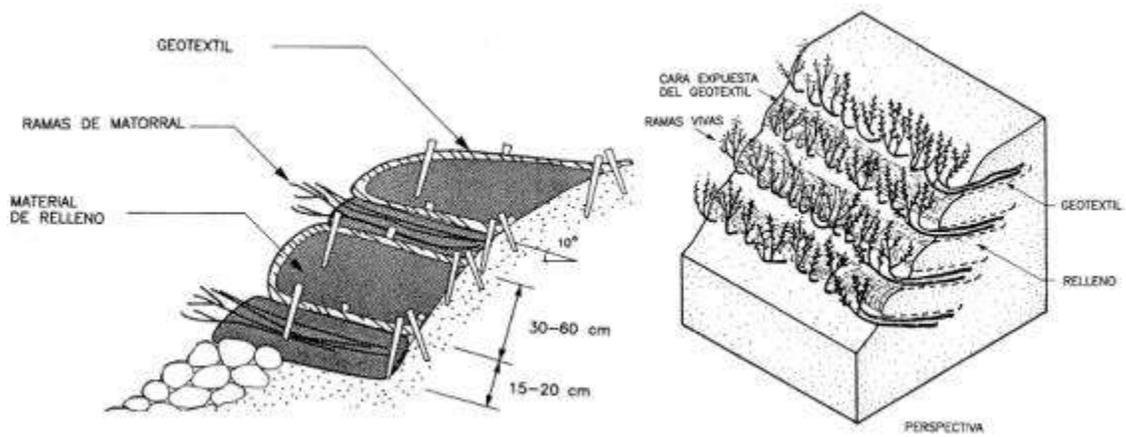


Figura B 7. Diseño de una estructura de tierra reforzada (CEDEX, 2011).

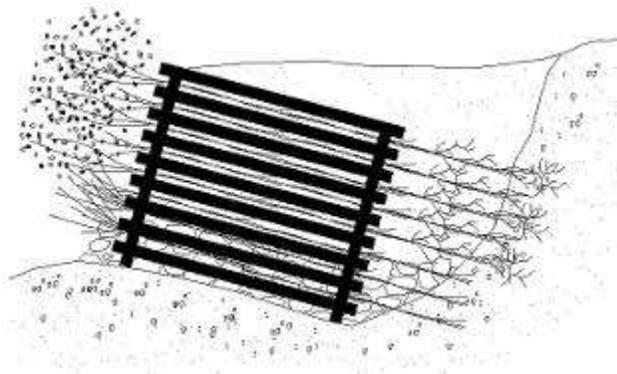


Figura B 8. Diseño de muros vivientes (Quezada, 2015).

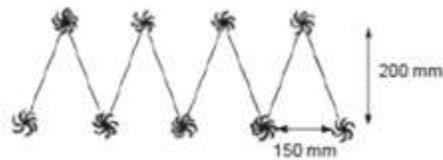


Figura B 9. Espacio de siembra recomendado para barreras de vetiver (Downs, 2014).



Figura B 10. Diferencias en pérdidas de suelo entre vetiver (izquierda) y Flemingia congesta, una leguminosa (Rodríguez, 2009).

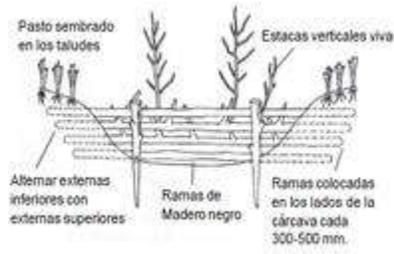


Figura B 11. Vista frontal del diseño de barreras vivas (Downs, 2014).



Figura B 12. Ejemplos de aplicación de barreras vivas en cárcavas (Pérez C, 2012).



Figura B 13. Aplicación de hidrosiembra en mejora de espacios fluviales (CEDEX, 2011).