

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

Trabajo Final de Graduación

Para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil


**Estimación de la producción de sedimentos por erosión hídrica laminar en la  
cuenca del río Abangares**

Realizado por:

Edwin Alberto Matarrita Segura

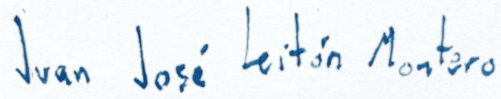
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Comité asesor y estudiante



---

Ing. Rafael Oreamuno Vega, MSc.  
Director



---

Ing. Juan José Leitón Montero, MSc.  
Asesor del proyecto



---

Ing. David Jiménez González  
Asesor del proyecto



---

Edwin Matarrita Segura  
Estudiante

11 de junio de 2021

El suscrito, Edwin Alberto Matarrita Segura, cédula 1-1479-0249, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné A93720, manifiesta que es autor del Trabajo Final de Graduación: “Modelo de estimación de producción de sedimento por erosión hídrica en la cuenca del río Abangares”, bajo la dirección del Ing. Rafael Oreamuno Vega, MSc., quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> **Nota:** de acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N0 6683, artículo 7; “no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.



"Tengo un poder. Nunca me rindo"- Batman.

*Dedicado a:*

*María José Torres, mi esposa, compañera y amiga.*

*Que llena de felicidad mis días.*

## **Agradecimientos**

Agradezco a mis padres y hermana, por apoyarme siempre incondicionalmente.

A Paola Vidal, quien me tendió una mano cuando más lo necesitaba, siempre estaré agradecido.

A Rafael Oreamuno, por creer en mí para realizar este trabajo, por su paciencia y amistad.

A Juan José Leitón y David Jiménez por brindarme su tiempo y conocimiento en cada reunión.

A mis compañeros y amigos del CIEDES, quienes siempre me han apoyado y con quienes he compartido tantos buenos momentos.

## **Tabla de Contenido**

<b>Glosario</b> .....	<b>1</b>
<b>Capítulo 1 . Introducción</b> .....	<b>4</b>
1.1. Justificación .....	4
1.1.1. Problema específico.....	4
1.1.2. Importancia .....	5
1.2. Antecedentes teóricos y prácticos .....	7
1.3. Objetivos .....	9
1.3.1. Objetivo general.....	9
1.3.2. Objetivos específicos .....	9
1.4. Delimitación del problema.....	10
1.4.1. Alcance.....	10
1.4.2. Limitaciones .....	11
1.5. Metodología .....	12
1.5.1. Fase 1: Recopilación de datos e información preliminar .....	12
1.5.2 Fase 2: Etapa de análisis .....	14
1.5.3. Fase 3: Etapa de resultados .....	15
<b>Capítulo 2 . Caracterización de la zona de estudio</b> .....	<b>17</b>
2.1. Características físicas y morfológicas de la cuenca .....	17
2.1.1. Área y perímetro.....	18
2.1.2. Curva hipsométrica.....	19
2.1.3. Elevación media.....	20
2.1.4. Índice de pendiente .....	20
2.1.5. Longitud y pendiente media del cauce principal .....	21
2.1.6. Densidad de drenaje .....	21
2.1.6. Resumen .....	23

2.2. Geología y edafología .....	24
2.3. Subcuencas .....	25
2.4. Uso de la tierra y cobertura.....	26
<b>Capítulo 3 . Recopilación de la teoría de la erosión hídrica .....</b>	<b>27</b>
3.1. Procesos de erosión .....	27
3.1.1. Agua .....	28
3.1.2. Viento .....	28
3.1.3. Actividades humanas .....	28
3.1.4. Cambios de temperatura .....	29
3.1.5. Efectos físicos de la vegetación.....	29
3.1.6. Descomposición química.....	29
3.2. Naturaleza de los sedimentos.....	30
3.3. Clases e indicadores de erosión hídrica .....	32
3.4. Factores que influyen en la erosión hídrica .....	37
3.5. Producción de sedimentos por erosión hídrica.....	44
3.6. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE).....	49
3.6.1. Factor de erosividad por precipitación $R$ .....	50
3.6.2 Factor de erodabilidad por tipo de Suelo $K$ .....	54
3.6.3. Factor de longitud y magnitud de pendiente $LS$ .....	57
3.6.4. Factor de protección por cobertura y uso del suelo $C$ .....	60
3.6.5. Factor de prácticas de conservación de suelo $P$ .....	70
3.7. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE).....	75
3.8. Entrega de sedimentos.....	76
3.8.1. Factores climáticos .....	77
3.8.2 Factores morfológicos y de cobertura de la Cuenca .....	78
3.9. Metodologías para la estimación del $SDR$ .....	80



<b>Capítulo 4 . Modelo InVEST como herramienta de análisis.....</b>	<b>82</b>
4.1. Ventajas y desventajas del modelo InVEST.....	84
4.1.1. Ventajas.....	84
4.1.2. Desventajas.....	84
4.2. Insumos del programa.....	85
4.3. Procesos del modelo InVEST.....	88
4.4. Preparación de los insumos del modelo InVEST.....	93
4.4.1. Modelo de elevación digital.....	93
4.4.2. Cuadrícula ( <i>raster</i> ) de erosividad ( <i>R</i> ).....	94
4.4.3. Cuadrícula ( <i>raster</i> ) de erodabilidad del suelo.....	98
4.4.4. Cuadrícula ( <i>Raster</i> ) de uso y cobertura del suelo.....	101
4.4.5. Cuadro biofísico.....	103
4.4.6. Polígono ( <i>shapefile</i> ) de cuencas.....	104
4.4.7. Calibración de los parámetros de Borselli ( $IC_0$ y $k_b$ ).....	104
<b>Capítulo 5 . Definición de las zonas de mayor potencial de producción de sedimentos</b>	
.....	<b>111</b>
<b>Capítulo 6 . Escenarios de la implementación de prácticas y técnicas de conservación de</b>	
<b>suelo.....</b>	<b>119</b>
6.1. Escenario 1: Evaluación de terrazas en los cultivos de café.....	119
6.2. Escenario 2: Evaluación del cultivo en curvas de nivel en los cultivos de Café.....	125
6.3. Escenario 3: Evaluación de bermas filtrantes de compost, como complemento al cultivo en curvas de en cultivos de café.....	130
6.4. Escenario 4: Evaluación de trampas de sedimentos en suelos dedicados a la ganadería.....	136
6.5. Escenario 5: Evaluación de la implementación conjunta de prácticas de conservación de Suelo en la cuenca del río Abangares.....	140
6.6. Resumen de resultados.....	145

<b>Capítulo 7 . Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>150</b>
7.1. Conclusiones .....	150
7.2. Recomendaciones .....	153
<b>Bibliografía.....</b>	<b>155</b>
<b>Apéndice A. Características de los subórdenes de suelo según (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991) .....</b>	<b>160</b>
A.1. <i>Dystrandeps</i> .....	160
A.2. <i>Haplustult</i> .....	160
A.3. <i>Usthornthent</i> .....	160
A.4. <i>Ustropepts</i> .....	161
A.5. <i>Tropohumult</i> .....	161
A.6. <i>Humitropept</i> .....	161
A.7. <i>Dystropept</i> .....	162
A.8. <i>Troporthent</i> .....	162
A.9. <i>Ustifluvents</i> .....	162
A.10. <i>Ustropept</i> .....	162
A.11. <i>Humitropept</i> .....	163
<b>Apéndice B. Ilustraciones de técnicas de conservación de suelos según (Sustainable Technologies Evaluation Program, 2015) .....</b>	<b>164</b>
B.1. Berma filtrante de compost .....	164
B.2. Presa filtrante.....	165
B.3. Media filtrante de compost.....	166
B.4. Barreras de sedimento para tragantes.....	167
B.5. Rollos de zarzo o fibra.....	168
B.6. Berma filtrante de roca .....	168
B.7. Barreras de bolsas de arena .....	169

B.8. Estanque sedimentador.....	169
B.9. Barreras de sedimento.....	170
B.10. Barreras de paca de heno .....	170

## Índice de Figuras

Figura 1-1. Ubicación de las estaciones del CIEDES en la cuenca del río Abangares delimitada hasta la desembocadura .....	13
Figura 1-2. Esquema metodológico para la realización del proyecto .....	16
Figura 2-1. Ubicación de la cuenca del río Abangares delimitada hasta el punto de control en el sitio de embalse propuesto La Marimba.....	17
Figura 2-2. Curva hipsométrica para la cuenca del río Abangares .....	19
Figura 2-3. Modelo de elevación digital de la cuenca del río Abangares.....	21
Figura 2-4 Subcuencas del río Abangares.....	25
Figura 3-1. Tipos de movimiento de masa de suelo .....	31
Figura 3-2. Tipos de movimiento de masa de suelo .....	34
Figura 3-3. Fuentes de producción de sedimentos .....	34
Figura 3-4. Pedestales formados en la cuenca del río Abangares.....	35
Figura 3-5. Raíces expuestas por acción de la erosión en la cuenca del río Abangares.....	35
Figura 3-6. Erosión en surcos en la cuenca del río Abangares.....	36
Figura 3-7. Diagrama de transporte de sedimento según longitud y curvatura de la pendiente .....	38
Figura 3-8. Variación de la respuesta hidrológica de una cuenca, en función de sus características .....	41
Figura 3-9. (a) Gota de lluvia cayendo a la superficie (b) Gota de lluvia impactando contra la superficie del suelo (c) Proceso de erosión hídrica.....	45
Figura 3-10. Modelo de Horton de escorrentía y arrastre de sedimento.....	46
Figura 3-11. Zonas geomorfológicas de producción de sedimentos.....	48
Figura 3-12. Mapa de isoerodentas de Costa Rica .....	53
Figura 3-13. Códigos de estructura de suelo de USLE.....	54
Figura 3-14. Triangulo de textura de suelo.....	55
Figura 3-15. Ladera compuesta dividida en tres tramos .....	58

Figura 3-16. Secuencia de saltos en una ladera .....	67
Figura 3-17. Diagrama de la conformación de terrazas .....	71
Figura 3-18. Efecto de las terrazas sobre el ciclo hidrológico.....	72
Figura 3-19. SDR respecto al área de la cuenca .....	78
Figura 4-1. Diagrama de metodología de cálculo por píxel en modelo InVEST .....	90
Figura 4-2. Relación entre SDR y factores de calibración $IC_0$ y $k_b$ .....	92
Figura 4-3. Zona de Amortiguamiento del MED de la cuenca del río Abangares.....	94
Figura 4-4. Modelo de isoerodentas para la cuenca del río Abangares.....	97
Figura 4-5. Mapa de subórdenes de Suelo .....	99
Figura 4-6. Mapa de los subórdenes de suelo en la cuenca del río Abangares, delimitada hasta el punto de control de La Marimba .....	100
Figura 4-7. Mapa de los subórdenes de suelo en la cuenca del río Abangares, delimitada hasta el punto de control de La Marimba.....	102
Figura 4-8. Ubicación de la estación 780121 Limonal Viejo respecto a la cuenca del río Abangares, delimitada hasta el sitio de embalse La Marimba .....	105
Figura 4-9. Espacio de variabilidad de los parámetros $SDR_{máx}$ , $IC_0$ y $k_b$ .....	108
Figura 4-10. Análisis de sensibilidad de la estimación de producción de sedimentos, respecto a las variables de calibración $IC_0$ y $k_b$ .....	109
Figura 5-1. Mapa de la erosión potencial en la cuenca del río Abangares, delimitada hasta el punto de control de La Marimba para la condición actual .....	112
Figura 5-2. Modelo de pendientes de la cuenca del río Abangares.....	114
Figura 5-3. Modelo de factor LS en la cuenca del río Abangares .....	115
Figura 5-4. Modelo de conectividad hidrológica en la cuenca del río Abangares .....	116
Figura 6-1. Mapa de la erosión potencial en la cuenca del río Abangares, cuando se implementan terrazas .....	121
Figura 6-2. Mapa de erosión potencial en la cuenca del río Abangares, cuando el implementa el cultivo en curvas de nivel .....	126

Figura 6-3. Mapa de la erosión potencial en la cuenca del río Abangares, cuando se implementa el cultivo en curvas de nivel con bermas de compost.....	132
Figura 6-4. Mapa de la erosión potencial en la cuenca del río Abangares, cuando se implementan las trampas de sedimento en pastos.....	137
Figura 6-5. Mapa de erosión potencial en la cuenca del río Abangares, cuando se implementan prácticas conjuntas de conservación de suelos.....	141
Figura 6-6. Perdida promedio de suelo en las subcuencas del río Abangares, para los seis escenarios analizados.....	148
Figura B-1. Berma filtrante de compost.....	164
Figura B-2. Diagrama de berma filtrante de compost.....	165
Figura B-3. Presa filtrante.....	165
Figura B-4. Media filtrante de compost en entorno urbano.....	166
Figura B-5. Media filtrante de compost en entorno natural.....	166
Figura B-6. Barreras de sedimento para tragantes.....	167
Figura B-7. Rollos de zarzo.....	168
Figura B-8. Berma filtrante de roca.....	168
Figura B-9. Barreras de bolsas de arena.....	169
Figura B-10. Estanque sedimentador.....	169
Figura B-11. Barreras de sedimento.....	170
Figura B-12. Barreras de pacas de heno.....	170

## Índice de Cuadros

Cuadro 2-1. Coordenadas del punto de control en coordenadas CRTM-05.....	17
Cuadro 2-2. Resumen de parámetros morfológicos de la cuenca del río Abangares.....	23
Cuadro 2-3. Características de las subcuencas del río Abangares.....	25
Cuadro 3-1. Códigos USLE de la permeabilidad del suelo .....	55
Cuadro 3-2. Valores de K según su clasificación de suborden .....	56
Cuadro 3-3. Valores de C según la cobertura del suelo .....	61
Cuadro 3-4. Valores de $C_{cc}$ según la altura de dosel y el porcentaje de suelo desnudo .....	64
Cuadro 3-5. Valores de $C_{ss}$ según las características de ladera .....	66
Cuadro 3-6. Valores de $C_{hs}$ según la pendiente .....	68
Cuadro 3-7. Valores de $C_{ct}$ según la pendiente.....	69
Cuadro 3-8. Valores de P según la pendiente y la práctica de conservación.....	70
Cuadro 3-9. Valores de Factor P para las Técnicas de Conservación de Suelos Según STEP .....	74
Cuadro 3-10. Valores para el cálculo de SDR.....	81
Cuadro 4-1. Insumos del módulo SDR de InVEST para la estimación de la producción de sedimentos.....	85
Cuadro 4-2. Metodología para el cálculo de la variable R.....	96
Cuadro 4-3. Valores totales de R por estación para la estimación de la producción de sedimento en la cuenca del río Abangares .....	98
Cuadro 4-4. Área de los órdenes y los subórdenes presentes en la cuenca del río Abangares .....	100
Cuadro 4-5. Conformación de la cobertura y el uso del suelo en la cuenca del río Abangares .....	103
Cuadro 4-6. Cuadro biofísico con los valores de factores C y P utilizados para el modelado de la producción de sedimentos.....	104
Cuadro 4-7. Volúmenes de sedimento registrados en la estación 780121 Limonal Viejo .	106

Cuadro 5-1. Erosión potencial por tipo de cobertura, para la condición actual de la cuenca .....	112
Cuadro 5-2. Volumen anual potencial de sedimentos por subcuenca, para la condición actual .....	117
Cuadro 5-3. Severidad de la erosión según la producción potencial anual.....	118
Cuadro 5-4. Severidad de la erosión en las subcuencas del río Abangares, para la condición actual .....	118
Cuadro 6-1. Cuadro biofísico con los valores de los factores <i>C</i> y <i>P</i> utilizados para el modelado de la producción de sedimento bajo el escenario de la implementación de terrazas .....	120
Cuadro 6-2. Erosión potencial por el tipo de cobertura, cuando se implementan terrazas .....	121
Cuadro 6-3. Volumen potencial anual de sedimentos por subcuenca, cuando se implementan terrazas .....	123
Cuadro 6-4. Severidad de la erosión en las subcuencas del río Abangares, implementando terrazas.....	124
Cuadro 6-5. Cuadro biofísico con los valores de factores <i>C</i> y <i>P</i> utilizados para el modelado de la producción de sedimento bajo el escenario de la implementación de cultivo en curvas de nivel.....	125
Cuadro 6-6. Erosión potencial por tipo de cobertura, cuando se implementa el cultivo en curvas de nivel.....	126
Cuadro 6-7. Volumen potencial anual de sedimentos por subcuenca, cuando se implementa el cultivo en curvas de nivel .....	128
Cuadro 6-8. Severidad de la erosión en las subcuencas del río Abangares, cuando se implementa el cultivo en curvas de nivel .....	129
Cuadro 6-9. Cuadro biofísico con los valores de factores <i>C</i> y <i>P</i> utilizados para el modelado de la producción de sedimento cuando se implementa el cultivo en curvas de nivel complementado con bermas de compost.....	131



Cuadro 6-10. Erosión potencial por tipo de cobertura, cuando se implementa el cultivo en curvas de nivel con bermas de compost .....	132
Cuadro 6-11. Volumen potencial anual de sedimentos por subcuenca, cuando se implementa el cultivo en curvas de nivel con bermas filtrantes de compost.....	134
Cuadro 6-12. Severidad de la erosión en las subcuencas del río Abangares, cuando se implementa el cultivo en curvas de nivel con bermas de compost.....	135
Cuadro 6-13. Cuadro biofísico con los valores de factores <i>C</i> y <i>P</i> utilizados para el modelado de producción de sedimento bajo el escenario de la implementación de trampas de sedimento en pastos dedicados a la ganadería .....	136
Cuadro 6-14. Erosión potencial por tipo de cobertura, cuando se implementan las trampas de sedimento en pastos.....	137
Cuadro 6-15. Volumen potencial anual de sedimentos por subcuenca, cuando se implementan las trampas de sedimento en pastos dedicados a la ganadería .....	138
Cuadro 6-16. Severidad de la erosión en las subcuencas del río Abangares, cuando se implementan las trampas de sedimento en pastos dedicados a la ganadería .....	139
Cuadro 6-17. Cuadro biofísico con los valores de factores <i>C</i> y <i>P</i> utilizados para el modelado de producción de sedimento bajo el escenario de implementación conjunta de prácticas de conservación de suelo .....	140
Cuadro 6-18. Erosión potencial por tipo de cobertura, cuando se implementan prácticas conjuntas de conservación de suelos.....	142
Cuadro 6-19. Volumen anual potencial de sedimentos por subcuenca, cuando se implementan prácticas conjuntas de conservación de suelos.....	143
Cuadro 6-20. Severidad de la erosión en las subcuencas del río Abangares, cuando se implementan prácticas conjuntas de conservación de suelos.....	144
Cuadro 6-21. Volúmenes de la producción de sedimento para los seis escenarios analizados .....	145
Cuadro 6-22. Resumen de la erosión potencial total por tipo de cobertura, para los seis escenarios analizados.....	146

Cuadro 6-23. Resumen de perdida promedio de suelo por subcuenca, para los seis escenarios analizados.....	147
Cuadro 6-24. Reducción en la producción de sedimentos por subcuenca, para los seis escenarios analizados.....	149

Matarrita Segura, Edwin Alberto

Estimación de la producción de sedimentos por erosión hídrica laminar en la cuenca del río Abangares

Tesis Ingeniería Civil – San José, Costa Rica:

E.Matarrita S., 2021

## Resumen

En presente proyecto de investigación ofrece una recopilación sobre la teoría de la producción de sedimentos por erosión hídrica, sus características, naturaleza y procesos.

Se detallan las características, alcances, metodologías y formas de estimar la erosión hídrica de tipo laminar, por medio del uso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos en su versión revisada, o *RUSLE* por sus siglas en inglés. Se especifican las características de cada una de sus variables y los métodos de cálculo para estimar cada una de ellas.

Adicionalmente, se muestran las características del modelo InVEST para la evaluación de servicios ecosistémicos, particularmente su módulo *SDR* para la cuantificación de la producción de sedimentos por erosión hídrica laminar. Se describen sus ventajas y desventajas, los insumos requeridos por el modelo y como estimarlos para su correcta implementación.

Además, se presenta una evaluación de la condición actual de la erosión en la cuenca del río Abangares, por medio de la cual se definen las zonas de mayor vulnerabilidad, la cuantificación de los volúmenes potenciales de sedimentos y se realiza la clasificación de la vulnerabilidad a la erosión de las distintas áreas de drenaje que componen la cuenca.

Además, se plantea un análisis de sensibilidad para conocer el efecto sobre la producción de sedimentos en la cuenca, de implementar diferentes prácticas de conservación de suelo y evaluar la eficacia de retención de sedimentos de cada una, respecto a la condición actual.

Finalmente se analizó el efecto de la implementación conjunta de estas prácticas, para evaluar la posible reducción en la pérdida de suelos y su efecto en la cuenca del río Abangares para ofrecer recomendaciones de aplicación.



Matarrita Segura, Edwin Alberto

Estimation of the sediment yield by laminar erosion in the Abangares river basin

Civil Engineering Thesis– San José, Costa Rica:

E.Matarrita S., 2021

## **Abstract**

This project presents a compilation of the sediment production, laminar erosion theory, it's characteristics, processes and nature, within a watershed.

Within this project are detailed the characteristics, scopes, methodologies and calculation methods to estimate the sediment yield by laminar erosion, using the Revised Universal Soil Loss Equation. It also offers a detailed explanation about the attributes and properties of each of the RUSLE variables, and their respective calculation methods.

Additionally, it presents the features of the InVEST model for the evaluation of the ecosystem services, particularly, it's *SDR* module for the sediment yield estimation by laminar erosion. The module's advantages and disadvantages are described, as well as the necessary inputs and how to generate them for their correct implementation into de software.

This document also shows the evaluation of the Abangares' watershed current state of erosion vulnerability, by which the areas of greatest vulnerability are defined and classified within the drainage area. By doing this the sediment volumes are quantified in each of the subbasins that shape the watershed.

Based on the previous analysis, a sensitivity analysis was made to evaluate the effect of implementing soil conservation practices in the sediment production of the watershed. The sediment retention effectiveness in respect of the watershed's current state was evaluated for each of the studied conservation practices.

Finally, the effect of the joint application of the soil conservation practices was evaluated, to estimate the possible reduction in the soil loss and its effect on the watershed.

# Glosario

- Antiduna: Montículo arenoso formado sobre el lecho, de forma simétricamente curvado, que puede moverse aguas arriba, permanecer estacionario o moverse aguas abajo.
- Arbustales: Zona donde predominan las plantas leñosas, de menos de cinco metros de altura, sin un tronco preponderante, porque se ramifica a partir de la base.
- Barbecho: Tierra labrantía que no se siembra durante uno o más años.
- Bosque degradado: Es aquel que ha perdido la estructura, función, composición de especies o productividad normalmente asociadas con el tipo ecosistema, además proporciona un nivel reducido de productos y servicios y mantiene una diversidad biológica limitada.
- Cárcavas: Hoya o concavidad formada en el terreno por la erosión de las corrientes de agua.
- Charral: Terreno poblado de matorrales y maleza.
- Cohesión: Unión de las partículas de suelo por acción de fuerzas moleculares y películas de agua entre ellas.
- Conectividad hidrológica: Grado de conexión entre el terreno y un cauce.
- Cuenca hidrográfica: Territorio delimitado topográficamente cuyas aguas afluyen todas a un mismo río, lago o mar.
- Curva de descarga: Es la relación gráfica entre caudal y nivel agua, de una sección específica de un canal (natural o artificial), producto de la calibración mediante aforos por un largo periodo de tiempo.
- Desembocadura: Paraje por donde un río o canal desemboca en otro, en el mar o un lago.
- Dosel: Hábitat que comprende la región de las copas y regiones superiores de los árboles de un bosque.
- Duna: Montículo de forma triangular formado sobre el lecho, con pendiente suave aguas arriba y pendiente abrupta aguas abajo.
- Encostramiento del suelo: Es un fenómeno en el que se da la formación de una delgada capa impermeable que inhibe la emergencia de las plántulas, reduce la

infiltración y favorece a la escorrentía y la erosión, dependiendo de la textura del suelo, la estabilidad de los agregados, la topografía y las características de precipitaciones pluviales.

- Erosión: Es un proceso de desintegración paulatina de las rocas y otros materiales que conforman la superficie de la corteza terrestre por acción de agentes externos.
- Escorrentía: Agua de lluvia que discurre por la superficie de un terreno.
- Especies frondosas: También conocidas como angiospermas, son plantas con flores que producen semillas encerradas y protegidas por la pared del ovario (carpelos) que, posteriormente, se convierte en fruto. Conforman el grupo más extenso de su tipo en la naturaleza y están formadas por plantas herbáceas, arbustivas o arbóreas.
- Estación hidrometeorológica: Dispositivo que registra distintas variables de clima y niveles de agua.
- Estructura migajosa: Partículas individuales de arena, limo y arcilla agrupadas en granos pequeños casi esféricos.
- Forraje: Pasto que se da al ganado.
- Geomorfología: Estudio de las características propias de la corteza terrestre.
- Hojarasca: Conjunto de las hojas que han caído de los árboles.
- Lecho: Cauce del río cubierto por el agua.
- Meteorización: Fragmentación o degradación parcial o total de las rocas y los minerales en contacto con la atmósfera, la hidrosfera o la biosfera.
- Morfometría: Estudio científico de la forma y dimensiones de algo.
- Orografía: Parte de la geografía física que trata de la descripción de las montañas.
- Pedregosidad: Dicho de un terreno, cubierto naturalmente de piedras.
- Precipitación: Agua procedente de la atmósfera, y que en forma sólida o líquida se deposita sobre la superficie de la tierra.
- Relación de Aspecto de Píxel: Es la relación matemática que describe el modo en que la anchura de un píxel se compara a su altura en una imagen digital.
- Secano: Tierra de labor que no tiene riego, y solo participa del agua proveniente de la lluvia.
- Sedimento: Materia que, habiendo estado suspenda en un líquido, se posa en el fondo por su mayor gravedad.

- Servicios ecosistémicos: Son recursos o procesos de los ecosistemas naturales que benefician a los seres humanos.
- Suampo: Terreno donde las aguas se estancan.
- Suelo: Capa superficial de la corteza terrestre que se ha formado lentamente a través de los siglos. Está compuesto por minerales, materia orgánica, diminutos organismos vegetales y animales, aire y agua.
- Surcos: Hendidura que se hace en la tierra por la erosión de las corrientes de agua.
- Vegetación esclerófila: Que tiene las hojas pequeñas, duras y coriáceas como adaptación a climas secos.
- Zarzo: Tejido de varas, cañas, mimbres o juncos, que forma una superficie plana.



# Capítulo 1 . Introducción

## 1.1. Justificación

### 1.1.1. Problema específico

La erosión es un proceso geológico que se da de manera natural en todos los suelos expuestos a la influencia de la precipitación, el viento, la exposición solar y la pérdida de cobertura vegetal, entre otros factores. Además, se puede dar una erosión antropogénica derivada de las actividades humanas sin prácticas de conservación del suelo.

Es importante destacar que la erosión del suelo, además de afectar y alterar los ecosistemas, afecta a las personas y a la economía de una determinada región, al ser el suelo un recurso natural que a diario es aprovechado, ya sea para agricultura, ganadería, minería, desarrollo urbano, u otros.

La pérdida de suelo implica además una pérdida económica, ya que la capacidad productiva de los suelos erosionados es menor que la de los suelos prístinos, debido a que la erosión reduce la fertilidad y la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, haciéndolos propensos a deslizamientos y aumentando la escorrentía superficial.

Los sedimentos producidos por la erosión afectan a su vez, obras y máquinas hidráulicas, por ejemplo: las conducciones, canales, sistemas de bombeo y turbinas, produce aumentos de la sedimentación en los embalses y las planicies, además de encarecer los procesos de potabilización del agua. Es por esto que tener identificadas las zonas de una cuenca, que son más propensas a sufrir de erosión, permite mejorar los criterios de diseño de futuras obras hidráulicas, caracterizar las fuentes de agua para su posible captación y consumo, así como brindar las herramientas para concentrar esfuerzos de preservación del suelo.

En el presente proyecto, se pretende efectuar un compendio de la teoría que describe el proceso de la erosión hídrica laminar y, finalmente, evaluar la producción de sedimentos por erosión hídrica laminar mediante el uso del modelo InVEST, basado en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.

### **1.1.2. Importancia**

El suelo es un recurso que se explota diariamente, ya que gran parte de las actividades humanas se desarrollan en, o dependen de él. Así mismo, posee valor económico y la pérdida de este por acción de efectos erosivos se transmite a su vez, en pérdidas económicas para las personas que dependen de él.

Las consecuencias de la erosión como la producción, la entrega a cauces, el transporte, la deposición y el arrastre de sedimentos, son influenciados de manera directa por fuerzas naturales tales como la gravedad, la fricción con el agua y el viento, la radiación solar, la topografía, la cobertura, entre otros. Por lo que el estudio de dichos factores es primordial para la correcta caracterización de la erosión.

La cuantificación, la identificación y el manejo de las fuentes de producción de sedimento, en conjunto con la caracterización geomorfológica y ambiental de las áreas de drenaje donde estas se ubican, permiten hacer una gestión integral de los recursos agua y suelo, permitiendo así conservar los recursos de los cuales depende el ser humano y mitigar el impacto de las actividades antropogénicas en el espacio que habita.

El acelerado crecimiento en la población humana, genera que se desarrollen asentamientos no planificados, particularmente en áreas vulnerables a la erosión como en las partes altas de las cuencas, lo que afecta los servicios ecosistémicos de los que depende el ser humano.

El proceso de producción de sedimentos no es en sí mismo un efecto adverso, ya que se da de forma natural y es fundamental para el equilibrio morfológico de ríos y ecosistemas acuáticos, por lo que su caracterización y gestión integral son necesarias para mantener dicho equilibrio.

Además, en la cuenca del río Abangares se planea construir un sistema de regulación de embalses, destinado prioritariamente para el almacenamiento de agua para consumo humano. Por este motivo, es importante conocer la cantidad de sedimento que se puede producir en la cuenca, con el objetivo de estimar el volumen que puede ingresar al cauce y finalmente depositarse y acumular en los embalses.

Al mismo tiempo, los depósitos de sedimentos en los ríos pueden alterar la morfología de los cauces, reducir la profundidad del flujo, generar barras de sedimento, dunas o alterar su curso.

Es en virtud de lo anterior que se pretende, por medio del uso de un modelo, estimar el volumen potencial de sedimentos que se puede producir por erosión, mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en su versión revisada (*RUSLE* por sus siglas en inglés). El modelo se aplicará en el área de drenaje de la cuenca del río Abangares, para determinar cuáles zonas se encuentran más propensas a sufrir procesos erosivos, mediante la recolección, la interpretación y el análisis de datos de la precipitación, el suelo, la cobertura y la topografía.

## 1.2. Antecedentes teóricos y prácticos

La ingeniería de sedimentos tiene como objetivo la caracterización, la planificación, el análisis y la remediación de los recursos: agua y suelo, con el fin de prevenir o mitigar problemas en los cuerpos de agua causados por la presencia de sedimentos producidos por erosión, que afectan su calidad y que permitan hacer un aprovechamiento integral del recurso (consumo humano, industria, agricultura, salud, entre otros).

Factores como el aumento de los asentamientos humanos sin planificación, y el incremento de terrenos destinados a aprovechamientos agrícolas y ganaderos sin prácticas de conservación de suelos han llevado al aumento de la erosión y, por lo tanto, al aumento de la producción de sedimentos que finalmente entran a la red de drenaje de una cuenca.

Los primeros modelos de estimación de volumen de sedimentos datan de inicios del siglo XX, con las investigaciones realizadas por el Servicio Forestal de los Estados Unidos (*USA Forest Service*, 1915), y de (Miller, 1917) quienes analizaron los efectos de distintas coberturas vegetales sobre la escorrentía y la pérdida de suelo utilizando parcelas experimentales de captura de sedimentos.

En el año 1935, con la creación del Servicio de Conservación de Suelos (*SCS* por sus siglas en inglés), se desarrollan los primeros textos relacionados con la constitución de los procesos erosivos y la disgregación del suelo por acción de las gotas de lluvia y salpicadura.

Posteriormente, (Musgrave, 1947) crea el primer modelo de producción de sedimentos que toma en consideración parámetros como la cobertura vegetal, la pendiente y la intensidad de la lluvia.

En 1965, Wischmeier y Smith proponen la ecuación de pérdida universal de suelo (*USLE*), la cual posteriormente se modifica (*RUSLE*) en 1997 para ser aplicada mediante métodos computacionales, todo con el fin de estimar el volumen de sedimento producido en cuencas hidrográficas.

El Servicio de Conservación de Recursos Naturales de los Estados Unidos (*NRCS* por sus siglas en inglés), emplea este modelo para el análisis de producción de sedimento en todas las represas y grandes obras de ingenierías en dicho país.

En Costa Rica, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) hace uso de este modelo para el cálculo de los volúmenes de acumulación de sólidos en los embalses y las represas que utilizan para la generación eléctrica, como un porcentaje del volumen total producido en la cuenca.

Otros modelos utilizados a nivel mundial para la evaluación de la erosión hídrica son:

- a) *AGNPS: Agricultural Non-Point Source Pollution Model.*
- b) *ANSWERS: Aerial Non-Point Source Watershed Environment Response Simulation.*
- c) *ALMANAC: Agricultural Land Management Alternative with Numerical Assessment.*
- d) *BASINS: Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources.*
- e) *CREAMS: Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems.*
- f) *EPIC: Erosion Productivity Impact Calculator.*
- g) *KINEROS2: Kinematic Runoff and Erosion Model.*
- h) *OPUS: Integrated Model for Transport of Nonpoint-Source Pollutants.*
- i) *SWAT: Soil and Water Assessment Tool.*
- j) *SWIM: Soil and Water Integrated Model.*
- k) *WEPP: Water Erosion Prediction Project.*
- l) *CALSITE: Calibrated Simulation of Transported Erosion.*
- m) *InVEST: Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs.*

Para efectos de este estudio, se trabajó únicamente con el modelo InVEST para la estimación de la producción potencial de sedimentos en la cuenca del río Abangares.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo general

- Estimar el volumen potencial de producción de sedimentos por erosión hídrica laminar en la cuenca del río Abangares, delimitada a la altura del sitio de embalse La Marimba, mediante el uso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en su versión modificada.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- Recopilar la teoría y la información disponibles sobre la teoría de la producción de sedimentos por erosión hídrica.
- Definir las características del modelo InVEST como herramienta para la estimación de los volúmenes de producción de sedimentos por erosión hídrica laminar.
- Definir las zonas de mayor potencial de producción de sedimentos en la cuenca del río Abangares, delimitada a la altura del sitio de embalse La Marimba por medio de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, en su versión modificada empleando el modelo InVEST.
- Determinar el potencial del volumen de sedimentos producidos por erosión hídrica laminar que llega hasta el sitio de embalse La Marimba empleando el modelo InVEST.
- Comparar las prácticas de uso de suelo actuales, con las prácticas enfocadas en la conservación de suelos con el fin de brindar recomendaciones, para mitigar los efectos de la erosión y reducir los volúmenes de sedimentos que podrían alcanzar la red de drenaje de la cuenca, empleando el modelo InVEST.

## **1.4. Delimitación del problema**

### **1.4.1. Alcance**

#### a) Alcance geográfico o espacial

La aplicación del modelo de producción de sedimentos se llevó a cabo en la cuenca del río Abangares, delimitada a la altura del sitio de embalse La Marimba, ubicada en el cantón de Abangares, provincia de Guanacaste, en la vertiente del pacífico de Costa Rica.

Se elige esta cuenca ya que al ser una cuenca experimental del Centro en Investigación en Estudios para el Desarrollo Sostenible (CIEDES), se tiene acceso a los registros de datos de sus estaciones meteorológicas ubicadas en distintos puntos de la cuenca. Adicionalmente, al ser una cuenca experimental permite la posibilidad de realizar estudios que perduren en el tiempo, y permitan replantear y adaptar las metodologías estimadas bajo las condiciones de otros países a las condiciones de nuestro país.

Asimismo, el estudio de la producción de sedimentos en la cuenca del río Abangares tiene como propósito generar la información y el conocimiento que pueda servir de insumo para poder crear un sistema de regulación por medio de embalses que abastezcan las necesidades de la población del cantón de Abangares.

#### b) Alcance temporal

Para el análisis de las intensidades de precipitación se hizo uso de los registros totales de cada una de las estaciones meteorológicas del CIEDES. Dicho registro inicia desde el año 2015 y continúa hasta el presente.

En cuanto a la información de las estaciones meteorológicas suministradas por el ICE, estas tienen un registro que inicia desde el año 1996 y continúa hasta el presente.

#### c) Alcance tecnológico

Para la elaboración de esta investigación se tomó en consideración únicamente la cantidad de sedimento producido por la erosión hídrica de tipo laminar.

Se trabajó con información básica de topografía en formato SIG, en escala 1:50 000 y 1:25 000 del Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica (IGN).

Para el uso y la producción de cuadrículas (*raster*) en formato SIG, se trabajó con una resolución de píxel de 10X10 m.

Para el estudio de la producción de sedimento, se hizo uso del modelo InVEST como herramienta de evaluación de la erosión y la entrega de sedimentos en forma geoespacial.

#### **1.4.2. Limitaciones**

Dentro de las limitaciones que posee el proyecto, está lo restringido de los registros meteorológicos en las estaciones del CIEDES, ya que no poseen registros anuales completos ni la extensión de registro suficiente para que sean estadísticamente representativos.

Las mediciones de precipitación son puntuales, por lo que se debe recurrir a utilizar métodos de estadística geoespacial para su debida interpolación en el espacio.

Dentro del modelo de producción no se toman en cuenta, los sedimentos generados por los movimientos de masa de suelo, los surcos ni las cárcavas, ya que la cuantificación de estos sedimentos requiere de características específicas del sitio donde se producen.



## 1.5. Metodología

La metodología empleada para el desarrollo de la investigación, se muestra en la Figura 1-2 y se detalla de la siguiente manera:

### 1.5.1. Fase 1: Recopilación de datos e información preliminar

En esta etapa se realizó una recopilación de los recursos básicos necesarios para el desarrollo de la investigación.

Se efectuó una búsqueda de literatura e información referente a la teoría de la RUSLE, así como su aplicación en Costa Rica y en otros países del mundo. Esto tuvo como objetivo conocer sobre las características de cada uno de los parámetros, su determinación y correcta aplicación para la posterior construcción del modelo en la cuenca del río Abangares.

Posteriormente se les envió una solicitud formal al CIEDES y al ICE de la información meteorológica, proveniente de las estaciones ubicadas dentro y en los alrededores de la cuenca del río Abangares administradas por estas instituciones. Las estaciones utilizadas son:

- Estaciones hidrometeorológicas CIEDES:
  - Ecomuseo.
  - La Marimba.
  - Santa Lucía.
- Estación fluviográfica ICE: 780121 Limonal Viejo
- Estaciones meteorológicas CIEDES:
  - Campos de Oro.
  - CINDEA Abangares.
  - CTP Abangares
  - Marsellesa.
  - San Rafael.
- Estaciones meteorológicas ICE:
  - Cerro San José.
  - Monteverde.

En la Figura 1-1 se muestra la ubicación de las estaciones utilizadas, respecto a la cuenca del río Abangares delimitada hasta el punto de control de La Marimba.

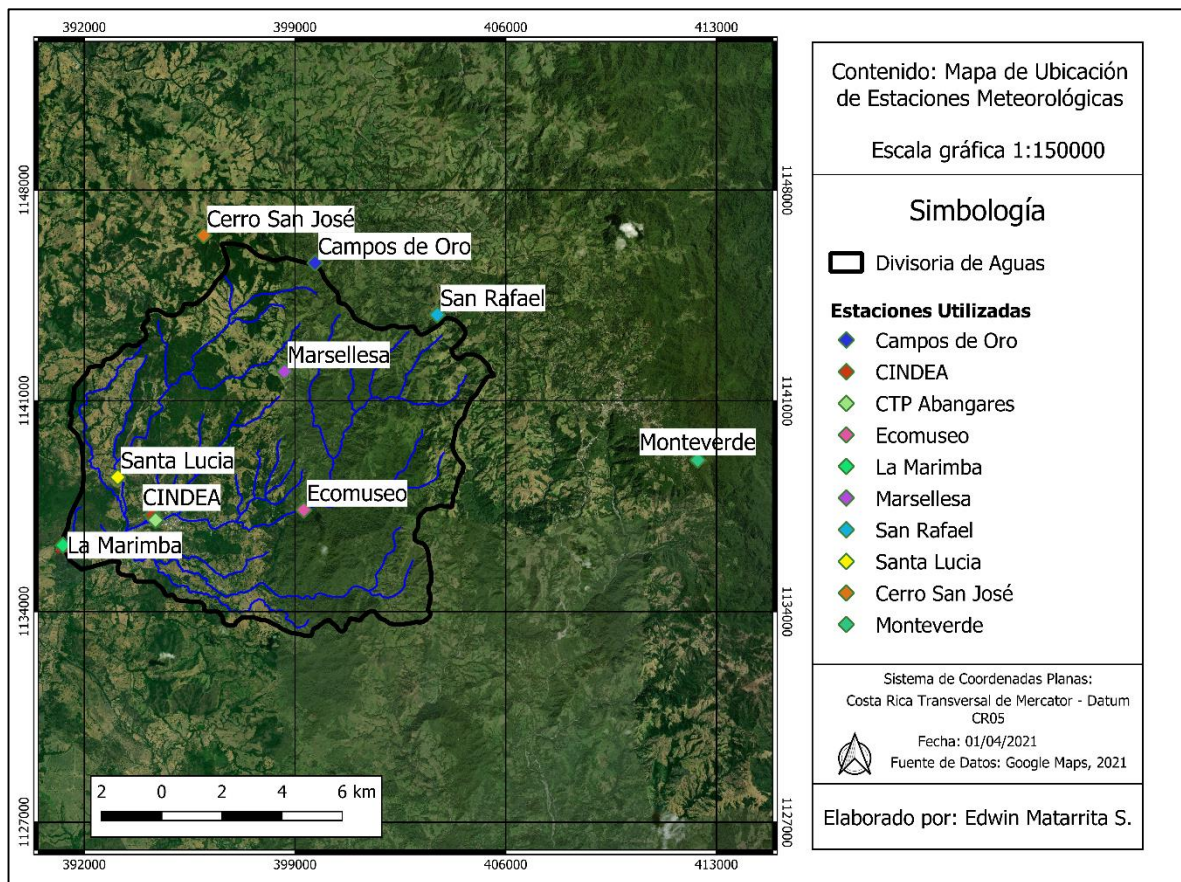


Figura 1-1. Ubicación de las estaciones del CIEDES en la cuenca del río Abangares delimitada hasta la desembocadura

Se recopiló la información topográfica necesaria para el desarrollo de los modelos de producción de sedimento a través del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT), esto incluye las curvas de nivel a cada 10 m con escala 1:25 000.

Se reunió además la información necesaria para la caracterización morfológica de la cuenca del río Abangares a la altura del sitio del embalse La Marimba.

Se realizó una búsqueda de programas disponibles para la estimación de los parámetros de la *RUSLE*, así como de sistemas de información geográfica que permitan efectuar un análisis espacial de la producción de sedimentos.

Se obtuvo además, la imagen satelital de la cuenca del río Abangares por medio del satélite estadounidense de observación de la Tierra del Servicio Geológico de los Estados Unidos (*USGS* por sus siglas en inglés), para la caracterización de la cobertura de la cuenca.

Se recopilaron fuentes bibliográficas, entre ellas libros, publicaciones, estudios técnicos, trabajos finales de graduación y boletines meteorológicos y de estadística de sedimentos que resultaran útiles para la comprensión de los procesos de producción de sedimentos y su modelado en la cuenca del río Abangares.

Se realizaron visitas de campo a la cuenca en estudio, para reconocer sus principales características geomorfológicas, el uso del suelo, la cobertura, la red de drenaje y la ubicación de las estaciones a cargo del CIEDES. Estas visitas además sirvieron para confirmar y calibrar la información geográfica recopilada. Dichas visitas se realizaron de manera periódica, al menos una vez al mes durante el desarrollo de la investigación.

### **1.5.2 Fase 2: Etapa de análisis**

La segunda etapa consistió en estudiar toda la información recopilada en la etapa anterior, para generar así la información básica necesaria para llevar a cabo las actividades planteadas en los objetivos de esta investigación.

Se inició analizando la información climática obtenida de las estaciones meteorológicas, se extrajeron de la base de datos todos los eventos registrados de precipitación, para su posterior procesamiento y la obtención del factor de erosividad  $R$ . Para el caso de las estaciones administradas por el ICE, esta institución aportó los valores de  $R$  de sus estaciones

A partir de la información topográfica nacional existente, se realizó una caracterización morfométrica de la cuenca del río Abangares, la construcción de modelos de elevación digital, estudio del terreno y sus características de cobertura, el uso del suelo, la red de drenaje, entre otros.

A partir del mapa nacional de suelos (Mata et al., 2012), se caracterizaron los tipos de suelos existentes en la cuenca del río Abangares para la asignación de los valores del parámetro  $K$ .

Mediante el uso de herramientas de teledetección y clasificación no supervisada de imágenes, se generó la cuadrícula (*raster*) de cobertura de la cuenca del río Abangares.

Esta etapa contempla además el estudio de las características, el funcionamiento y los requerimientos del modelo *InVEST* y su módulo de sedimentos *SDR* para la estimación de la producción de sedimentos por erosión hídrica laminar.

### **1.5.3. Fase 3: Etapa de resultados**

La tercera etapa de la investigación consistió en la construcción y el análisis de seis escenarios, los cuales son:

- a) Estudio de la condición actual: en este escenario se analizó la producción de sedimentos bajo las características actuales de la cuenca. Este evalúa la producción de sedimentos ante la falta de prácticas y técnicas de conservación de suelos.
- b) Análisis de la implementación de prácticas de cultivo en terrazas: en este escenario se estudió la producción de sedimentos, bajo el supuesto de que en las zonas más vulnerables a la erosión se implementan prácticas de cultivo en terrazas.
- c) Análisis de la implementación de prácticas de cultivo siguiendo las curvas de nivel: en este caso se analizó la producción de sedimentos, bajo el supuesto de que en las zonas más vulnerables a la erosión se implementan prácticas de cultivo en curvas de nivel.
- d) Análisis de la implementación de prácticas de cultivo siguiendo las curvas de nivel complementadas con bermas filtrantes de compost: para este caso se revisó el efecto que tendría sobre la producción de sedimentos, el complementar la práctica de cultivo en curvas de nivel con bermas filtrantes de compost.
- e) Análisis de la implementación de técnicas de trampas de sedimentos: para este escenario, se estudió el efecto que tendría la implementación de técnicas de conservación de suelos en zonas de pastos donde se practica la actividad ganadera.
- f) Análisis de la implementación conjunta de prácticas de conservación de suelos: para este caso de estudio, se pretende evaluar el efecto que tendría la aplicación conjunta de las prácticas de conservación de suelo estudiadas en los casos anteriores.

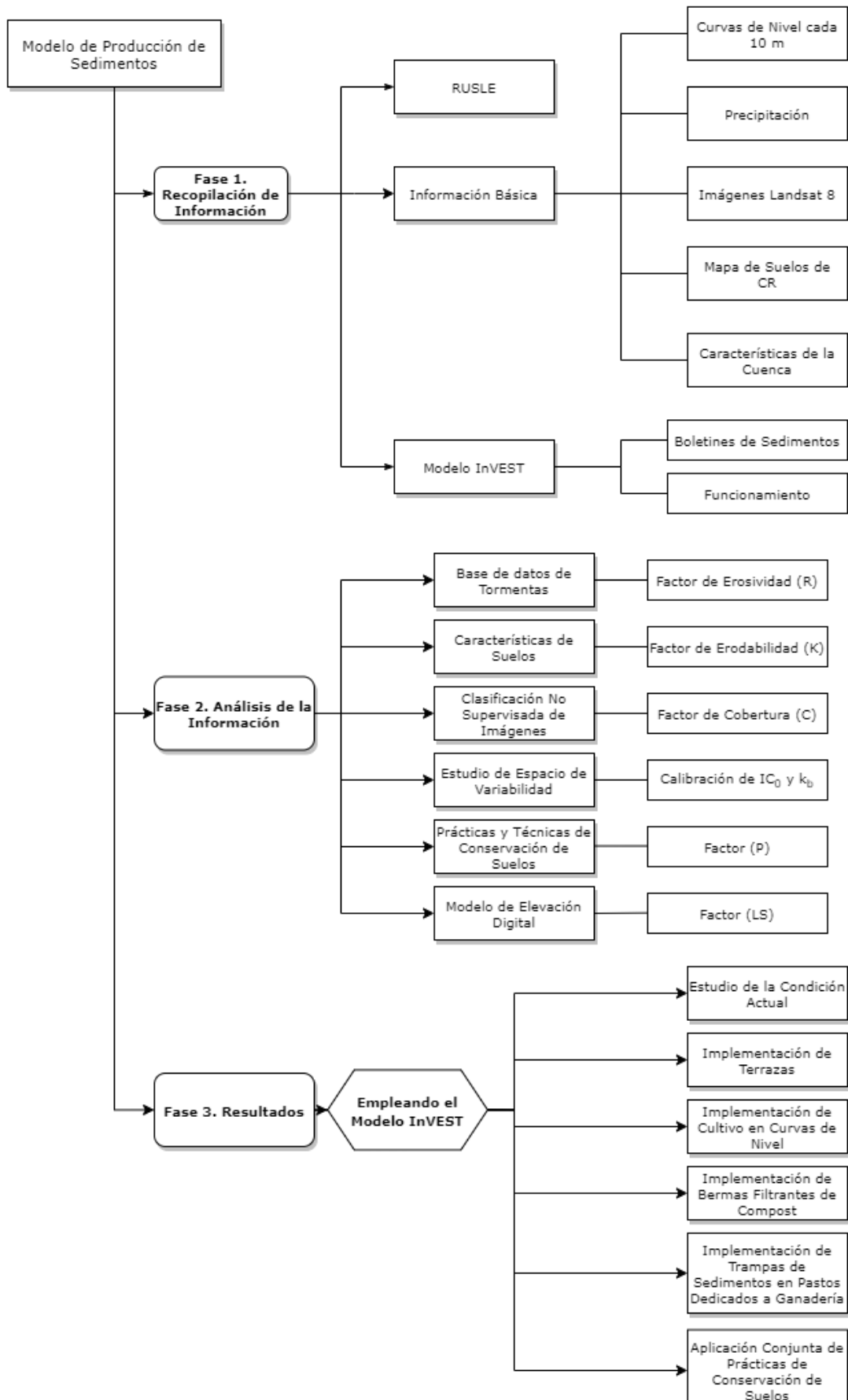


Figura 1-2. Esquema metodológico para la realización del proyecto

# Capítulo 2 . Caracterización de la zona de estudio

## 2.1. Características físicas y morfológicas de la cuenca

Las coordenadas del punto de control definido para la cuenca se muestran en el Cuadro 2-1, estas coordenadas se basan en la proyección CRTM-05 del IGN.

La cuenca del río Abangares, delimitada hasta el punto de control definido, se muestra en la Figura 2-1.

Cuadro 2-1. Coordenadas del punto de control en coordenadas CRTM-05

Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)
391287,445	1136201,171

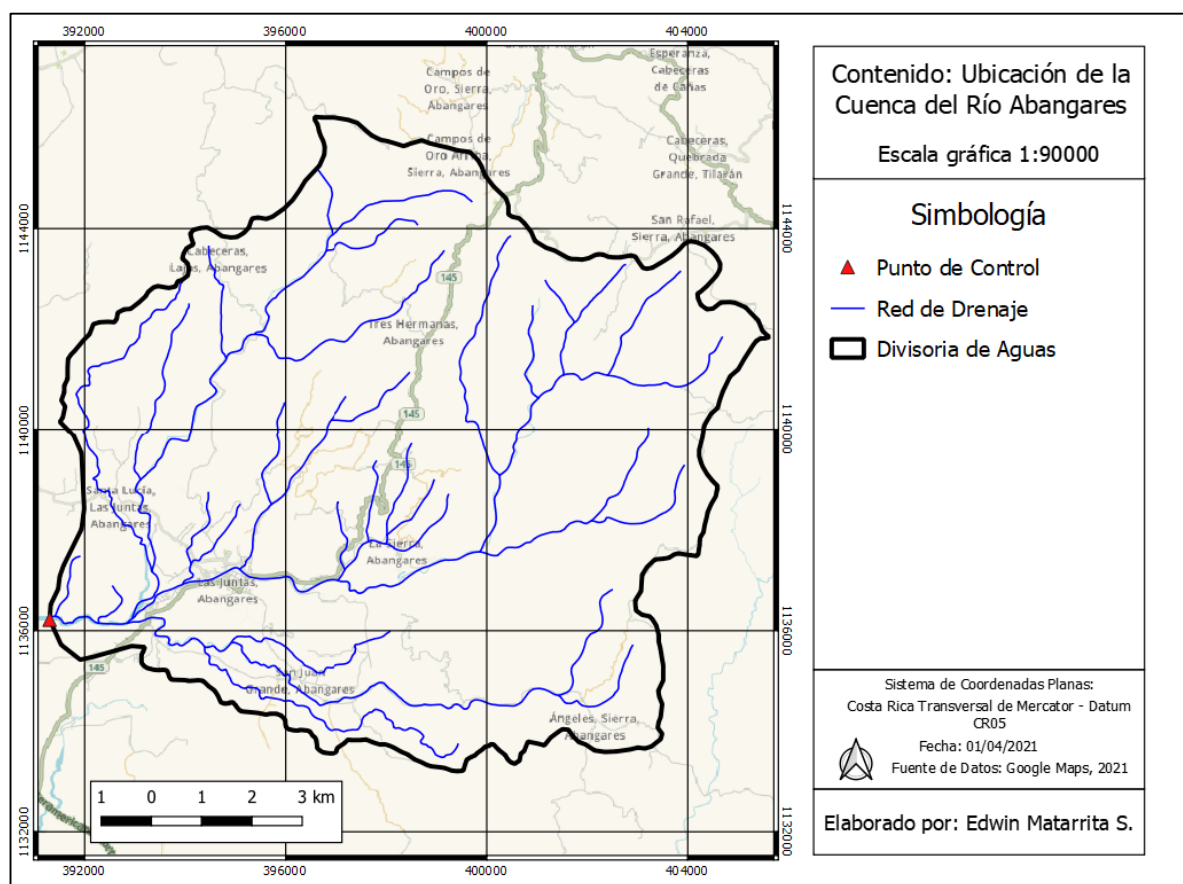


Figura 2-1. Ubicación de la cuenca del río Abangares delimitada hasta el punto de control en el sitio de embalse propuesto La Marimba

En este estudio la morfología de la cuenca del río Abangares, delimitada hasta el sitio del embalse propuesto La Marimba, se caracterizó por medio de los siguientes parámetros físicos:

- Área
- Perímetro
- Índice de compacidad
- Curva hipsométrica
- Elevación máxima
- Elevación media
- Elevación mínima
- Longitud al centroide
- Longitud del cauce principal
- Pendiente media del cauce
- Índice de pendiente
- Longitud total de cauces
- Número de orden
- Densidad de drenaje
- Lado mayor del rectángulo equivalente
- Lado menor del rectángulo equivalente

### **2.1.1. Área y perímetro**

La cuenca del río Abangares, delimitada hasta el punto de control definido, posee un área de drenaje de 124,84 km<sup>2</sup> y un perímetro de 52,17 km.

### 2.1.2. Curva hipsométrica

La curva hipsométrica permite caracterizar el relieve de una cuenca al dibujar el porcentaje de área que se encuentra por encima de una determinada elevación.

En la Figura 2-2 se muestra la curva hipsométrica para la cuenca del río Abangares delimitada hasta el punto de control.

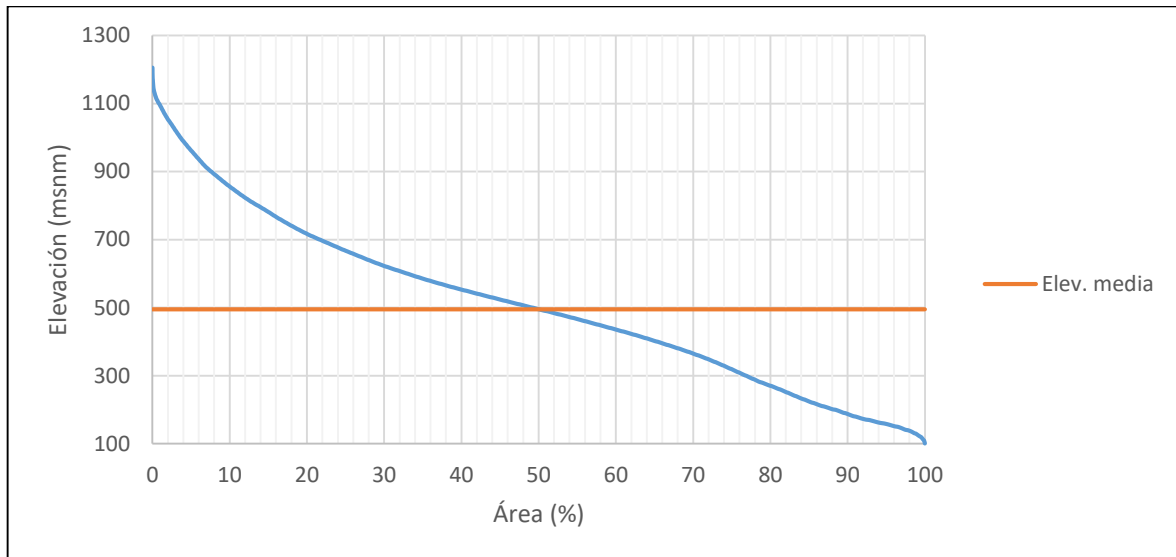


Figura 2-2. Curva hipsométrica para la cuenca del río Abangares

El punto más alto de la cuenca del río Abangares se encuentra a 1252 m.s.n.m. mientras que el punto más bajo se encuentra a la elevación 99 m.s.n.m. De acuerdo con la curva hipsométrica la cuenca tiene una formación orográfica con pendientes más fuertes en la parte alta.



### 2.1.3. Elevación media

La elevación media representa el cociente entre el volumen de la cuenca y su superficie. El volumen de la cuenca corresponde a la superficie comprendida entre la curva hipsométrica y los ejes coordenados.

Conforme se eleva el relieve por encima de la altura mínima de la cuenca se tiene una elevación media mayor, mientras que ésta disminuye cuando se dan pocas variaciones de altitud en el relieve.

La cuenca del río Abangares delimitada hasta el punto de control de La Marimba, tiene una elevación media de 495 m.s.n.m.

### 2.1.4. Índice de pendiente

El índice de pendiente indica el valor medio de las pendientes para un área de drenaje definida. Se calcula por medio de la expresión:

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{n=2}^n \sqrt{(a_n - a_{n-1})\beta_i} \quad (1)$$

Donde:

- $I_p$ : Índice de pendiente.
- $L$ : Longitud mayor del rectángulo equivalente.
- $a_n$ : Cotas de las curvas de nivel consideradas.
- $\beta_i$ : Fracción del área de la cuenca entre las curvas  $a_n$  y  $a_{n-1}$  respecto al área total de la cuenca.

Para determinar el área entre las curvas de nivel se elaboró un modelo de elevación digital del río Abangares con base en la información topográfica del Servicio Nacional de Información Topográfica (SNIT), este se muestra en la Figura 2-3. El índice de pendiente para la cuenca es de 0,22.

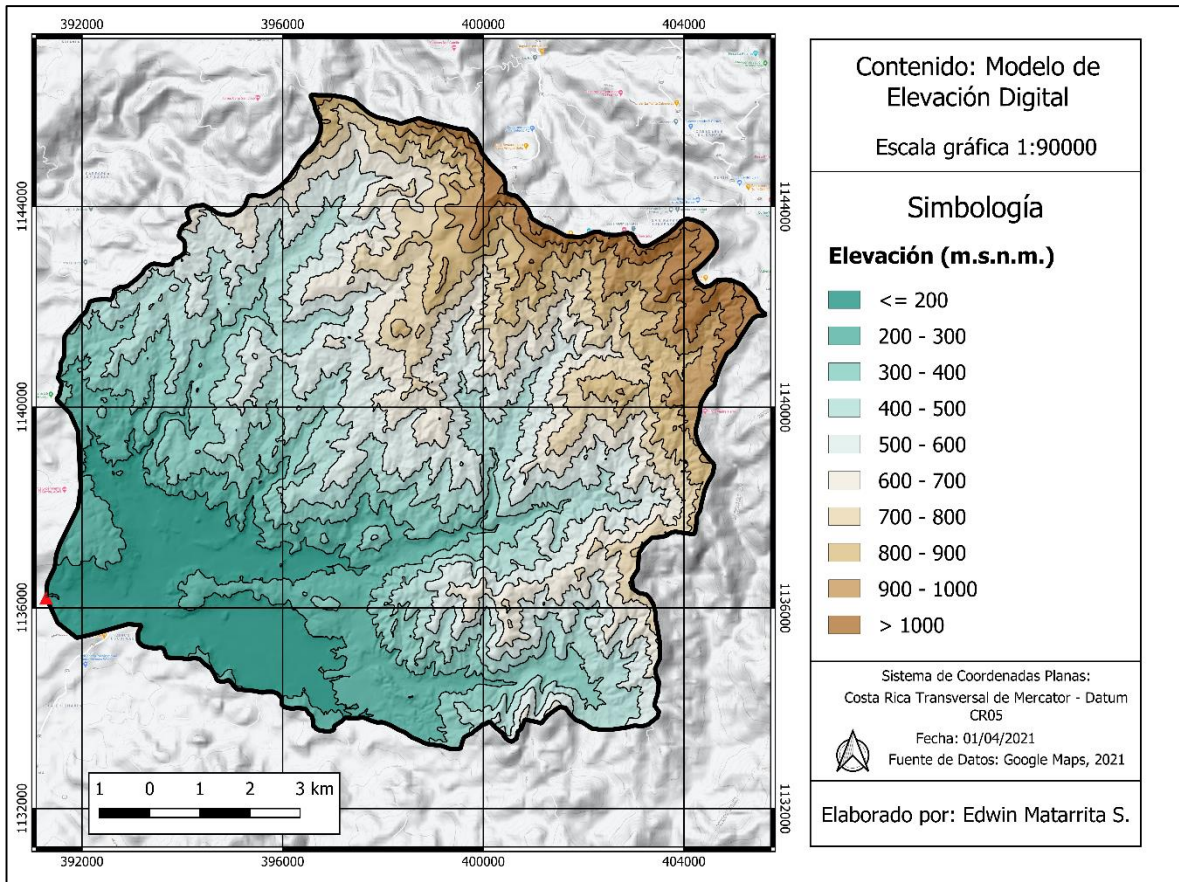


Figura 2-3. Modelo de elevación digital de la cuenca del río Abangares

### 2.1.5. Longitud y pendiente media del cauce principal

La longitud del cauce principal de la cuenca hasta la desembocadura es de 45,5 km y la pendiente media ponderada del cauce es de 1%. La longitud del cauce principal de la cuenca La Marimba hasta su punto de delimitación es de 17,6 km y la pendiente media ponderada del cauce es de 3%.

### 2.1.6. Densidad de drenaje

La densidad de drenaje se representa como el cociente de la suma total de las longitudes de todos los cauces de una cuenca, entre el área total de la cuenca. Define la longitud media de cauces por unidad de superficie. La expresión utilizada es:

$$D = \frac{\sum L}{A} \quad (2)$$

Donde:

- D: Es la densidad de drenaje en  $\left(\frac{kn}{km^2}\right)$ .
- $\sum L$ : Corresponde a la sumatoria de las longitudes de todos los cauces que conforman la cuenca (km).
- A: área total de la cuenca en (km<sup>2</sup>)

La densidad de drenaje de la cuenca del río Abangares delimitada hasta el punto de control es  $1,02 \left(\frac{kn}{km^2}\right)$ , lo que corresponde a una densidad de drenaje alta.

### 2.1.6. Resumen

En el siguiente cuadro se resumen los parámetros morfológicos explicados anteriormente y otros adicionales que fueron utilizados para la caracterización física del río Abangares.

Cuadro 2-2. Resumen de parámetros morfológicos de la cuenca del río Abangares

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Cuenca río Abangares</b>
<i>Área de drenaje</i>	A (km <sup>2</sup> )	124,84
Perímetro de la cuenca	P (km)	52,17
Longitud total de los cauces de agua	∑L (km)	127,33
Longitud del cauce principal	L (km)	17,59
<i>Elevaciones</i>		
Elevación promedio de la cuenca	(msnm)	509,82
Elevación media de la cuenca	(msnm)	494,96
Elevación máxima de la cuenca	(msnm)	1251,82
Elevación mínima de la cuenca	(msnm)	99,39
Índice de pendiente	I <sub>p</sub>	0,22
<i>Pendiente del cauce principal</i>		
- Pendiente media	S <sub>1</sub>	5%
- Pendiente media ponderada	S <sub>2</sub>	3%
- Pendiente de Taylor y Schwarz	S <sub>3</sub>	2%
<i>Sistemas de drenaje</i>		
- Número de orden		3,00
- Densidad de drenaje	D <sub>d</sub> (km/km <sup>2</sup> )	1,02

## 2.2. Geología y edafología

La geología de una región describe las características y la disposición de las masas de suelo y roca. Las formaciones y las estructuras geológicas afectan la morfología de la cuenca, el comportamiento de los ríos y los patrones de drenaje, así como los procesos de percolación, almacenamiento y transmisión de aguas subterráneas y la producción de los sedimentos.

El tipo de suelo influye sobre la escorrentía de la cuenca, por lo que es de suma importancia conocer sus características (la composición, la textura, el tamaño de partícula, entre otras), para poder definir su clasificación. Una vez que se conoce el tipo de suelo se pueden determinar algunas de sus propiedades más importantes, tales como la permeabilidad, la cual tiene una relación inversa con la velocidad de escorrentía que afecta de manera directa la respuesta hidrológica de la cuenca y la producción de los sedimentos.

La geología general de la zona de estudio presenta rocas ígneas volcánicas en la parte alta y media. En la parte baja existen diferentes tipos, rocas ígneas extrusivas, rocas ígneas intrusivas y rocas sedimentarias.

La geología estructural indica un dominio de fallas tectónicas normales y pliegues en el sector inferior de la cuenca. La parte superior de la cuenca muestra una susceptibilidad moderada al deslizamiento.

La superficie de la cuenca está compuesta de suelos tipo *entisoles*, *alfisoles*, *mollisoles*, *inceptisoles* y *ultisoles*.

## 2.3. Subcuencas

La cuenca del río Abangares delimitada hasta el punto de control de La Marimba se compone de las subcuencas detalladas en la Figura 2-4 y el Cuadro 2-3.

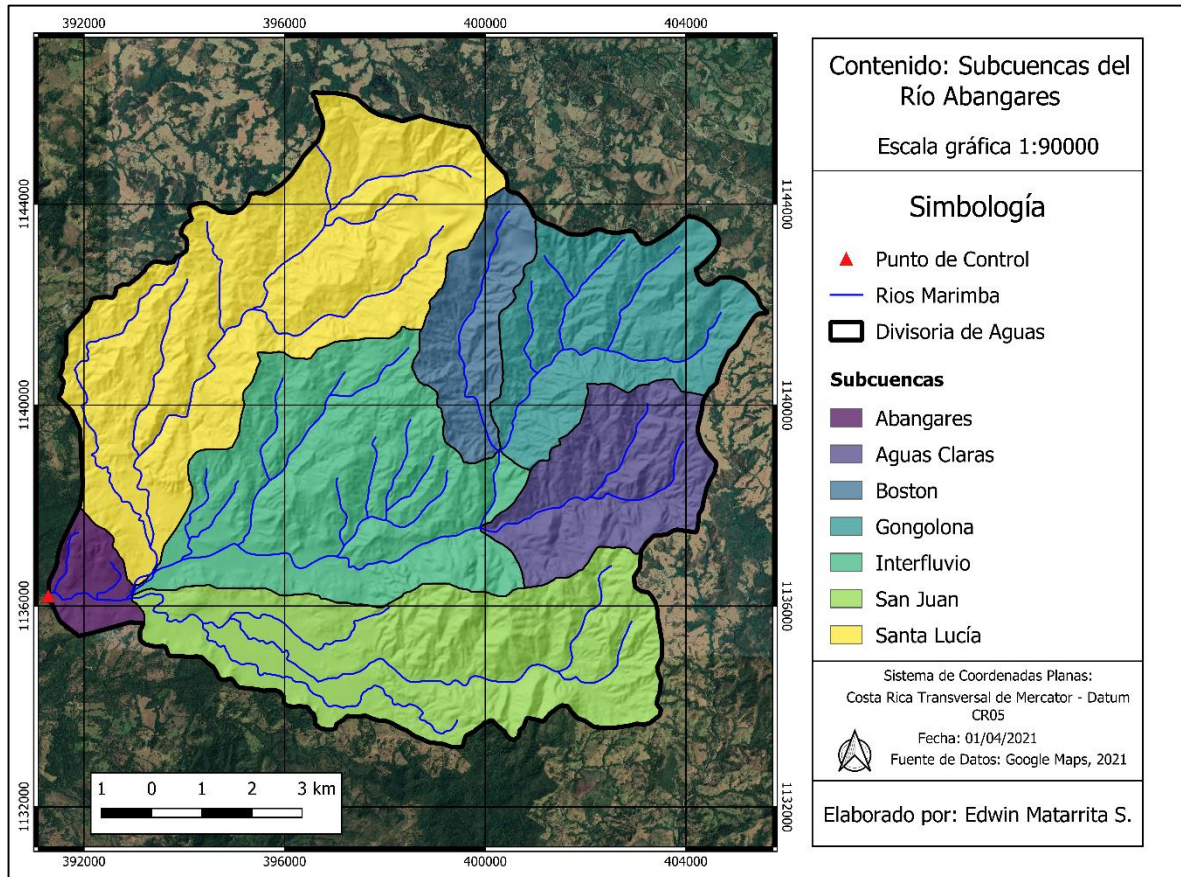


Figura 2-4 Subcuencas del río Abangares.

Cuadro 2-3. Características de las subcuencas del río Abangares

Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Perímetro (km)
Aguas Claras	11,17	15,09
Gongolona	15,75	20,02
Boston	7,10	13,67
Santa Lucía	35,93	32,48
San Juan	25,25	28,22
Interfluvio	26,72	25,84

## **2.4. Uso de la tierra y cobertura**

En las partes más bajas de la cuenca se encuentran trazas de bosque seco tropical, a lo largo de toda la cuenca se presenta bosque húmedo premontano transición a basal y áreas de bosque húmedo tropical transición a seco.

La mayor parte del área se utiliza para la agricultura y la ganadería extensiva. En la parte alta de la cuenca se desarrolla el pastoreo y la minería, esto provoca que las laderas con alta pendiente, se vuelvan vulnerables a la acción erosiva del agua. Además, se genera deforestación para el desarrollo de la ganadería y la agricultura.

# Capítulo 3 . Recopilación de la teoría de la erosión hídrica

## 3.1. Procesos de erosión

El suelo tiene diferentes acepciones, depende del uso que de este se requiera principalmente. Este puede ser definido por sus características geotécnicas cuando se utiliza como medio de soporte de obras de infraestructura civil, edafológicas cuando se trata de actividades agrarias y geológicas, cuando se trata de estudiar su composición y origen.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO por sus siglas en inglés), “el suelo está compuesto por minerales, materia orgánica, diminutos organismos vegetales y animales, aire y agua. Es una capa delgada que se ha formado muy lentamente, a través de los siglos, con la desintegración de las rocas superficiales por la acción del agua, los cambios de temperatura y el viento. Las plantas y animales que crecen y mueren dentro y sobre el suelo son descompuestos por los microorganismos, transformados en materia orgánica y mezclados con el suelo”.

Una de las ramas de estudio en la hidrología, es el estudio de la producción de sedimentos por erosión hídrica, así como la llegada del sedimento a los cauces de la red de drenaje de una cuenca y su respectivo transporte dentro de un cauce.

Para esto es necesario estudiar y profundizar en las características meteorológicas, morfológicas, fluviales, de cobertura y geológicas de una determinada cuenca, ya que la interacción entre estos componentes es lo que determinará el volumen potencial de sedimentos que se puede generar en un periodo determinado.

El proceso de producción de sedimentos inicia por los agentes erosivos, estos pueden ser:



### 3.1.1. Agua

Esta es la principal causante de la meteorización natural del suelo, ya que actúa como abrasivo y disolvente. El agua funciona como agente erosivo en su estado líquido y sólido, además de esto, actúa sobre el suelo y depende del medio en el que se transporte, estos pueden ser:

- Ríos: Desgastan el terreno por donde pasan por medio de la fricción entre el agua y el material de arrastre.
- Aguas subterráneas: Desgastan el suelo subterráneo y subsuperficial formando cavernas, nacientes y sumideros.
- Lluvia: Disgrega las partículas del suelo al impactar la capa más superficial de la corteza terrestre, arrastrando consigo las partículas más finas que son retenidas en la lámina de escorrentía.
- Oleaje: Producen un desgaste mecánico en el suelo de las costas, por acción de las olas y del viento.

### 3.1.2. Viento

El movimiento de masas de aire que alcanza una determinada velocidad (viento eficaz) y es capaz de desagregar y transportar el suelo, genera procesos erosivos en un determinado terreno mediante dos procesos:

- Deflación: Levantamiento del material superficial del suelo.
- Abrasión: Desgaste de rocas por la colisión constante con otras partículas.

### 3.1.3. Actividades humanas

La erosión antrópica es causada por la modificación de las características de la corteza terrestre por las actividades del ser humano, el cual a su vez, puede generar procesos erosivos artificiales o potenciar los naturales. La erosión antrópica se da a un ritmo mucho más acelerado que la erosión por medios naturales y suele ser más focalizado.

La agricultura, la ganadería, el transporte, la minería y el desarrollo urbano e industrial suelen ser las principales causas de la erosión antrópica.

### **3.1.4. Cambios de temperatura**

Los efectos cíclicos de expansión y contracción térmica en periodos diurnos o estacionales, generan esfuerzos de tensión que fatigan las rocas y finalmente las fracturan en elementos más pequeños.

### **3.1.5. Efectos físicos de la vegetación**

Aunque la capa vegetal suele ser un medio para proteger el suelo de la erosión, en ciertos casos, las raíces de los árboles y la acción de animales excavadores, pueden fracturar las rocas, y las dejan más susceptibles a meteorizarse.

La forma en la cual la cubierta vegetal actúa contra la erosión se puede resumir en cinco mecanismos:

- La vegetación resta caudal de precipitación que podría impactar en la superficie del suelo y en consecuencia, reduce la cantidad de escorrentía superficial mediante el efecto de la intercepción.
- La vegetación evita el impacto directo de las gotas de lluvia sobre la superficie, por lo que evita la dispersión del material y el encostramiento de la superficie.
- La vegetación favorece la infiltración del agua al crear conductos dentro de la estructura del suelo.
- Evita concentraciones del flujo de escorrentía superficial, además, le resta velocidad al incrementar la rugosidad del terreno.
- La vegetación aglutina el suelo con sus raíces, haciendo más difícil que se disgregue y sea transportado.

### **3.1.6. Descomposición química**

Es la erosión ocasionada por la descomposición mineralógica del suelo y rocas, por contacto con químicos u otros minerales generalmente transportados por el agua.

### 3.2. Naturaleza de los sedimentos

Es por medio de los agentes mencionados previamente, que los suelos se degradan y finalmente pueden ser arrastrados para formar sedimentos. Al provenir de distintos medios y procesos erosivos, estos se clasifican dependiendo de si se encuentran en la superficie, o si se encuentran en un cauce.

Los sedimentos de superficie se clasifican en cohesivos y no cohesivos, aunque pueden presentar una mezcla de ambas características en ciertos casos al poseer cohesión y fricción interna.

El sedimento no cohesivo es aquel que se compone por granos gruesos (arenas y grava), el movimiento de estas partículas va a depender principalmente de la fuerza de gravedad y en el caso de granos más grandes, de su forma. El material granular por su peso y forma, proporciona resistencia a las fuerzas de arrastre y sustentación que se generan en una lámina de escorrentía, por lo que no suelen convertirse en sedimento con facilidad.

El sedimento cohesivo es aquel conformado por material fino (arcillas y limos) que es disgregado por agentes erosivos, En el caso de la lluvia, el impacto de las gotas de lluvia contra la superficie del suelo genera que las partículas que lo componen sean separadas y puedan ser arrastradas por la lámina de escorrentía superficial mediante las fuerzas de sustentación y arrastre, para que posteriormente puedan ser entregadas a los cauces de ña red de drenaje.

Los sedimentos que viajen por un cauce están compuestos por partículas orgánicas e inorgánicas, tanto finas como gruesas, que se mueven por medio de corrientes de agua y posteriormente son depositadas en diferentes tramos del río, cambiando constantemente su lecho y alterando su cauce. Los sedimentos en el cauce se clasifican en:

- La carga de fondo (Bedload): La cual está compuesta por la parte gruesa del sedimento que escurre en el cauce de los ríos y que por su peso se deposita en el fondo del lecho y es transportada cuando la fuerza de arrastre supera el peso y la cohesión de las partículas, aproximadamente entre el 5% y el 20% del total del sedimento se encuentra en la carga de fondo.

- *La carga suspendida (Suspended Load)*: Es la porción fina de sedimento que es transportada cuando el efecto de arrastre de la corriente es suficiente para levantarla y se mantiene suspendida por efecto de la turbulencia, pero que una vez se pierde esta condición, se precipita y sedimenta. La carga suspendida está compuesta generalmente por arcillas, limos y arenas finas.
- *Carga de lavado (Washload)*: Es la parte más fina del sedimento que escurre en el cauce de un río, el Departamento del Interior de los Estados Unidos de América la define como “las partículas que tengan un diámetro menor a 0,00195 mm y que, a diferencia de la carga suspendida, estas partículas son tan pequeñas que nunca se sedimentan aún en ausencia de turbulencia o en cuerpos de agua sin movimiento”.

En la siguiente figura se ilustra la clasificación de sedimentos en el cauce.

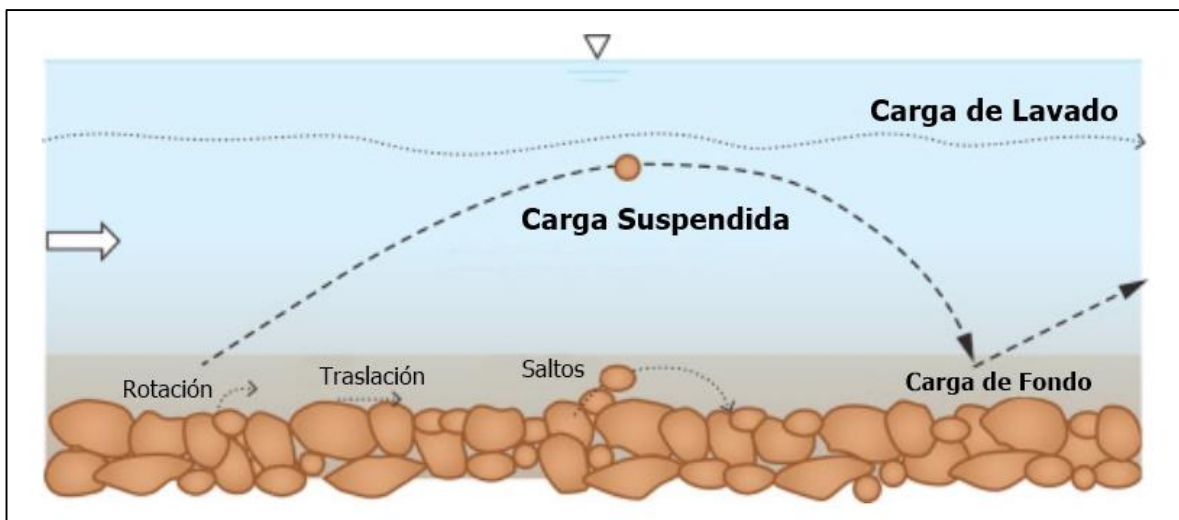


Figura 3-1. Tipos de movimiento de masa de suelo

Fuente: (Rheinheimer & Yarnell, 2017)

Editado: (Matarrita, 2021)

### 3.3. Clases e indicadores de erosión hídrica

Según (Cubero, 1996), para Costa Rica se pueden identificar cinco clases principales de erosión hídrica, la cuales son:

- 1) Erosión por salpicadura: Las gotas de lluvia al impactar en el material que conforma el suelo, lo disgregan desplazando sus partículas a distancias cortas (máximo 2 m). Esta erosión es un factor importante en el desprendimiento de las partículas del suelo, no así en su desplazamiento.

Al momento de darse el impacto de las gotas de agua con el suelo, se produce una rotura de las partículas gruesas y del material orgánico, dejando expuestas sobre la superficie las más finas.

- 2) Erosión laminar: Esta forma de erosión ocurre en terrenos con pendientes uniformes y suaves cuando la cantidad de agua excede a la capacidad de infiltración del suelo y forma una película delgada de agua.

La erosión laminar separa las partículas del suelo disgregadas por las gotas de lluvia, dejando en su lugar las partículas más gruesas y llevándose consigo las más pequeñas, las cuales en mayor grado determinan la fertilidad y capacidad productiva de los suelos.

Según (Vargas, 2010) la erosión laminar es la forma de erosión que más afecta la agricultura por degradación y pérdida de los horizontes de suelo más superficiales y, a su vez, es la que más aporta producción de sedimentos en los ríos.

La erosión laminar se reconoce cuando existen áreas de suelo de color más claro, en las cuales se nota a simple vista que la capa superior (horizonte O), la cual se caracteriza por tener un color oscuro debido al contenido de materia orgánica, ha desaparecido.

- 3) Erosión en surcos: La superficie natural del terreno es irregular en la mayoría de los casos, presentando depresiones y elevaciones.

El agua de lluvia se concentra en las depresiones formando corrientes. Estas acumulaciones de agua de escorrentía arrastran y transportan las partículas del suelo formando zanjas o surcos. La erosión en surcos adquiere una mayor gravedad cuando caen aguaceros intensos en suelos desprovistos de cobertura vegetal y con alta susceptibilidad al transporte por el agua de escorrentía.

- 4) Erosión en cárcavas: Luego de varios ciclos de lluvia, las zanjas o surcos se van ampliando con el movimiento de la escorrentía. Este tipo de erosión se produce cuando existe una mayor concentración en el escurrimiento debido a las irregularidades del terreno que permiten la unión de varios surcos.

“Como cárcavas pueden clasificarse aquellas rutas del agua estrechas y poco profundas (0,6 a 0,9 m) o de grandes dimensiones (9 a 14 m de profundidad y 22 a 35 m de ancho). Se observan en sección transversal en forma de U (en zonas con suelos fácilmente erosionables) o V (los suelos tienen buena resistencia a la entalladura rápida, o presentan estratos cada vez más resistentes a medida que se profundiza la cárcava)” (Gómez, 2002).

- 5) Movimientos en masa: Esta clase de erosión abarca todos aquellos casos en donde se desplazan masas de suelo y roca sobre distancias relativamente cortas, por acción de la gravedad y en mayor o menor grado de la cantidad de agua.

Los movimientos en masa tienen la particularidad de ser mucho más evidentes y rápidos que otras clases de erosión. Sus causas y consecuencias no son siempre fácilmente detectables, tampoco su prevención.

La recuperación de tierras degradadas por deslizamientos es muy difícil y costosa. De acuerdo con (Marchamalo, 2007), esta clase de erosión genera aportes cuantiosos de sedimento en cualquier área de drenaje, ya que puede originar entre el 15% y 20% de los sedimentos.

En la siguiente figura se describen los diferentes tipos de movimientos de masa.

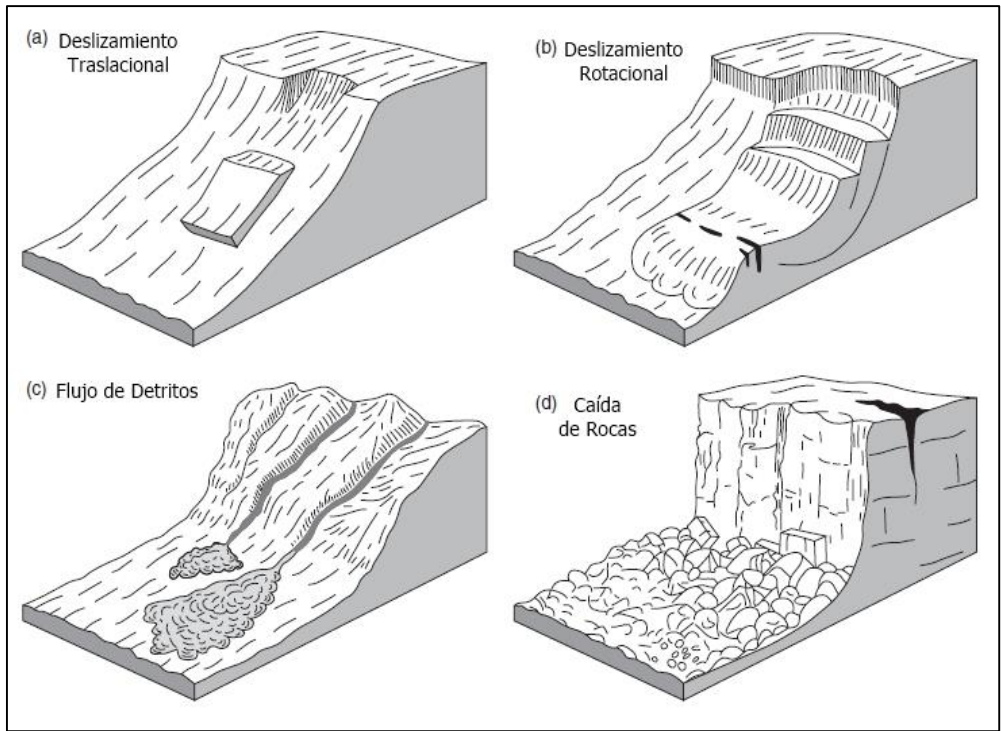


Figura 3-2. Tipos de movimiento de masa de suelo

Fuente: (Charlton, 2008)

Editado: (Matarrita, 2021)

Los principales tipos de erosión, se muestran en la Figura 3-3.

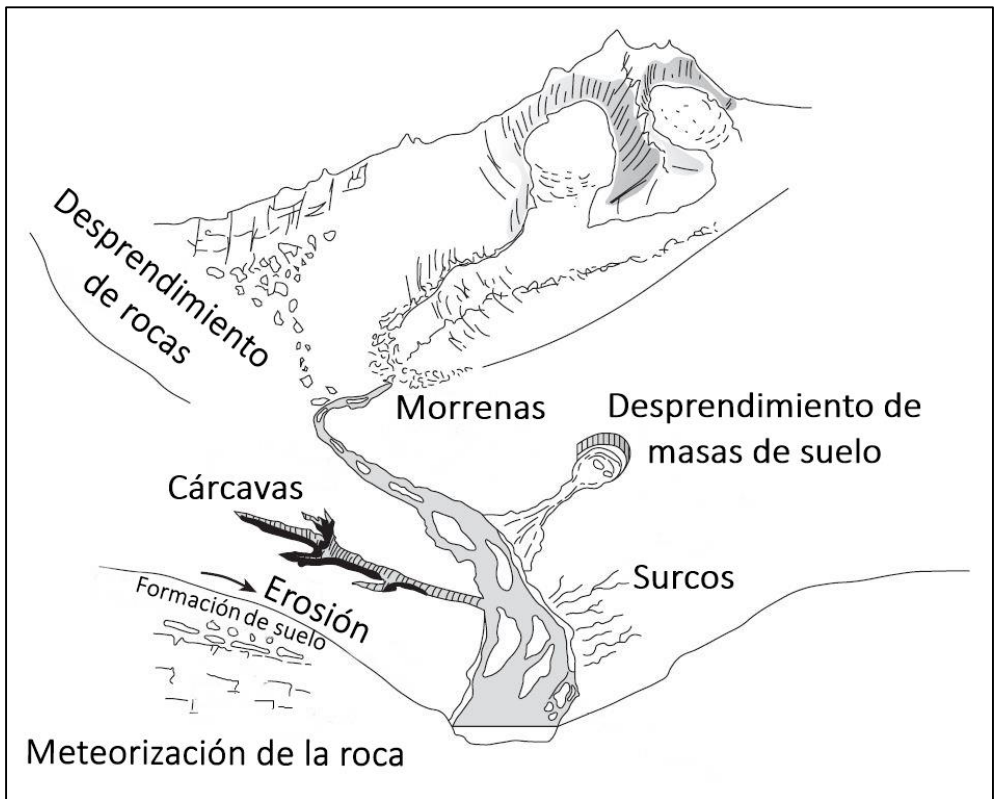


Figura 3-3. Fuentes de producción de sedimentos

Fuente: (Charlton, 2008)

Editado: (Matarrita, 2021)

Además de estas clases, se pueden identificar varios indicadores de erosión hídrica observables en el terreno, las cuales son:

- Pedestales: Son un indicador de la erosión por salpicadura.



Figura 3-4. Pedestales formados en la cuenca del río Abangares

- Plantas con raíces expuestas: Indican una desaparición de los horizontes superficiales del suelo.



Figura 3-5. Raíces expuestas por acción de la erosión en la cuenca del río Abangares



- Surcos y cárcavas: Son las marcas más claras de la erosión hídrica ya que modifican significativamente el terreno.



Figura 3-6. Erosión en surcos en la cuenca del río Abangares

### 3.4. Factores que influyen en la erosión hídrica

Debido a que el agua es el principal agente erosivo natural, es importante conocer qué factores intervienen en el proceso de la erosión hídrica. Entre estos están:

- Geomorfología de la cuenca: Las características del terreno de un área de drenaje, influyen de manera directa sobre la producción de sedimentos por erosión hídrica.

Este factor puede ser subdividido en tres componentes principales, estos son:

- *Pendiente del terreno*: La magnitud del esfuerzo cortante y la velocidad de la escorrentía, se encuentran en función de la pendiente del terreno de un área de drenaje.

En un terreno de pendientes pronunciadas, la lámina de escorrentía arrastra el material fino disgregado por las gotas de lluvia hasta depositarlo en un cauce o una planicie en el terreno.

En terrenos de pendiente suave, el agua tiende a encharcarse en depresiones y la velocidad no es suficiente para arrastrar el material que se desprende por el impacto de las gotas de lluvia.

- *Longitud de pendiente*: La longitud de una ladera es un factor determinante en la producción de sedimentos por erosión hídrica, ya que además de la magnitud de la pendiente del terreno, este debe tener una extensión suficiente que permita formar una lámina de escorrentía que sea capaz de arrastrar el material erosionado.

Este factor se ve directamente influenciado por la cobertura, las depresiones y los cambios de pendientes del terreno, ya que estos actúan y reducen la velocidad de la lámina de escorrentía.

Según (Wischmeier & Smith, 1978) ,citado en (Gómez, 2002),“en un terreno de longitud de pendiente de 92 m, la pérdida en el último cuarto del declive es aproximadamente 2,5 veces mayor que el cuarto inicial. La longitud de la pendiente se mide desde el punto de origen del flujo superficial hasta el punto donde la inclinación disminuye de modo que se pueda producir deposición de material, o hasta el punto en el que el agua escurrida llega a un surco definido”.

- *Curvatura de pendiente:* Las curvaturas en el terreno pueden ser de tipo cóncavas o convexas. La forma de la curvatura incide de manera directa sobre la lámina de escorrentía que arrastra el material erosionado.

Para el caso de las laderas con curvatura convexa, conforme se aleja de la divisoria de aguas y aumenta la pendiente, también aumenta la velocidad de flujo. En esta región no se deposita material, por lo que únicamente se presenta un desgaste progresivo del terreno.

Caso contrario para los terrenos con curvatura cóncava, la pendiente del terreno tiende a minimizarse conforme se acerca al pie de la ladera, la velocidad de la escorrentía disminuye y por lo tanto, el sedimento se deposita.

En la Figura 3-7 se muestra de manera gráfica, cómo aumenta el volumen transportado por la ladera según la curvatura de la pendiente.

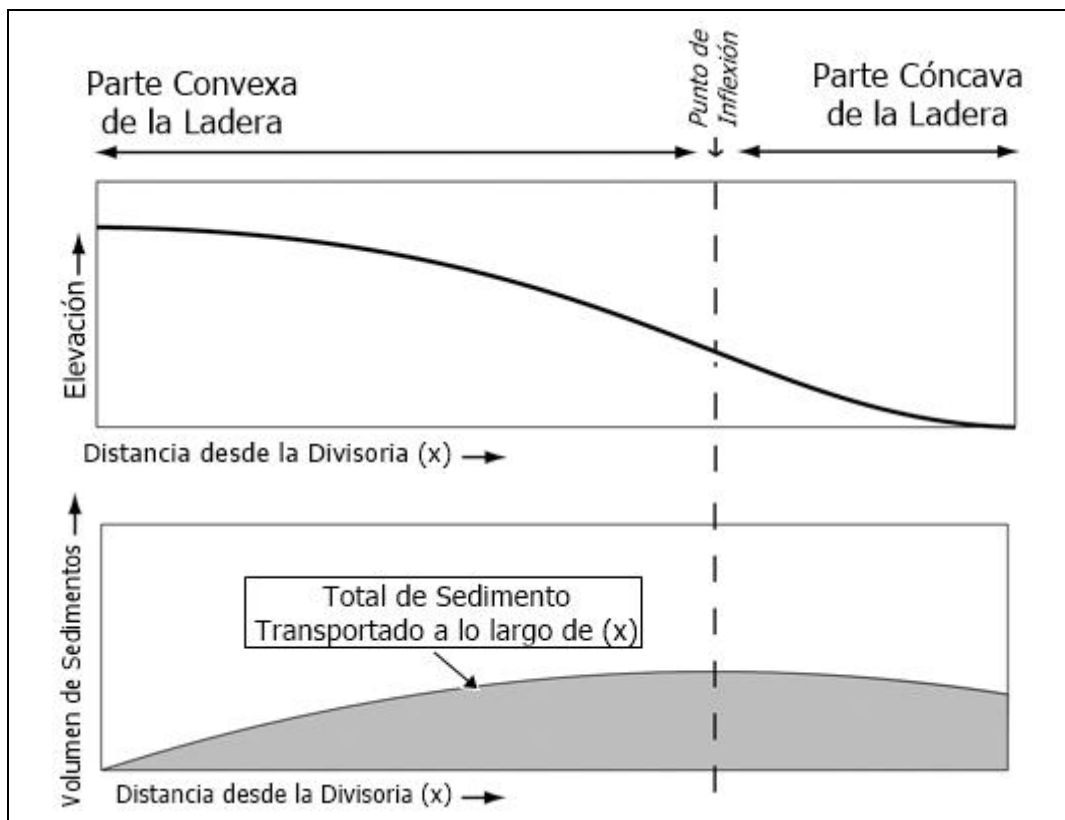


Figura 3-7. Diagrama de transporte de sedimento según longitud y curvatura de la pendiente

Fuente: (Mudd & Furbish, 2003)

Editado: (Matarrita, 2021)

- Características de la precipitación: La precipitación no es uniforme en el espacio, cada región posee un patrón particular dependiente de su exposición a la circulación atmosférica y de los factores locales propios.

La altitud, la latitud, la orografía y la distancia respecto a las fuentes de humedad, son algunos de los factores que determinan las características de la precipitación en una región.

Para el caso de la producción de sedimento por erosión hídrica, las características que influyen de manera primordial son:

- *Cantidad de la precipitación:* El volumen de precipitación que se genere en un evento determinado, define el potencial volumen de escorrentía que se puede producir. De no ser suficiente, la mayor parte del volumen de lluvia es retenido por las pérdidas iniciales (intercepción, infiltración y encharcamiento). Sin embargo, si la cantidad de lluvia es suficiente para superar el volumen de pérdidas iniciales, se produce escorrentía que puede erosionar y transportar el suelo.
- *Intensidad y duración de la precipitación:* La intensidad de la precipitación se define como el volumen de lluvia que cae en un periodo definido (mm/h). (Wischmeier & Smith, 1978) definieron una relación directa entre la intensidad de un evento de precipitación, y la energía cinética que las gotas de lluvia le imprimen al suelo al impactarlo.  
A mayor intensidad mayor será la energía cinética y, por lo tanto, mayor será la disgregación de las partículas de suelo que serán posteriormente arrastradas por la lámina de escorrentía.  
La duración del evento de precipitación también desempeña un papel fundamental en el proceso de la erosión hídrica.  
Las lluvias con alta intensidad y larga duración, disgregan y arrastran mayor cantidad de sedimentos que eventos de baja intensidad y corta duración.
- *Distribución espacial y temporal de la precipitación:* La distribución temporal de un evento de precipitación define la intensidad de la tormenta y, como consecuencia, la cantidad de energía cinética con la que se impacta el suelo. Por su parte, la distribución espacial determina dónde se concentra el mayor

volumen de un aguacero, definiendo así la rapidez con que se forma la lámina de esorrentía, la rapidez con que la esorrentía alcanza la red de drenaje y finalmente, la respuesta hidrológica de la cuenca ante ese evento de precipitación.

Según la distribución espacial, el evento de precipitación se puede concentrar en distintas zonas de la cuenca donde intervengan elementos que favorezcan o disminuyan la esorrentía y el transporte de sedimentos. En la Figura 3-8 se muestra la variación de la respuesta hidrológica de la cuenca dependiendo de las características de la región donde se concentre el evento.

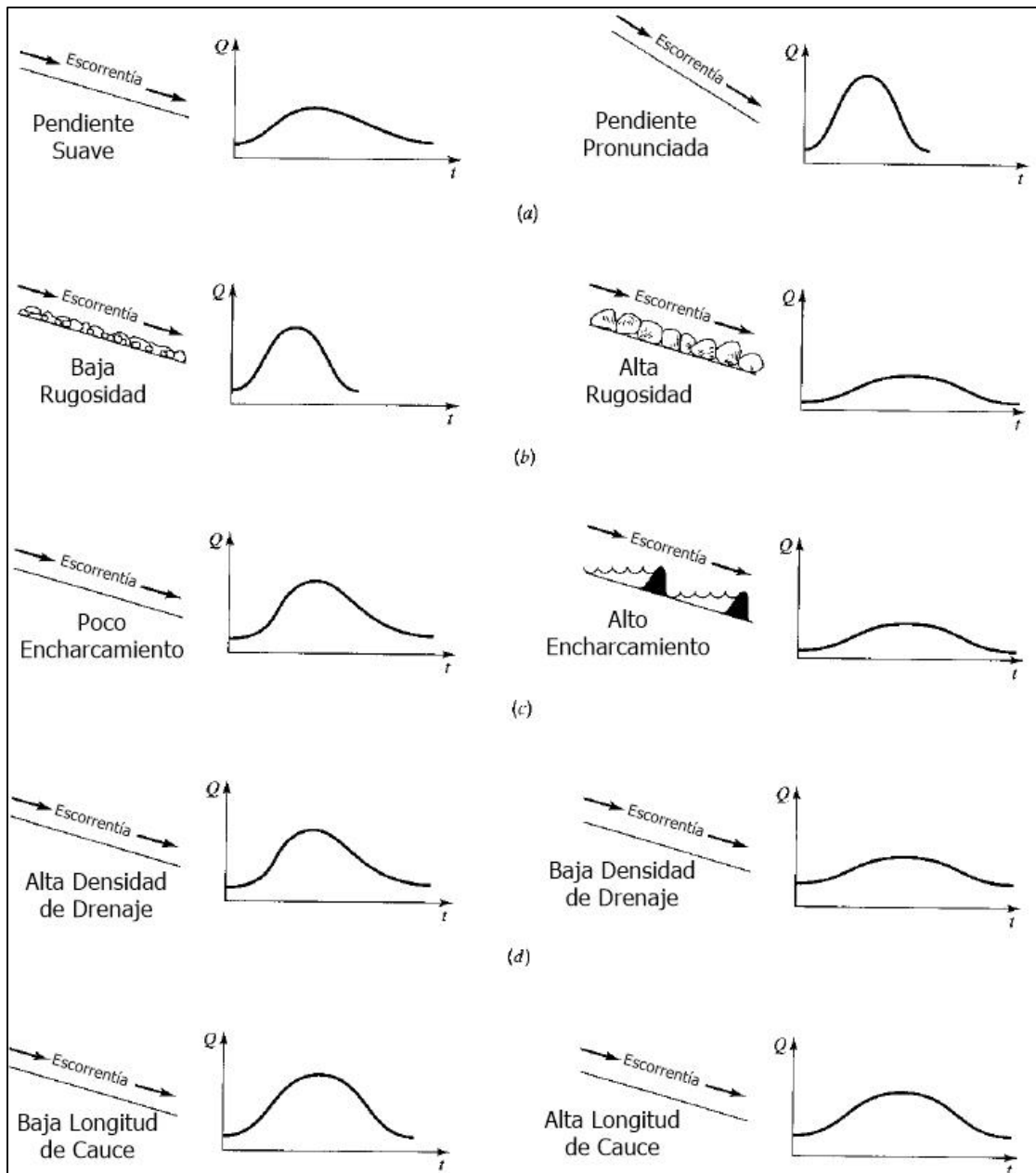


Figura 3-8. Variación de la respuesta hidrológica de una cuenca, en función de sus características

Fuente: (Mays, 2001)

Editado: (Matarrita, 2021)

- Características del suelo:

- *Tamaño de las partículas de suelo:* El suelo es un material heterogéneo, formado por partículas de diferente tamaño, forma y composición. Los sedimentos no cohesivos (arenas y gravas) poseen mayor potencial de disgregación, mientras que los sedimentos cohesivos (limos y arcillas) poseen mayor potencial de ser arrastrados por la escorrentía superficial.

Además, los suelos conformados por partículas finas poseen permeabilidad y tasa de infiltración menores a aquellos conformados por partículas

gruesas. Esto incide de manera directa en el volumen de escorrentía que se pierde por infiltración y percolación a capas inferiores de suelo.

- *Contenido de materia orgánica:* La materia orgánica que se encuentra en el suelo, está compuesta por los restos vegetales y animales que se superponen al suelo o se incorporan a él. Los suelos con mayor contenido de materia orgánica, son más propensos a disgregarse que aquellos que presentan menor contenido de compuestos orgánicos.
- Cobertura vegetal: La cobertura vegetal actúa como amortiguador de la energía de la lluvia, disminuyendo así la fuerza con la que impactan las gotas de lluvia contra el suelo.

La susceptibilidad del suelo a ser disgregado, varía en función de su cobertura, a continuación se detallan algunos ejemplos:

- *Suelo desnudo:* Esta es la condición más crítica que puede presentar un suelo, ya que no posee ningún tipo de cobertura que amortigüe la energía de la lluvia, ni que retenga el suelo arrastrado por la escorrentía. Debido a que el agua discurre libremente por la ladera, es más fácil que se generen estructuras como los surcos o las cárcavas.
- *Cultivos:* Las técnicas y prácticas que se empleen en cada cultivo favorecen o reducen la erosión. Adicionalmente, cada cultivo ofrece diferentes tipos de protección al suelo según el tipo y la densidad de las hojas, su altura, la densidad de cultivos por metro cuadrado, el tipo de raíz, entre otras características.

Esta protección que ofrece cada cultivo ha sido ampliamente detallada en estudios de erosión en parcelas de cultivos.

- *Pastos y charrales:* Este tipo de cobertura es eficaz para prevenir la erosión, esto debido a que amortigua la energía de la lluvia y reduce la salpicadura, proporciona sujeción al suelo, reduce la velocidad de la escorrentía y favorece la evapotranspiración.
- *Bosque:* Los bosques son el mejor tipo de cobertura para el suelo. Tienen una alta tasa de intercepción y en bosques de denso dosel, ofrecen protección contra la energía de la lluvia. Adicionalmente, en su base se genera una

densa capa de materia orgánica que ofrece una segunda barrera de protección contra la caída del agua.

Según (Gómez, 2002), “la velocidad del escurrimiento puede ser reducida a una cuarta parte o incluso menos, por los troncos de los árboles y tallos de los arbustos, por lo que la energía erosiva de la escorrentía se reduce a una dieciseisava parte, respecto a un terreno con suelo desnudo”.

- Actividades antropogénicas: Actividades como la ganadería, el cultivo, el desarrollo urbano, la minería y la deforestación, degradan el suelo, aumentan el volumen de la escorrentía y aceleran el proceso de erosión. Sin embargo, también existen actividades humanas dedicadas a la conservación y a la remediación de los suelos. Entre algunas de las principales prácticas de conservación de los suelos están: el cultivo en terrazas, la rotación de cultivos, las barreras vivas, las prácticas forestales de conservación, la siembra en curvas de nivel y otros, que ayudan a reducir la escorrentía, a mitigar y a prevenir la pérdida del suelo.



### 3.5. Producción de sedimentos por erosión hídrica

El proceso de la producción de sedimentos por erosión hídrica se puede describir mediante cuatro fases fundamentales:

- Primera fase: El periodo sin precipitaciones, se da cuando existe un largo periodo carente de precipitaciones, lo que provoca que la evapotranspiración agote la humedad de las capas más superficiales de suelo.
- Segunda fase: El periodo de inicio de las precipitaciones, se da cuando inician las primeras lluvias y la evapotranspiración se detiene, la vegetación intercepta la mayor parte del agua atmosférica, el agua que logra llegar al suelo se infiltra hasta que supera la capacidad de almacenamiento del suelo y el excedente forma superficies de agua libre.
- Tercera fase: El periodo de precipitación máxima, después de cierta duración de la precipitación, la vegetación deja de interceptar el agua atmosférica. Prácticamente toda el agua llovida alcanza el suelo, la infiltración disminuye y casi la totalidad del agua escurre por las pendientes del terreno de la cuenca. Es este efecto el que provoca los surcos y las cárcavas por efecto del arrastre de la escorrentía.

En esta fase, las gotas de lluvia caen a una velocidad terminal y con cierta energía, la cual le es transferida al suelo al momento de impactar contra la superficie, lo que disgrega el suelo en partículas más finas que son arrastradas en la superficie de agua libre, este proceso se describe en la Figura 3-9.

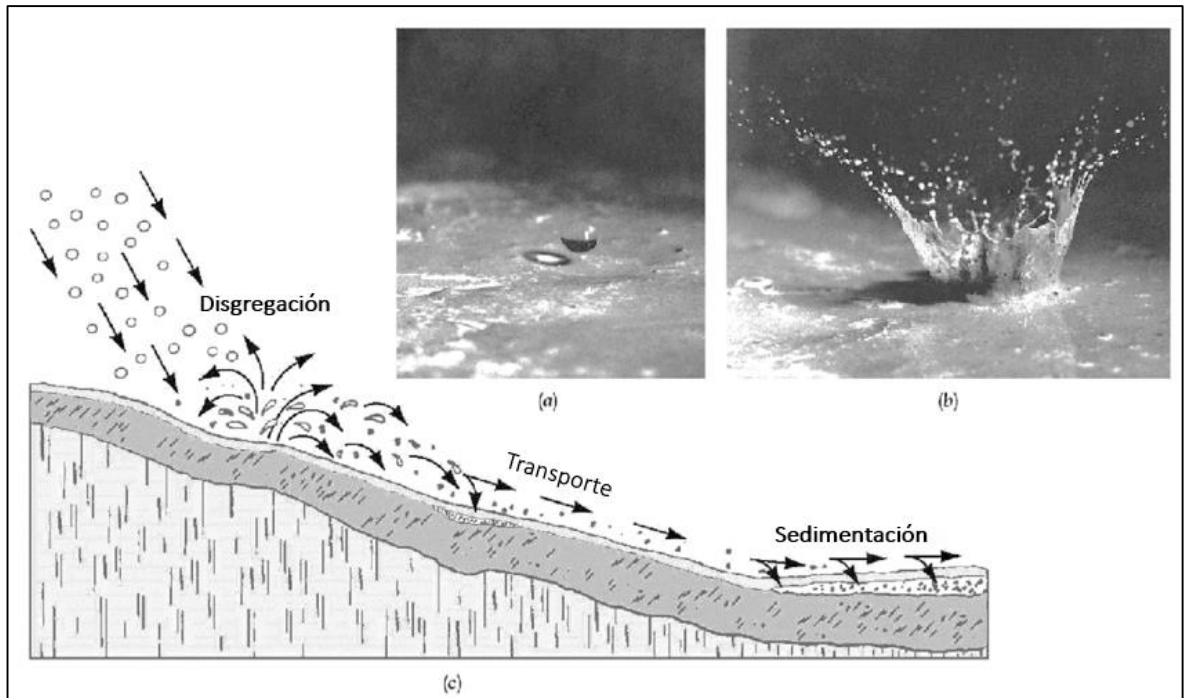


Figura 3-9. (a) Gota de lluvia cayendo a la superficie (b) Gota de lluvia impactando contra la superficie del suelo (c) Proceso de erosión hídrica

Fuente: (Bashir et al., 2018)

Editado: (Matarrita, 2021)

Durante la fase de precipitación máxima, se pueden describir tres zonas críticas que producen el fenómeno de erosión, dichas zonas se pueden ver en la Figura 3-10:

- El cinturón sin erosión: Región de una ladera donde la gota de lluvia disgrega el suelo, pero la lámina de escorrentía no es lo suficientemente gruesa para generar esfuerzos de arrastre que superen la fricción o la cohesión de las partículas de suelo.
- Zona de erosión efectiva: Región donde la lámina de escorrentía arrastra las partículas de suelo, debido a que el esfuerzo de arrastre supera la fuerza de fricción o cohesión de las partículas de suelo.
- Zona de deposición: Región donde los sedimentos suspendidos en la lámina de escorrentía se depositan debido a los cambios de la pendiente, los encharcamientos o la entrada a un cauce.

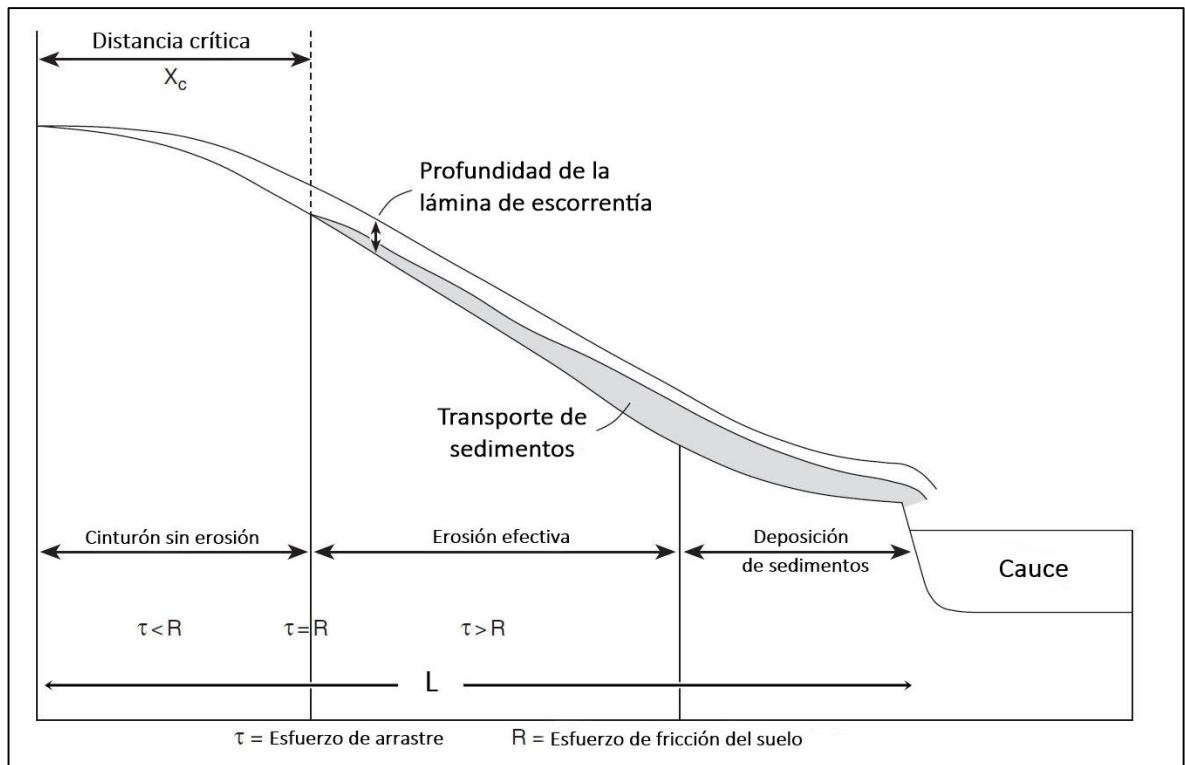


Figura 3-10. Modelo de Horton de escorrentía y arrastre de sedimento

Fuente: (Charlton, 2008)

Editado: (Matarrita, 2021)

- Cuarta fase: El cese de las lluvias, provoca una interrupción casi inmediata de la escorrentía superficial, en esta fase los suelos se encuentran saturados lo que forma concentraciones de agua estancada en depresiones superficiales e inicia nuevamente el fenómeno de la evapotranspiración.

Una cuenca como sistema puede ser subdividido en tres zonas geomorfológicas donde se llevan a cabo los procesos dominantes de la producción de sedimentos, estas son:

- Zona de producción: Se refiere generalmente a las partes altas de una cuenca, donde las pendientes tienden a ser más pronunciadas y por lo tanto, es más propensa a desprendimientos de rocas y movimientos de masas de suelo en zonas aledañas a los cauces, además de esto, la lámina de escorrentía logra alcanzar mayores esfuerzos de arrastre debido a la pendiente, por lo que la mayor cantidad de sedimentos se producen en esta zona.
- Zona de transferencia: Es la zona de la cuenca con las pendientes menos pronunciadas, y donde la producción de sedimento depende de factores como:

- Variaciones en el clima: Las fluctuaciones de las temperaturas estacionales, las tormentas, las sequías que afectan las características climáticas típicas de una región
- Fuerzas tectónicas: Los movimientos divergentes, convergentes y de deslizamiento de una región sujeta al tectonismo de placas, donde se eleva el nivel freático y a largo plazo se pueden cambiar los patrones de escorrentía superficial y de los ríos.
- Actividades antropogénicas: El desarrollo de actividades relacionadas con la ganadería, agricultura, el desarrollo urbano, la minería, el transporte y la deforestación, provocan que se expongan las capas más superficiales del suelo, y así estas se vuelven más propensas a ser erosionadas por agentes erosivos.
- Zona de deposición: Se ubica en las partes bajas de una cuenca, donde debido a las bajas pendientes y a las velocidades, la mayoría del material sedimenta en el fondo del cauce.

En esta región el material de carga de fondo no es arrastrado por la corriente debido a que las velocidades no son suficientes para imprimirle el esfuerzo de arrastre, así como la carga suspendida que, debido a las bajas velocidades, se sedimenta y deja de ser transportada, únicamente permanece la carga de lavado y los sólidos disueltos en el agua.

Debido a la gran cantidad de sedimentos que se precipitan en el fondo del cauce, estas regiones son propensas a desarrollar cauces anastomosados, meandros, playas, barras de sedimentos y dunas.

Las zonas geomorfológicas descritas anteriormente, se ilustran en la siguiente figura:

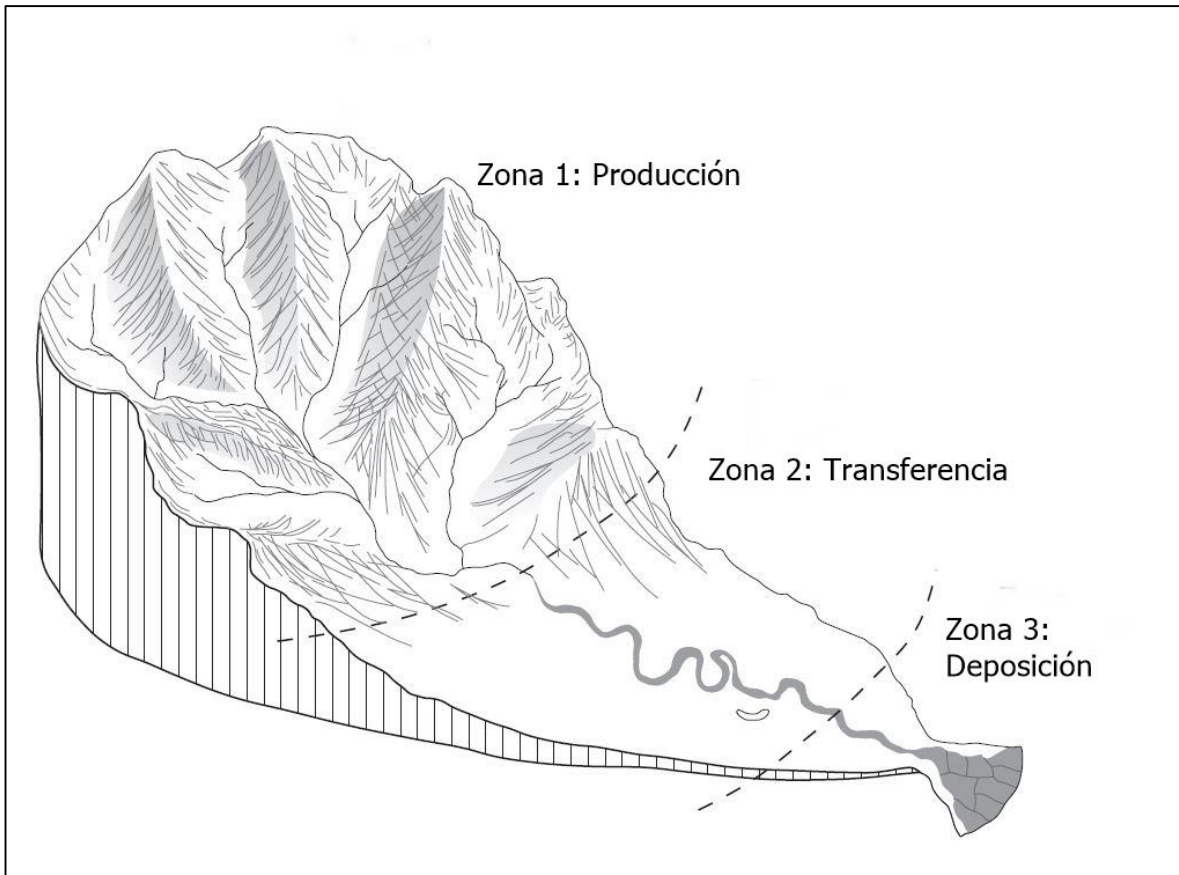


Figura 3-11. Zonas geomorfológicas de producción de sedimentos

Fuente: (Charlton, 2008)

Editado: (Matarrita, 2021)

### 3.6. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE)

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (*USLE* por sus siglas en inglés), surge mediante los estudios realizados por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (*USDA SCS*), actualmente conocido como el Servicio para la Conservación de los Recursos Naturales (*Natural Resources Conservation Service, NRCS*), en 1930.

Posteriormente, Wischmeier, W. H., y Smith, D.D publican un manual para predecir la pérdida de suelo en suelos dedicados a la agricultura para la implementación de prácticas de conservación y para distintos cultivos, sin embargo, no es sino hasta el año 1960 que se considera que el modelo está completo. Dicho modelo estima las pérdidas potenciales anuales de suelo en toneladas métricas por hectárea y año (t/ha/año).

La USLE es un modelo diseñado para predecir la pérdida de suelo a una tasa anual por acción de la erosión hídrica en áreas agrícolas específicas con un determinado cultivo y prácticas de conservación. Aunque según (Wischmeier & Smith, 1978), puede ser aplicado a usos no agrícolas como lo son los sitios de construcción.

Posteriormente, Wischmeier y Smith definen la ecuación universal de pérdida de suelo en su versión revisada (RUSLE). Los principales factores que inciden en este modelo son los expuestos en la sección 3.2.

El modelo RUSLE está descrito por la ecuación:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (3)$$

Donde:

- A: Es la pérdida de suelo por unidad de superficie, medida en toneladas métricas por hectárea  $\left(\frac{t}{ha}\right)$ .
- R: Es el factor de erosividad por precipitación  $\left(\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot h}\right)$ .
- K: Es el factor de erodabilidad por tipo de suelo  $\left(\frac{t \cdot h}{MJ \cdot mm}\right)$ .
- LS: Es el factor de longitud y magnitud de pendiente de ladera (adim).
- C: Es el factor de cobertura y uso del suelo (adim).
- P: Es el factor de conservación de suelo por prácticas de preservación (adim).

### 3.6.1. Factor de erosividad por precipitación R

El factor de erosividad por precipitación es el producto acumulado para el período de interés (normalmente un año), con cierta probabilidad de ocurrencia (normalmente 50% o promedio), de la energía cinética por la máxima intensidad en 30 minutos de las lluvias en  $\left(\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot h}\right)$ .

El índice de erosión ( $E \cdot I_{30}$ ) mide la fuerza erosiva de la lluvia. Se define como el producto de la energía cinética de un evento de precipitación, multiplicado por la máxima intensidad en 30 minutos. La energía cinética de una tormenta se define como:

$$E_c = (0,119) + (0,0873) \cdot \log_{10}(I_m) \quad (4)$$

Siendo:

- $E_c$ : La energía cinética del aguacero en  $\left(\frac{MJ}{ha \cdot mm}\right)$  para el respectivo intervalo y describe la energía de cada milímetro de agua precipitada en ese intervalo.
- $I_m$ : La intensidad de la lluvia en el periodo de análisis en  $\left(\frac{mm}{h}\right)$ .

La ecuación (2) es únicamente válida para intensidades de lluvia, menores o iguales a 76 (mm/h). Para el caso de intensidades iguales o superiores a 76 mm/h, la energía de un milímetro de lluvia se supone con un valor de  $0,283 \left(\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot h}\right)$ .

Luego se debe multiplicar dicha energía cinética por la altura de la lámina de precipitación, para así determinar la energía total de la tormenta:

$$E = \sum E_c \cdot h \quad (5)$$

Donde:

- E: Energía total de la lluvia en  $\left(\frac{MJ}{ha}\right)$ .
- h: Altura de la lámina de precipitación (mm).

Una vez obtenido el valor de la energía total de la tormenta, se debe estimar el lapso de intensidad máxima en 30 min dentro de cada tormenta, tomando como inicio cada intervalo de medición de forma iterativa. Una vez evaluados todos los posibles lapsos de 30 min dentro de una tormenta, se debe conservar la mayor intensidad  $I_{30} \left(\frac{mm}{h}\right)$  estimada.

Posteriormente, se debe estimar el índice  $EI_{30}$  de cada tormenta, dado que el factor R es de plazo anual, deben sumarse todos los valores de la erosividad y luego ponderarse entre el número de años analizados. Esto se obtiene mediante la expresión:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{(E \cdot I_{30})_i}{100}}{n} \quad (6)$$

Siendo:

- R: Factor de erosividad por intensidad de lluvia  $\left(\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot h}\right)$ .
- E: Energía total de la lluvia en  $\left(\frac{MJ}{ha}\right)$ .
- $I_{30}$ : Intensidad máxima registrada durante la tormenta, en un periodo de 30 min en  $\left(\frac{mm}{h}\right)$ .
- m: Número de tormentas analizadas durante un periodo de "n" años.
- n: Número de años de análisis.



Otra manera de estimar el factor de erosión por lluvia, está definido por (Gracia, 1996), mediante la ecuación:

$$R = \frac{[\sum 1,213 + 0,890 \cdot \log_{10}(I_j) \cdot (I_j \cdot T_j)] \cdot I_{30}}{173,6} \quad (7)$$

Donde:

- $R$ : Factor de erosividad por intensidad de lluvia  $\left(\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot h}\right)$ . Para obtener el valor de  $R$  en  $\left(\frac{N}{h}\right)$ , es necesario multiplicar la ecuación (5) por (1,702).
- $I_j$ : Intensidad de la precipitación para un incremento específico seleccionado de intensidad  $\left(\frac{mm}{h}\right)$ . Típicamente se utiliza la intensidad de precipitación en incrementos de 30 min.
- $T_j$ : Período del incremento seleccionado de la tormenta específica (h).
- $I_{30}$ : Intensidad máxima de la tormenta durante 30 min  $\left(\frac{mm}{h}\right)$ .

Se puede estimar el valor de  $R$  para eventos individuales, empleando el criterio de Foster mediante la siguiente ecuación:

$$R_1 = (0,5) \cdot (R) + (0,35) \cdot (V_u) \cdot (\sigma_{pu})^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

Donde:

- $R_1$ : Factor de erosividad por intensidad de lluvia  $\left(\frac{N}{h}\right)$ .
- $R$ : Factor ( $EI_{30}$ ) de la tormenta en  $\left(\frac{N}{h}\right)$  (ec. 4).
- $V_u$ : Volumen de escurrimiento (mm).
- $\sigma_{pu}$ : Caudal pico de escorrentía  $\left(\frac{mm}{h}\right)$ .

## Mapas de isoerodentas

Los mapas de isoerodentas son líneas de igual valor de factor  $R$ . Son el resultado de distribuir espacialmente los valores de erosividad sobre un área a partir de puntos donde se tiene medición de la precipitación y, por lo tanto, se pueden definir los valores de la intensidad.

Las isoerodentas son la mejor opción para definir el valor de  $R$  cuando no se tenga la medición de la precipitación en el área de análisis.

(Wischmeier & Smith, 1965) fueron los primeros en determinar esta metodología para el este de los Estados Unidos. Establecieron que si se cuenta con una red de medición meteorológica bien distribuida sobre la región de análisis, los resultados pueden llegar a tener una baja dispersión respecto a los valores de mediciones puntuales.

En la Figura 3-12 se presenta un mapa de isoerodentas para Costa Rica creado por (Vahrson, 1990).

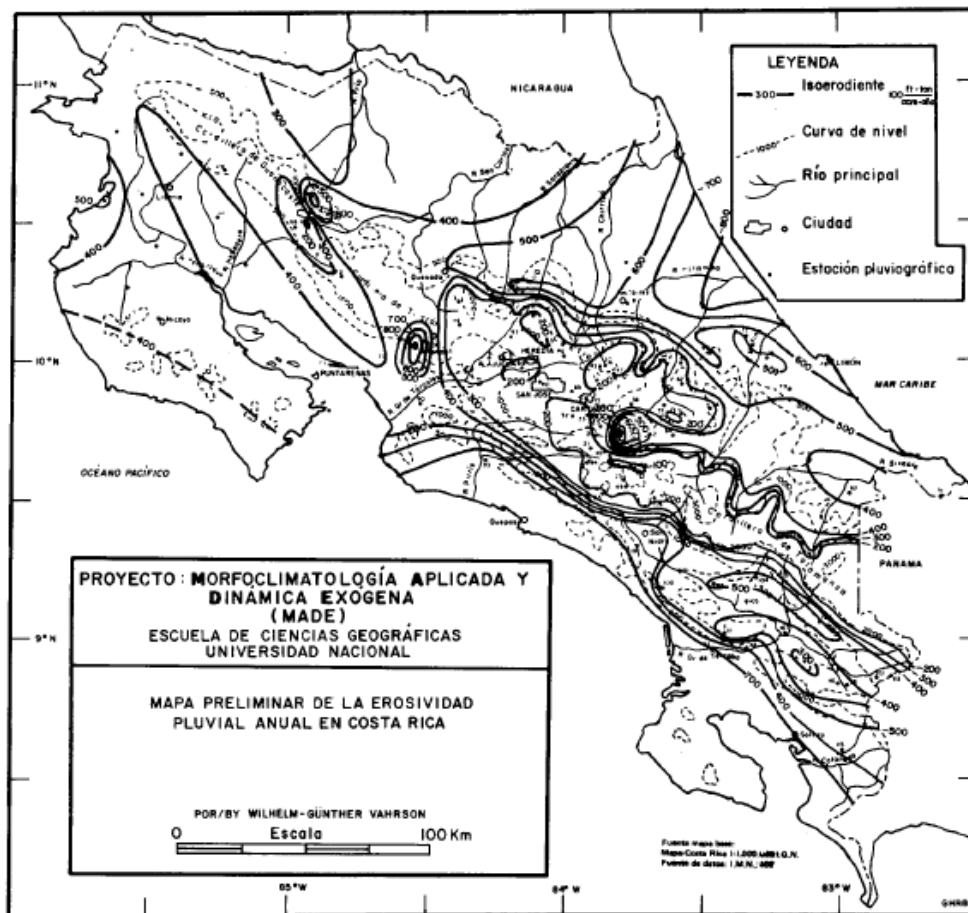


Figura 3-12. Mapa de isoerodentas de Costa Rica  
Fuente: (Vahrson, 1990)

### 3.6.2 Factor de erodabilidad por tipo de Suelo *K*

La erodabilidad del suelo describe la vulnerabilidad de este a erosionarse por unidad del factor de la erosividad de la lluvia en  $\left(\frac{t \cdot h}{MJ \cdot mm}\right)$ . Se determinó experimentalmente mediante la utilización de parcelas de producción de sedimento.

El factor *K* depende de las características de la granulometría y de la cantidad de materia orgánica intrínsecas del suelo. Se describe mediante la ecuación:

$$K = 10^{-7} \cdot 2,8 \cdot M^{1,14} \cdot (12 - O.M) + 4,3 \times 10^{-3} \cdot (s - 2) + 3,3 \times 10^{-3} \cdot (p - 3) \quad (9)$$

Donde:

- *K*: Factor de la erodabilidad del suelo  $\left(\frac{t \cdot h}{MJ \cdot mm}\right)$ .
- *O.M*: Contenido de materia orgánica en porcentaje (%).
- *s*: Estructura del suelo (*s*=1: granular muy fino, *s*=2: granular fina, *s*=3: granular medianamente grueso, *s*=4: granular grueso o en bloques).







Código USLE	Tipo de estructura	
1	Granular muy fina	
2	Granular fina	
3	Granular media a gruesa	
4	Bloques	
	Laminar	
	Masiva	

Figura 3-13. Códigos de estructura de suelo de USLE  
Fuente: (Mancilla, 2008)

- $p$ : Permeabilidad del suelo ( $p=1$ : rápida,  $p=2$ : moderada a rápida,  $p=3$ : moderada,  $p=4$ : moderada a lenta,  $p=5$ : lenta,  $p=6$ : muy lenta).

Cuadro 3-1. Códigos USLE de la permeabilidad del suelo

Código USLE	Categoría de permeabilidad	Clase de textura del suelo	SCS Grupo hidrológico del suelo
1	Rápida (mayor que 60 mm/h)	Arena	A
2	Moderada a rápida (10 a 60 mm/h)	Areno franco, franco arenoso	A
3	Moderada (entre 5 y 10 mm/h)	Franco limoso, franco	B
4	Moderada a lenta (entre 2 y 5 mm/h)	Franco arcillo arenoso, franco arcilloso	C
5	Lenta (entre 1 y 2 mm/h)	Arcillo arenoso, franco arcillo limoso	C - D
6	Muy lenta (menor que 1 mm/h)	Arcilla, franco arcilloso	D

Fuente: (Morales Ascarrunz, 2014)

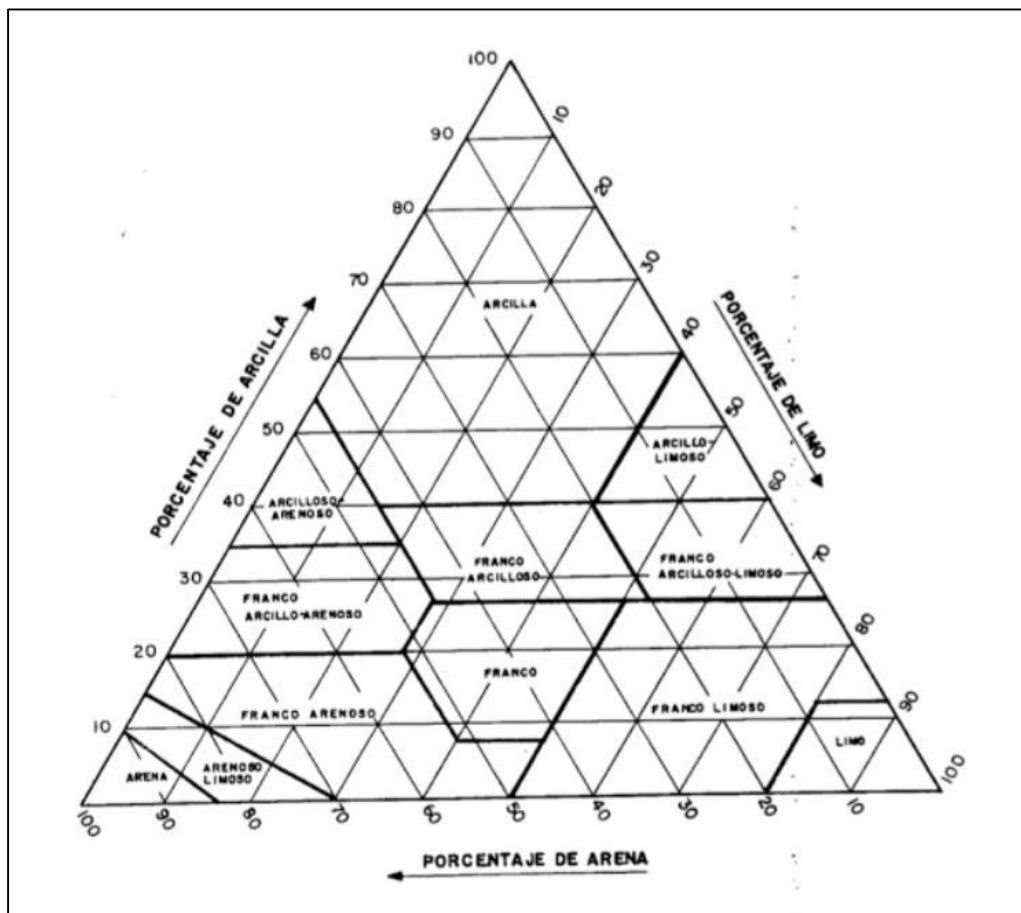


Figura 3-14. Triángulo de textura de suelo  
Fuente: (United States Department of Agriculture, 1993)

- $M$ : Factor de textura de suelo, definido por:

$$M = (m_{silt} + m_{vfs}) \cdot (100 - m_c) \quad (10)$$

Siendo:

- $m_c$ : contenido de arcilla (<0,002 mm) en porcentaje (%).
- $m_{silt}$ : contenido de limos (0,002 – 0.005 mm) en porcentaje (%).
- $m_{vfs}$ : contenido de arenas finas (0,05 – 0,1 mm) en porcentaje (%).

En el Cuadro 3-2 se muestran los valores promedio de  $K$  para los distintos tipos de orden de suelo.

Cuadro 3-2. Valores de  $K$  según su clasificación de suborden

Orden de suelo	Valor $K \left( \frac{t \cdot h}{MJ \cdot mm} \right)$
<i>Eutrocept</i>	0,016
<i>Vitrandept</i>	0,009
<i>Ustepts</i>	0,014
<i>Hydrandept</i>	0,011
<i>Dystrandeps</i>	0,019
<i>Haplustult</i>	0,010
<i>Ustults</i>	0,016
<i>Haplustalf</i>	0,018
<i>Udands</i>	0,023
<i>Lithic y Typic Usthorthent</i>	0,017
<i>Ortoxic y Typic Tropohumult</i>	0,014
<i>Typic Humitrocept</i>	0,017
<i>Ustoxic Dystrocept</i>	0,016
<i>Typic Troporthent</i>	0,017
<i>Typic Ustifluvents</i>	0,025
<i>Typic Ustrocept</i>	0,020
<i>Ustic Humitrocept</i>	0,017

Fuente: (FAO, 1989)

En el Apéndice B, se hace una descripción de las características de los subórdenes de suelo.

### 3.6.3. Factor de longitud y magnitud de pendiente *LS*

El factor *L* (que describe la longitud de recorrido de la escorrentía) y el factor *S* (que describe la pendiente del terreno) pueden ser determinados por separado, sin embargo, al estar estos directamente relacionados se acostumbra determinarlos como un solo factor *LS*.

La longitud de la erosión ("*L*" en la Figura 3-10) se define como la distancia desde el punto de origen del flujo (inicio del cinturón sin erosión) hasta el punto donde disminuyen las pendientes y se da la sedimentación (fin de la zona de deposición) o donde la escorrentía entra a un cauce definido.

La pendiente es la que tenga dicha longitud de erosión "*L*" o la pendiente del terreno y se expresa en porcentaje (%).

El término *LS* se define como:

$$LS = \left[ \frac{\lambda}{22,13} \right]^m \cdot (0,065 + (0,045 \cdot S) + (0,0065 \cdot S^2)) \quad (11)$$

Donde:

- *S*: Pendiente en porcentaje (%).
- $\lambda$ : Longitud del tramo de pendiente *S* en metros (m).
- *m*: Constante que depende del terreno y se determina como:
  - $m = 0,5$  si  $S \geq 5\%$ .
  - $m = 0,4$  si  $5\% < S < 3\%$ .
  - $m = 0,3$  si  $3\% \leq S \leq 1\%$ .
  - $m = 0,2$  si  $S < 1\%$ .

### Cálculo de *LS* en pendientes compuestas

Las laderas no son unidades topográficas de pendiente constante, por lo que para modelar de manera más exacta el efecto de los cambios de pendiente, se pueden modelar como laderas de pendiente compuesta.

Al dividir la ladera en tramos de igual pendiente, se puede lograr una mejor representación de los factores topográficos en la producción de los sedimentos, lo que permite incorporar los cálculos de la *RUSLE* en laderas complejas y de pendiente no homogénea.

Para poder determinar el factor *LS* en laderas compuestas se toman dos supuestos fundamentales:

1. Los cambios en la pendiente no son suficientes para implicar la deposición de los sedimentos.
2. La ladera puede ser dividida en segmentos pequeños de igual longitud y de un grado de pendiente interna uniforme.

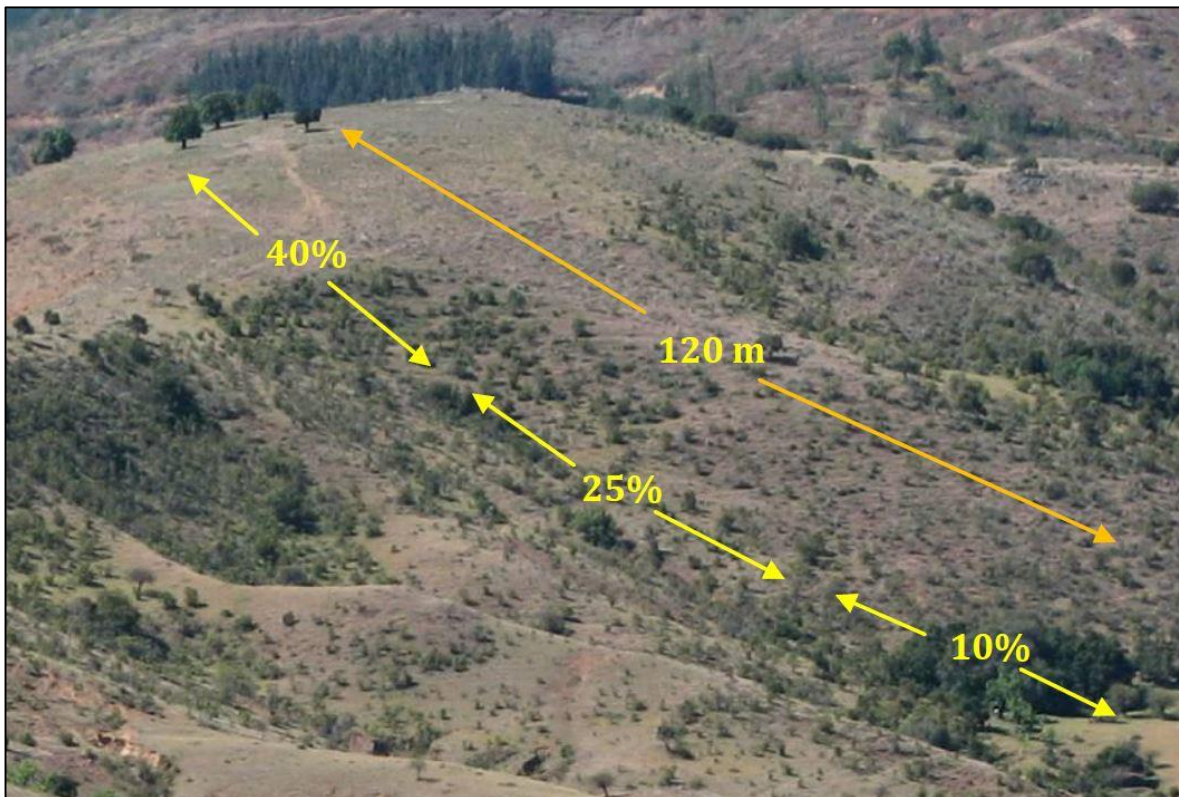


Figura 3-15. Ladera compuesta dividida en tres tramos  
Fuente: (Mancilla, 2008)

En laderas donde no se pueda determinar el factor LS por medio de las laderas compuestas debido a la falta de información topográfica detallada, (Arnoldus, 1977) propone las siguientes simplificaciones del factor LS mediante la utilización de los valores de pendiente media:

$$LS = \begin{cases} \lambda^{0,5} \cdot (0,0138 + 0,00965 \cdot s + 0,0043 \cdot s^2) ; \text{para } s < 20\% \text{ y } L < 350m & (12) \\ \left[ \frac{\lambda}{22,1} \right]^{0,6} \cdot \left[ \frac{s}{9} \right]^{1,4} ; \text{para } s \geq 20\% & (13) \end{cases}$$

Posteriormente, (Wischmeier, 1982) determinó las siguientes ecuaciones para establecer el factor LS a partir de la pendiente media de la ladera:

$$LS = \begin{cases} \left[ \frac{\lambda}{22,1} \right]^{0,3} \cdot \left[ \frac{0,43 + 0,30 \cdot s + 0,0043 \cdot s^2}{6,613} \right] ; \text{para } s < 9\% & (14) \\ \left[ \frac{\lambda}{22,1} \right]^{0,3} \cdot \left[ \frac{s}{9} \right]^{1,3} ; \text{para } s \geq 9\% & (15) \end{cases}$$

Donde:

- s: Pendiente media de la ladera en porcentaje (%).
- λ: Longitud del tramo de pendiente S en metros (m).



### 3.6.4. Factor de protección por cobertura y uso del suelo C

Es el factor que toma en consideración el efecto de la cobertura sobre el suelo, la masa radicular, los residuos vegetales y la rugosidad superficial en la erosión hídrica del suelo.

Representa la protección que la cobertura vegetal le ofrece al suelo y que, por lo tanto, reduce el volumen potencial de sedimentos por la erosión hídrica que se puede producir en una determinada región. El factor de cobertura toma en consideración los siguientes efectos en la disminución de la erosión:

- Cobertura sobre el terreno: La vegetación que se encuentra sobre la superficie ayuda a interceptar y disipar la energía cinética de las gotas de lluvia. El agua interceptada por la vegetación sobre el terreno llega al suelo fluyendo sobre el tallo de la planta o el tronco en el caso de árboles (flujo fustal) o por goteo desde el dosel. El flujo fustal no genera surcos ni cárcavas, por lo que no produce erosión, mientras que el flujo por goteo, sí se genera desde doseles de gran altura (aproximadamente 14 m o superior), las gotas formadas pueden alcanzar la misma energía y la velocidad terminal que las de una gota sin intercepción, lo que podría generar erosión. En las cuencas forestales, los residuos vegetales absorben dicha energía lo que previene que se genere la erosión.
- Cobertura superficial: La vegetación de menor tamaño, que se encuentra cerca de la superficie ayuda a disipar la energía cinética de la lluvia, pero además de esto aumenta la rugosidad del terreno, se disminuye así la velocidad de la escorrentía y, por lo tanto, se reduce la capacidad de transporte del sedimento.
- Masa subsuperficial: el efecto subsuperficial toma en consideración la masa radicular (tanto viva como residual), la consolidación, la compactación, el grado de alteración por uso previo y la humedad antecedente en el suelo para la estimación de la erosión. Estos factores suelen ser los más complejos de cuantificar.

Los valores del factor C se definen como la relación entre la pérdida de suelo que se produce bajo una determinada cobertura, respecto a las pérdidas de suelo generadas con cobertura de barbecho continuo.

Los valores del factor de cobertura son determinados de manera empírica en su mayoría mediante observaciones y mediciones en parcelas experimentales. Los valores de C para diferentes tipos de cobertura se presentan en el Cuadro 3-3.

Cuadro 3-3. Valores de C según la cobertura del suelo

<b>Tipo de cobertura</b>	<b>Factor C (adimensional)</b>
<i>Bosque</i>	
Bosque Primario	0,0001
Bosque Natural	0,003
Selva Virgen	0,001
Bosque Denso	0,003 – 0,010
Bosque Claro, Subestrato Herbáceo Denso	0,003 – 0,010
Bosque Claro, Subestrato Herbáceo Degradado	0,010 – 0,100
Bosque Secundario	0,007
Charral, Pasto	0,018
Charral	0,012
Bosque Degradado	0,037
<i>Matorral/Pastos</i>	
Matorral Denso	0,003 – 0,030
Matorral Claro, Subestrato Herbáceo Denso	0,003 – 0,030
Matorral Claro, Subestrato Herbáceo Degradado	0,030 – 0,100
Páramo	0,003 – 0,040
Pasto	0,013
Pasto (Natural o Mejorado)	0,008
Vegetación Natural Baja (altura ≤ 50 cm)	0,012
Pastizal Natural Completo	0,030 – 0,010
Pastizal Natural Pastoreado	0,040 – 0,200
Pastizal Cultivado (Manejado)	0,003 – 0,040
Pasto de Corta	0,012
Potrero	0,013
Potrero Carga Normal	0,002

Tipo de cobertura	Factor C (adimensional)
<i>Matorral/Pastos</i>	
Potrero Degradado	0,002
Potrero Muy Degradado	0,016
<i>Cultivos Permanentes</i>	
Café	0,09
Pejibaye	0,300
Banano	0,062
Cacao	0,05
Cultivos Permanentes Densos	0,010 – 0,300
Cultivos Permanentes No Densos	0,100 – 0,450
Huertos de Subsistencia	0,300 – 0,900
Árboles Frutales	0,003
<i>Cultivos Anuales</i>	
Caña, Caña Brava	0,050
Cultivos Anuales	0,495
Tubérculos	0,615
Maíz	0,519
Tomate/Chile Dulce	0,502
Cultivos Anuales de Ciclo Corto (1-6 Meses)	0,300 – 0,800
Cultivos Anuales de Ciclo Largo (>6 Meses)	0,400 – 0,900
Cultivos (Cobertura Baja)	0,650
Cultivos (Cobertura Media)	0,500
Cultivos (Cobertura Alta)	0,400
<i>Otros Tipos de Cobertura</i>	
Ciénagas	0,0
Zonas Quemadas	1,0
Suelo Desnudo	1,0
Lámina de Agua	0,0
Zonas Industriales o Comerciales	0,006
Zonas Urbana Continuas	0,005

Fuente: (Lianes et al., 2009)

Editado: (Matarrita, 2021)

## Cálculo de C por el método de los subfactores

Una alternativa para la determinación del factor de cobertura, es el método de los subfactores. Dicho método fue propuesto inicialmente por Wischmeier (1975) y posteriormente revisado por (Dissmeyer & Foster, 1984). Permite una evaluación más detallada de los efectos de la cobertura mediante los siguientes subfactores:

- Proporción del suelo desnudo ( $C_{ns}$ ).

La cobertura vegetal, los residuos vegetales y las rocas proporcionan cobertura al suelo contra la acción erosiva de la lluvia, al mismo tiempo que aumentan la rugosidad del suelo, reduciendo así la escorrentía.

La erosión siempre se verá disminuida de acuerdo con la cantidad de cobertura que posea el suelo, respecto a uno que se encuentre completamente desnudo. En terrenos donde la cobertura es de bosque, pueden darse zonas sin cobertura, las cuales corresponden a áreas sin conexión.

- Cubierta del dosel ( $C_{cc}$ ).

Este subfactor toma en consideración el efecto que tiene el dosel de las cubiertas vegetales en disipar la energía cinética de la lluvia. El agua puede ser interceptada por la vegetación o alcanzar la superficie por flujo fustal o goteo. Este goteo puede llegar a ser más erosivo que la precipitación libre ya que las gotas que se generan en las hojas pueden ser de mayor tamaño que las de lluvia, por lo que su velocidad terminal será mayor y, como consecuencia, también lo será su energía cinética.

El subfactor de cubierta de dosel solo debe aplicarse a los sitios con suelo desnudo bajo la cubierta de dosel, ya que en las partes que poseen residuos vegetales se aplica el subfactor  $C_{ns}$ .

El subfactor  $C_{cc}$  se encuentra detallado en el siguiente cuadro:

Cuadro 3-4. Valores de  $C_{cc}$  según la altura de dosel y el porcentaje de suelo desnudo

Altura del dosel (m)	Porcentaje de suelo desnudo cubierto por algún dosel (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0,5	1,00	0,91	0,83	0,74	0,66	0,58	0,49	0,41	0,32	0,24	0,16
1,0	1,00	0,93	0,86	0,79	0,72	0,65	0,58	0,51	0,44	0,37	0,30
2,0	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
4,0	1,00	0,97	0,95	0,92	0,90	0,87	0,84	0,82	0,79	0,76	0,74
6,0	1,00	0,98	0,97	0,96	0,94	0,93	0,92	0,90	0,89	0,87	0,85
8,0	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92
16,0	1,00	1,00	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96
20,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Fuente: (Mancilla, 2008)

– Reconsolidación del suelo ( $C_{sc}$ ).

Un suelo que ha sido alterado tiende a disminuir su erodabilidad con el tiempo, por efecto de la reconsolidación. Según (Dissmeyer & Foster, 1984) la máxima reducción en la erodabilidad de un suelo por efecto de la reconsolidación es de 45% para un periodo de siete años sin alteración. Es por esto que se estima 0,45 como valor mínimo de  $C_{sc}$ .

– Alto contenido orgánico ( $C_{oc}$ ).

Este subfactor se utiliza para corregir el sesgo del factor K en los casos donde el porcentaje de materia orgánica sea mayor a 4%. El subfactor  $C_{oc}$  tiene un valor de 0,7 únicamente cuando el contenido de materia orgánica sea mayor a 4% y el perfil donde se concentre esta materia orgánica se encuentre a una profundidad de 2,5 cm. De no cumplirse estos supuestos, el valor de  $C_{oc}$  es 1.

– Raíces finas ( $C_{fr}$ ).

Este subfactor representa el efecto en la reducción de la erosión que tienen las raíces finas en el suelo, particularmente en los primeros 5 cm de profundidad. Esto se debe a que la masa radicular en el suelo (tanto viva como residual) ayuda a mantener el suelo en su lugar, promoviendo la infiltración y como consecuencia, se reduce la escorrentía.

Para la estimación de este factor se deben realizar observaciones en una parcela de control, si por acción antropogénica los primeros centímetros de suelo han sido removidos, el subfactor toma un valor de 1.

- Efecto de enlace residual ( $C_{ri}$ ).

Cuando se evalúa el potencial de erosión de un suelo que ha sufrido un cambio de uso de la tierra, la historia previa del sitio tiene efectos en la erodabilidad del suelo. Si el suelo se encontraba previamente cubierto de vegetación, su susceptibilidad a la erosión será menor una vez dado el cambio de uso de la tierra, pero irá aumentando progresivamente con el tiempo debido a la pérdida progresiva de las raíces y la materia orgánica remanentes.

- Almacenamiento in-situ ( $C_{ss}$ ).

El subfactor  $C_{ss}$  pretende evaluar el volumen de los sedimentos que se genera por la erosión, pero que queda retenido en los encharcamientos, las depresiones o los obstáculos presentes en las laderas. Para evaluar este almacenamiento de sedimentos, es necesario determinar con alta precisión, las depresiones y los obstáculos presentes en una ladera en análisis. Algunos valores de referencia, para las laderas con características homogéneas espacialmente, están dados en el siguiente cuadro:

Cuadro 3-5. Valores de  $C_{ss}$  según las características de ladera

Característica	Valor de $C_{ss}$
Laderas sin depresiones, planas en la superficie	1,0
Almacenamiento entre agregados de suelo de 2,5 cm de diámetro.	0,9
Almacenamiento entre agregados de suelo de 5,0 cm de diámetro.	0,8
Almacenamiento entre agregados de suelo de 10,0 cm de diámetro.	0,7
Almacenamiento entre agregados de suelo de 15,0 cm de diámetro.	0,5
Almacenamiento en huellas de tractor ubicadas en contra de la pendiente principal.	0,8
Almacenamiento en represas creadas por residuos vegetales, troncos o ramas, ubicados en contra de la pendiente principal.	0,8
Almacenamiento en sectores arados o excavados en contra de la pendiente principal, con poco suelo desnudo y más hojarasca, hendiduras de 15,0 cm.	0 – 0,2
Almacenamiento en sectores arados o trabajados con hendiduras de 2,5 cm, en contra de la pendiente principal, con suelo desnudo en áreas entre hendiduras.	0,8
Almacenamiento en sectores arados a favor de la pendiente principal.	0,9

Fuente: (Dissmeyer & Foster, 1984).

- Secuencia de saltos en el terreno ( $C_{hs}$ ).

Los saltos en las laderas corresponden a estructuras tipo grada que se forman en el terreno por la acumulación de las partículas de suelo con las rocas, los residuos vegetales, los obstáculos naturales del terreno, los desechos humanos, entre otros.

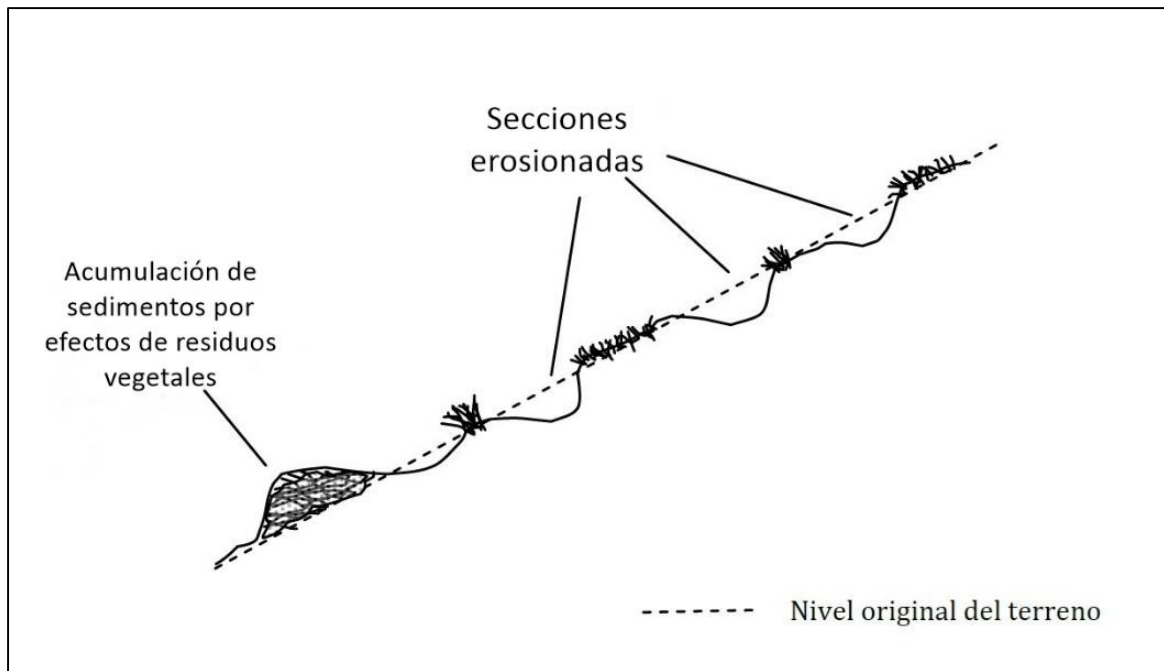


Figura 3-16. Secuencia de saltos en una ladera  
Fuente: (Mancilla, 2008)

Estas gradas generan cambios en la pendiente natural de la ladera, y se consideran no homogéneas espacialmente, sino que están distribuidos al azar. Para determinar el aporte del subfactor  $C_{hs}$ , se debe modelar la ladera como un sistema de ladera compuesta, tomando valores de  $C$  para cada segmento. Se pueden tomar valores de referencia para el subfactor de secuencia de saltos del Cuadro 3-6:



Cuadro 3-6. Valores de  $C_{hs}$  según la pendiente

Pendiente (%)	Porcentaje de la ladera con estructuras de saltos (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
5	1,00	0,99	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,92
6	1,00	0,97	0,94	0,92	0,89	0,86	0,84	0,81	0,78	0,76	0,73
7	1,00	0,96	0,92	0,88	0,84	0,80	0,75	0,71	0,67	0,63	0,59
8	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,69	0,64	0,59	0,54	0,49
9	1,00	0,94	0,89	0,83	0,77	0,71	0,65	0,60	0,54	0,48	0,42
10	1,00	0,94	0,87	0,81	0,75	0,68	0,62	0,56	0,49	0,43	0,36
12	1,00	0,93	0,85	0,78	0,71	0,63	0,56	0,49	0,42	0,34	0,27
15	1,00	0,92	0,84	0,75	0,67	0,59	0,51	0,43	0,34	0,26	0,18
20	1,00	0,91	0,82	0,74	0,65	0,56	0,47	0,38	0,29	0,20	0,11
≥ 30	1,00	0,91	0,81	0,72	0,63	0,53	0,44	0,35	0,25	0,15	0,06

Fuente: (Dissmeyer & Foster, 1984).

– Labranza en contorno ( $C_{ct}$ )

El cultivar siguiendo las curvas de nivel del terreno, reduce la escorrentía superficial y, por lo tanto, disminuyendo la erosión.

Si se desea analizar la producción de los sedimentos en los cultivos siguiendo las curvas de nivel, lo recomendable es analizar su efecto en el factor  $P$  de la USLE (que se detalla más adelante), sin embargo, cuando el labrado es angulado respecto a las curvas de nivel, el efecto sobre la escorrentía cambia y por lo tanto es necesario considerarlo de manera distinta.

El subfactor  $C_{ct}$  pretende evaluar el efecto sobre la erosión de los cultivos que presentan desviación respecto a la curva de nivel del terreno.

En el Cuadro 3-7 se muestran los valores del subfactor de labranza en contorno para distintos valores de desviación:

Cuadro 3-7. Valores de  $C_{ct}$  según la pendiente

Pendiente (%)	Siguiendo la curva de nivel	Grados de desviación respecto a la curva de nivel				
		15	30	45	60	90
0 – 2	0,80	0,88	0,91	0,94	0,96	1,00
3 – 7	0,70	0,82	0,87	0,91	0,94	1,00
8 – 12	0,80	0,88	0,91	0,94	0,96	1,00
13 – 18	0,90	0,94	0,96	0,97	0,98	1,00
≥19	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Fuente: (Dissmeyer & Foster, 1984).

Por lo tanto, el factor  $C$  definido mediante el método de los subfactores está dado por:

$$C = C_{ns} \cdot C_{cc} \cdot C_{sc} \cdot C_{oc} \cdot C_{fr} \cdot C_{rl} \cdot C_{ss} \cdot C_{hs} \cdot C_{ct} \quad (16)$$

### 3.6.5. Factor de prácticas de conservación de suelo *P*

Es el factor que toma en consideración las prácticas de conservación para evitar las pérdidas de suelo. El factor *P* depende de manera directa de la pendiente del terreno, tal y como se muestra en el Cuadro 3-8 que contiene los valores de *P* para las distintas prácticas de conservación:

Cuadro 3-8. Valores de *P* según la pendiente y la práctica de conservación

Pendiente (%)	Cultivo en curvas de nivel	Cultivo en fajas	Cultivo en terrazas	
			a	b
1 – 2	0,60	0,30	0,12	0,05
3 – 8	0,50	0,25	0,10	0,05
9 – 12	0,60	0,30	0,12	0,05
13 – 16	0,70	0,35	0,14	0,05
17 – 20	0,80	0,40	0,16	0,06
21 – $\geq$ 25	0,90	0,45	0,18	0,06

a: terrazas de desagüe encespadas.

b: terrazas de infiltración con contrapendiente.

Fuente: (Ministerio de Medioambiente de España, 1998).

Las terrazas son de los métodos más eficientes en el proceso de la conservación del suelo y la reducción de la escorrentía. Se pueden utilizar para transformar las pendientes pronunciadas de un terreno a otras que sean relativamente planas, así el efecto del factor *LS* se reduce y, como consecuencia, la producción de los sedimentos.

En la siguiente figura, se muestra un esquema de la conformación de las terrazas como práctica de la conservación de suelos.

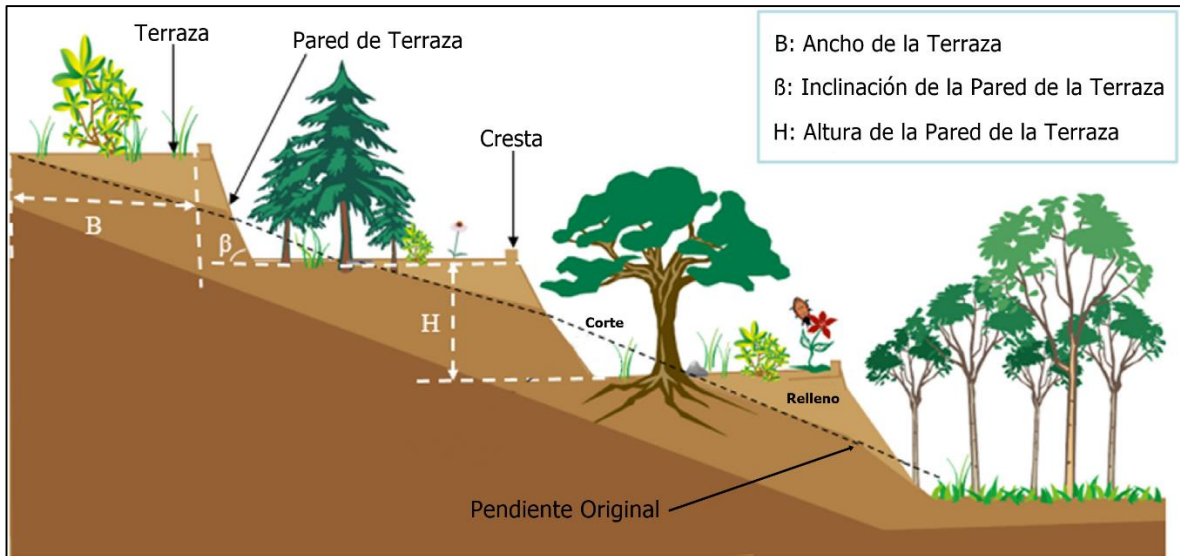


Figura 3-17. Diagrama de la conformación de terrazas

Fuente: (Deng et al., 2021)

Editado: (Matarrita, 2021)

Los terrenos sometidos a prácticas de terraceo alteran el flujo de la escorrentía, reducen la conectividad hidrológica, favorecen los procesos de intercepción de la lluvia, amortiguan los hidrogramas de la escorrentía en las laderas, favorecen la infiltración y la retención de nutrientes, lo que amortigua a su vez sobre los hidrogramas de crecienta en la red de drenaje.

En la Figura 3-18 se muestra el efecto que tienen las terrazas sobre la escorrentía, favorecen los procesos del ciclo hidrológico como lo son: la evapotranspiración y la infiltración, reduciendo así la escorrentía y el potencial de erosión.

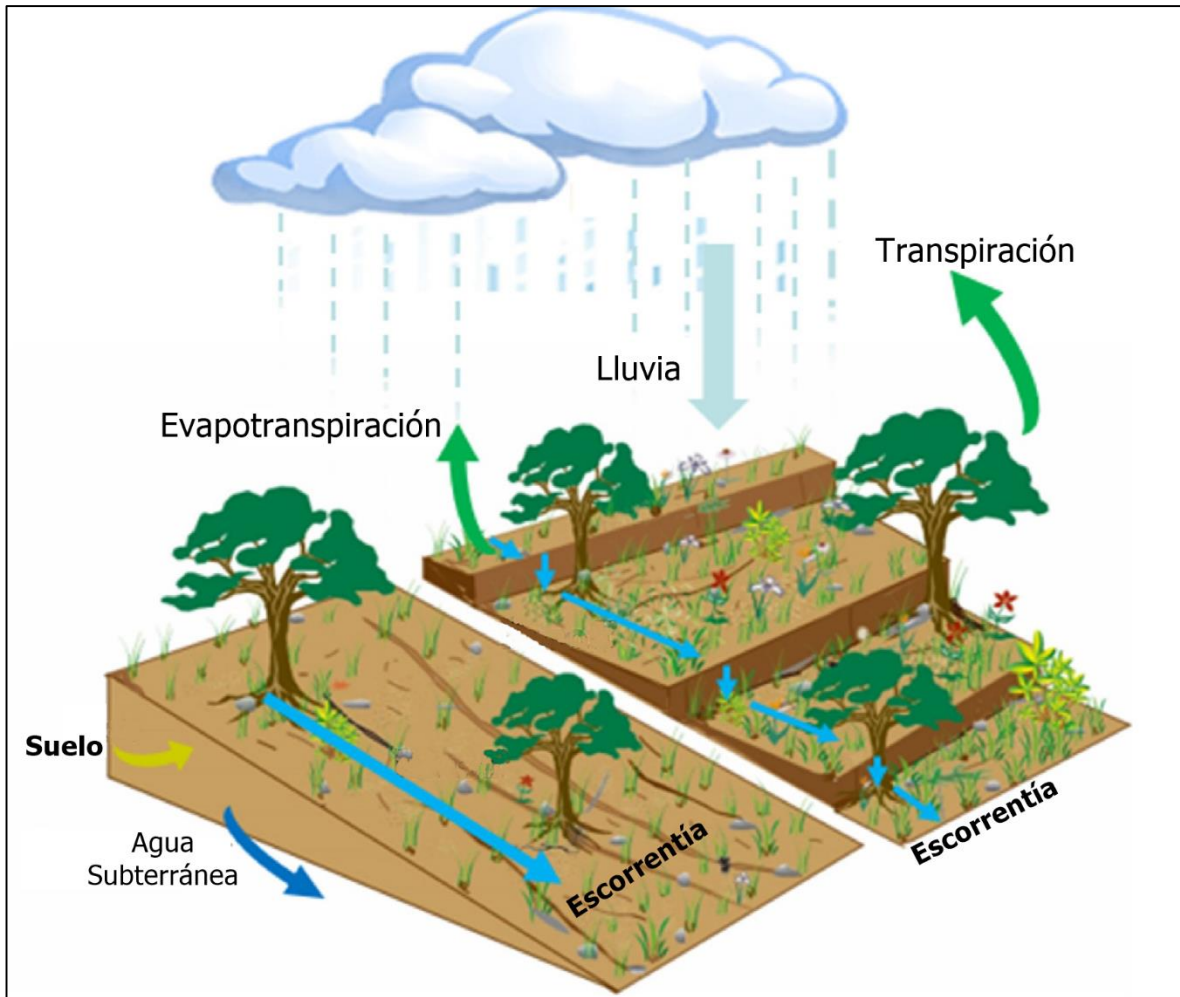


Figura 3-18. Efecto de las terrazas sobre el ciclo hidrológico

Fuente: (Deng et al., 2021)

Editado: (Matarrita, 2021)

Otro efecto favorable que tienen las terrazas, es que fomentan la recarga de los mantos acuíferos. Esto se debe a que la escorrentía que es retenida en las terrazas, viaja hasta los mantos acuíferos, ya que se promueven los procesos de infiltración y percolación.

Por su parte, el cultivo en curvas de nivel es un método de conservación de suelos y reducción de escorrentía en pendientes suaves a medias. Se define como la práctica de labrar, plantar o aplicar cualquier tipo de operación agraria, siguiendo una línea de misma elevación sobre la ladera de un terreno.

El cultivo en curvas de nivel se pueden implementar elementos que se conocen popularmente como terracetas, las cuales son estructuras tipo berma compuestas de materia orgánica como hojas y ramas, lo que promueve los encharcamientos y a su vez reduce la

velocidad de la escorrentía y en consecuencia la erosión. Adicionalmente, favorece la infiltración y la retención de nutrientes como el nitrógeno y fósforo, lo que da como resultado, mejores rendimientos de las cosechas.

Según (Shahvarooghi et al., 2016) esta práctica tiene su mejor rendimiento en pendientes de entre 2% y 10%, sin embargo, según el Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (NRCS) de los Estados Unidos, es recomendable aún para terrenos con pendientes más pronunciadas ya que ayuda a prevenir la aparición de surcos y cárcavas. En el caso de Costa Rica, esta práctica se da de manera extensiva en la cuenca del río Jesús María.

El Programa de Evaluación de Tecnologías Sostenibles de Canadá (*STEP* por sus siglas en inglés) detalla otros métodos de control de la erosión, que pueden ser utilizados en terrenos naturales, agrícolas o de construcción. Estas técnicas requieren de métodos constructivos básicos, por lo que en su mayoría la implementación es sencilla y de bajo costo.

En el siguiente cuadro se detallan las técnicas de control de la erosión, así como su correspondiente valor del factor  $P$  y su eficiencia de atrape de sedimentos. En la sección del Apéndice C. se muestran las ilustraciones de cada una de las técnicas

Cuadro 3-9. Valores de Factor P para las Técnicas de Conservación de Suelos Según STEP

<b>Técnicas de Control de la Erosión</b>	<b>Eficiencia de Atrape de Sedimentos</b>	<b>Factor P</b>
Berma Filtrante de Compost	0,88	0,16
Presa Filtrante	0,80	0,20
Media Filtrante de Compost	0,92	0,08
Barreras de Sedimento para Tragantes	0,70	0,3
Rollos de Zarzo o Fibra	0,60	0,4
Berma Filtrante de Roca	0,95	0,05
Barrera de Bolsas de Arena	0,65	0,35
Estanque Sedimentador	0,65	0,35
Trampas de Sedimento	0,65	0,35
Barreras de Finos	0,75	0,25
Barrera de Paca de Heno	0,75	0,25

Fuente: (Sustainable Technologies Evaluation Program, 2015)

### 3.7. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE)

La USLE en su versión modificada, fue desarrollada por (Williams, 1975) para determinar el volumen de sedimentos de eventos individuales, reemplazando el factor de energía de la lluvia por un factor dependiente de la escorrentía que representa la energía usada en la separación y el transporte del sedimento.

Según (Neitsch, *et al.* 2005), "La predicción de producción del sedimento se mejora porque las escorrentías son una función de condición previa de la humedad, así como a la energía de lluvia".

La MUSLE se define como:

$$Y = (11,8) \cdot (Q \cdot q_p)^{0,56} \cdot [K \cdot C \cdot LS \cdot P] \quad (17)$$

Siendo:

- $Y$ : Volumen de sedimentos (t).
- $Q$ : Volumen de la escorrentía (m<sup>3</sup>).
- $q_p$ : Caudal pico registrado  $\left(\frac{m^3}{s}\right)$ .
- $K$ : Factor de erodabilidad de la RUSLE (ec. 5).
- $C$ : Factor de cobertura de la RUSLE.
- $LS$ : Factor de longitud de pendiente de la RUSLE.
- $P$ : Factor de prácticas de conservación de la RUSLE.



### 3.8. Entrega de sedimentos

Los modelos de matemáticos como la USLE, permiten estimar el volumen potencial de suelo erosionado en un área determinada por unidad de tiempo, sin embargo, no permite estimar la cantidad de sedimento que será transportado dentro de la cuenca, en donde es más susceptible a ser depositado.

La entrega de sedimentos ( $S_\gamma$ ) se conoce como el volumen de sedimentos por unidad de área, que sale de la cuenca por un determinado punto de control.

La entrega de sedimentos depende de los procesos de erosivos que ocurren en las fuentes de producción de los sedimentos, así como de la eficiencia del sistema para transportarlos hasta un punto de control definido, por lo que puede variar en diferentes puntos de una misma red de drenaje.

La estimación del volumen de entrega de sedimentos depende del *Coefficiente de entrega de Sedimentos* (SDR). Se le llama SDR a la razón entre la producción de sedimentos de una cuenca y la tasa de erosión bruta (Alfaro, 2018).

El SDR se define mediante la siguiente ecuación:

$$SDR = \frac{S_\gamma}{E_T} \cdot 100 \quad (18)$$

Donde:

- $SDR$ : Coeficiente de entrega de sedimentos en porcentaje (%).
- $S_\gamma$ : Aporte de sedimentos de la cuenca en un periodo de tiempo definido  $\left(\frac{t}{km^2}\right)$ .
- $E_T$ : Erosión total de la cuenca, en un periodo igual a  $S_\gamma$  en  $\left(\frac{t}{km^2}\right)$ . La erosión total  $E_T$  es igual al valor del parámetro  $A$  en la ec. 1.

La entrega de sedimentos es una parte fundamental de la gestión del recurso hídrico de una cuenca, ya que permite predecir y evaluar el efecto de los sedimentos aguas abajo del punto de control definido, determinar la ubicación y la extensión de las fuentes de sedimento para aplicar las medidas de mitigación y el control de la erosión en donde sean efectivas, cuantificar el volumen de sedimentos que escurrirá hasta un punto determinado

para el diseño, la operación y el mantenimiento de las obras hidráulicas ubicadas dentro una cuenca.

Únicamente una parte de los sedimentos que se generan en la zona de producción llega a salir de la cuenca por el punto de control. El volumen de sedimentos que se transporta fuera de la cuenca se puede reducir aplicando las medidas de conservación de suelos, mientras que la erosión por la socavación de cauces naturales solamente puede reducirse empleando estructuras hidráulicas de control de sedimentos.

La entrega de sedimentos es un parámetro dinámico, ya que varía espacialmente y es susceptible al manejo hidrológico que se le dé a una determinada área de drenaje. Es por esto que para estimar la entrega de sedimentos de una cuenca es necesario determinar:

1. El origen de los sedimentos.
2. La tasa de erodabilidad de cada fuente de sedimento.
3. El volumen de sedimentos aportado por cada fuente.
4. Posibles métodos para el control de la erosión y la conservación de suelos.
5. El impacto que tendrá la reducción del volumen de sedimentos en la cuenca como ecosistema, ya que los sedimentos son necesarios para el equilibrio ecológico de una cuenca.

### **3.8.1. Factores climáticos**

Los efectos de la precipitación, la temperatura y el viento no son constantes a lo largo de toda la cuenca. Estos factores varían espacialmente a lo largo del área de drenaje y temporalmente de manera estacional, además pueden verse afectados por eventos climáticos extremos como lo son los huracanes, los fenómenos ENOS y las tormentas tropicales.

### 3.8.2 Factores morfológicos y de cobertura de la Cuenca

- Tamaño de la cuenca: En una cuenca hidrográfica, a mayor tamaño del área de drenaje, mayor será la producción de sedimentos que se generen en ella, sin embargo, el coeficiente de entrega *SDR* disminuye conforme aumenta el tamaño de la cuenca. Esto debido a que gran parte del sedimento es retenido en las laderas, las depresiones en el terreno, los obstáculos o se sedimenta antes de alcanzar el punto de control. En el caso de las cuencas montañosas, el efecto del tamaño de la cuenca se puede despreciar.

Entre mayor sea el área de una cuenca, mayor será el recorrido que debe realizar el sedimento hasta alcanzar el punto de control, además, a diferencia de las cuencas pequeñas, el uso de la tierra y la cobertura pueden variar significativamente en distintas partes del área de drenaje, por lo que las cuencas pequeñas suelen tener valores de *SDR* más altos.

En la Figura 3-19 se puede observar la variación del *SDR* respecto al tamaño de la cuenca.

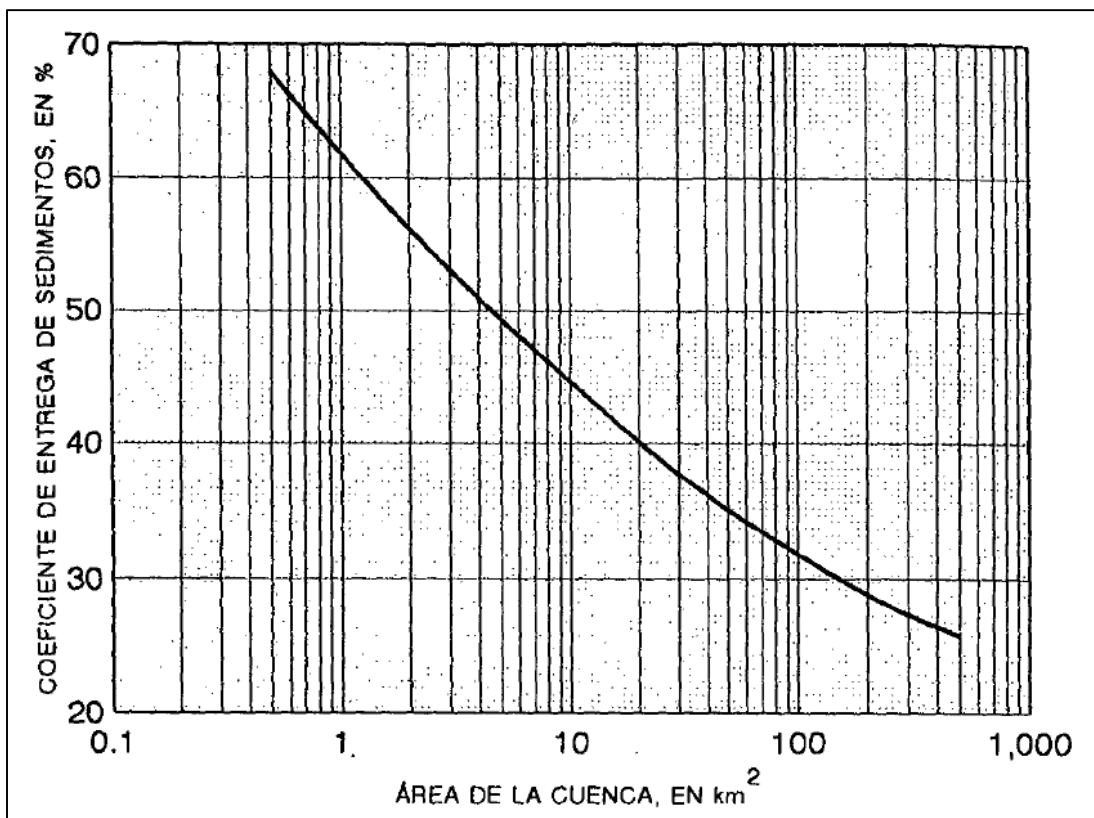


Figura 3-19. *SDR* respecto al área de la cuenca  
Fuente: (ASCE, 2007)

- Topografía: La topografía es un factor que incide de manera directa en la producción de sedimentos. La entrega de sedimentos se encuentra estrechamente relacionada con la pendiente media de una cuenca.
- Densidad de drenaje: La eficiencia con la que el sedimento se transporta fuera de una cuenca depende de la densidad de drenaje. Una cuenca con alta densidad de drenaje posee mejor captación de la escorrentía y, en consecuencia, del sedimento que en ella se transporta.

Al haber mayor cantidad de canales naturales, es más probable que el sedimento logre alcanzar un cauce antes de ser retenido en la ladera, las planicies o los obstáculos, lo que se traduce en los coeficientes de entrega de sedimentos más altos.

- Tipo de suelo y cobertura: El tipo de suelo y su cobertura influyen directamente en la entrega de sedimentos, las cuencas con suelos más susceptibles a erosionarse y con cobertura pobre, aportarán mayor cantidad de sedimentos y tendrán un *SDR* más alto.
- Uso de la tierra: Las actividades que se realicen en una cuenca tienen un impacto directo sobre la cantidad de sedimento que se genera. Es por esto que las cuencas con un uso de la tierra primordialmente agrícola, de ganadería o minería, aportan mayor cantidad de sedimentos, mientras que aquellas cuencas con usos de la tierra forestal o de conservación, aportan menor volumen de sedimento.
- Urbanización: Las cuencas cuyo desarrollo urbano lleva a altos porcentajes de impermeabilización, poseen valores de *SDR* menores, ya que las zonas urbanas e industriales aportan gran cantidad de la escorrentía, pero no aportan sedimentos.

### 3.9. Metodologías para la estimación del *SDR*

Existen varias formas de estimar el valor del *SDR* para el cálculo de la entrega de sedimentos, algunas de ellas son:

- a) Metodología del ASCE: La Asociación Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), propone el uso de la Figura 3-19 para la estimación del coeficiente de entrega de sedimentos, en función del área de drenaje.
- b) Metodología de Maner:

$$\log(SDR) = (1,9354) - (0,1419) \cdot \log(A) \quad (19)$$

Donde:

- *SDR*: Es el coeficiente de entrega de sedimentos en porcentaje (%).
  - *A*: Es el área de la cuenca en (km<sup>2</sup>).
- c) Metodología de Roel: Propone utilizar los valores del Cuadro 3-10, interpolando con la siguiente ecuación:

$$SDR = SDR' \cdot \left(\frac{A_1}{A}\right)^{0,2} \quad (20)$$

Donde:

- *SDR*: Es el coeficiente de entrega de sedimentos en porcentaje (%).
- *SDR'*: Es el coeficiente de entrega de sedimentos en porcentaje (%) del Cuadro 3-10.
- *A*: Es el área de la cuenca en (km<sup>2</sup>).
- *A<sub>1</sub>*: Es el área de la cuenca en (km<sup>2</sup>) del Cuadro 3-10.

Cuadro 3-10. Valores para el cálculo de SDR

$A_1$ (km <sup>2</sup> )	SDR' (%)
0,026	65,0
0,259	44,0
2,589	29,0
25,889	18,0
258,888	9,5
1553,329	5,0

Fuente: (McCuen, 2017)

d) Metodología de (Avendaño, Cobo, & Sanz, 1994)

$$SDR = 36 \cdot A \cdot (-0,2) - \left[ \frac{2}{\log(P)} \right] + \log(N) \quad (21)$$

Siendo:

- SDR: Es el coeficiente de entrega de sedimentos en porcentaje (%).
- A: Es el área de la cuenca en (m<sup>2</sup>).
- P: Pendiente del cauce principal (m/m).
- N: Número de orden de la cuenca (adim).

## Capítulo 4 . Modelo InVEST como herramienta de análisis

InVEST es un conjunto de software libre de código abierto, creado por la Universidad de Stanford en los Estados Unidos, el cual fue diseñado para el estudio, el manejo y la conservación de los recursos naturales.

La Universidad de Stanford desde su programa “*Natural Capital Project*”, se enfoca en el estudio de los servicios ecosistémicos y el impacto que estos tienen sobre el ser humano. Es una herramienta que permite analizar, mapear y cuantificar distintas características de ecosistemas terrestres, de agua dulce y marinos.

Para el desarrollo de este proyecto, se trabajó únicamente con el módulo SDR (*Sediment Delivery Ratio*) del conjunto InVEST. Este programa permite calcular la producción potencial de sedimentos por la erosión hídrica dentro de una cuenca, así como el volumen entregado a los cauces y el volumen retenido por las condiciones de la cobertura y la topografía del terreno.

El módulo SDR es espacialmente explícito y se basa en herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), para el cálculo de la erosión por elemento pictórico y la producción de mapas.

El modelo InVEST ha sido aplicado y calibrado para cuencas de todo el mundo, incluyendo Costa Rica, por lo que es una herramienta válida para la estimación del volumen potencial de sedimentos por erosión hídrica en la cuenca del río Abangares.

Los resultados obtenidos a partir del modelado de la erosión con la herramienta SDR, poseen un formato tipo cuadrícula (*raster*) que puede ser analizado en cualquier programa de SIG, lo que permite realizar las operaciones y los cálculos más avanzados si así se requiere.

Según (Gómez, 2002), “al identificar las fuentes principales de sedimentos dentro de una cuenca, es posible promover la conservación de los suelos y valorar implicaciones de los cambios en el manejo de la tierra”, por lo que InVEST es una herramienta de análisis valiosa, ya que permite al usuario realizar ese tipo de análisis.

El módulo SDR de InVEST realiza las siguientes operaciones para el modelado de la producción de sedimentos por erosión hídrica:

- a) Estima la pérdida de suelo a partir de la RUSLE (Wischmeier & Smith, 1978).
- b) Estima la retención de sedimentos se mediante la diferencia entre el volumen recibido y entregado por unidad de elemento pictórico.
- c) Calcula la entrega de sedimentos en función de la pérdida total de suelo y el coeficiente de entrega de sedimentos estimado por elemento pictórico.



## 4.1. Ventajas y desventajas del modelo InVEST

Al igual que cualquier otro modelo computacional, InVEST tiene sus ventajas y sus limitaciones que deben ser tomadas en cuenta al hacer uso de sus módulos. Algunas de estas son:

### 4.1.1. Ventajas

- 1) Se basa en el concepto de conectividad hidrológica.
- 2) Permite realizar un estudio espacialmente explícito de la producción de sedimentos por erosión hídrica.
- 3) Tiene escala espacial variable, lo que permite realizar análisis a nivel local, regional y global.
- 4) Facilita ejecutar un estudio tanto agregado (nivel cuenca), como desagregado (por subcuencas) de la producción de sedimentos.
- 5) Ha sido probado y calibrado en cuencas de Costa Rica.
- 6) Permite hacer un análisis del factor *LS* en pendientes compuestas.
- 7) Permite calibrar y definir las zonas de producción de sedimentos mediante el coeficiente de entrega de sedimentos.
- 8) Ayuda a identificar las zonas de retención de sedimentos.
- 9) Permite realizar modelos de manera sencilla y en poco tiempo.
- 10) Es software gratuito y de código libre.
- 11) Los resultados del modelo están en formato SIG, lo que facilita su análisis y su procesamiento.

### 4.1.2. Desventajas

- 1) Sólo es posible modelar la erosión laminar, no es posible analizar otros tipos de erosión como surcos, cárcavas y movimientos de masa a pesar de ser fuentes importantes del aporte de sedimentos en las cuencas.
- 2) Es sensible a parámetros matemáticos que no están basados en fenómenos físicos, por lo que la verificación de los resultados es de suma importancia.
- 3) La calidad de los resultados va a depender de la calidad de los insumos que se ingresen al modelo. La resolución de las cuadrículas (*raster*) de entrada define la resolución de las cuadrículas (*raster*) de resultados.

- 4) Es necesario tener conocimientos en SIG para poder utilizarlo.

## 4.2. Insumos del programa

El programa necesita de varios insumos para realizar el modelado de la producción de sedimentos en un área determinada. Los insumos del modelo y su descripción se muestran en el Cuadro 4-1.

Cuadro 4-1. Insumos del módulo SDR de InVEST para la estimación de la producción de sedimentos.

Insumo	Formato de Entrada	Descripción
Modelo de Elevación Digital	Cuadrícula ( <i>raster</i> )	<p>Archivo que contiene el valor de la elevación de cada píxel en (m.s.n.m.).</p> <p>Previo a su uso, se debe corregir el MED rellenando los sumideros. Posterior a su uso, se deben comparar los mapas de flujo que se obtienen como salida del modelo, con los mapas hidrográficos del área estudiada.</p> <p>Para garantizar una ruta de flujo adecuada, el MED debe extenderse más allá de la divisoria de aguas de la cuenca de interés, en lugar de delimitarlo en el borde.</p>
Erosividad por Precipitación ( <i>R</i> )	Cuadrícula ( <i>raster</i> )	<p>Archivo que contiene el valor de la erosividad de cada píxel en <math>\left(\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot h}\right)</math>.</p> <p>Debido a que las mediciones de la precipitación son puntuales en el espacio, se debe realizar una distribución espacial que cubra el área de drenaje de la cuenca.</p>

Insumo	Formato de Entrada	Descripción
Erodabilidad del Suelo ( <i>K</i> )	Cuadrícula ( <i>raster</i> )	Archivo que contiene el valor de erodabilidad de cada píxel en $\left(\frac{t \cdot h}{MJ \cdot mm}\right)$ .
Uso y cobertura del suelo (LULC)	Cuadrícula ( <i>raster</i> )	Archivo que contiene un código LULC, en número entero para cada píxel. Todos los valores de este archivo deben coincidir con los valores descritos en el <i>Cuadro Biofísico</i> .
Cuadro Biofísico	Datos en formato .csv	<p>Contiene la información del modelo correspondiente a cada una de las clases de uso del suelo en la cuadrícula (<i>raster</i>) LULC.</p> <p>El archivo debe contener las siguientes columnas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>lucode</i>: número entero único para cada clase de uso o cobertura. Dicho valor debe coincidir con los valores de la cuadrícula (<i>raster</i>) LULC.</li> <li>• <i>usle_c</i>: factor de cobertura (C), con un valor entre 0 y 1.</li> <li>• <i>usle_p</i>: factor de prácticas de conservación (P), con un valor entre 0 y 1.</li> </ul>

Insumo	Formato de Entrada	Descripción
Cuencas	Polígono ( <i>shapefile</i> )	<p>Es una capa de cuencas hidrográficas, delimitadas hasta un punto de control de interés, en las cuales se analizará la producción de sedimentos.</p> <p>Se requiere un campo numérico llamado "<i>ws_id</i>", con un valor de número entero, único para cada cuenca hidrográfica.</p>
Umbral de Acumulación de Flujo	Número entero	<p>Cantidad de píxeles en sentido pendiente arriba que deben registrar flujo hacia un punto para que se consideren un cauce.</p> <p>El valor del umbral afecta de manera directa la conectividad hidrológica del modelo. Es por esto que se debe verificar que la red de drenaje creada por el modelo, represente la red de drenaje real.</p>
$IC_0$ y $k_b$	Valores numéricos	Parámetros de calibración que determinan tanto el grado de conectividad hidrológica, como la tasa de entrega de sedimentos a los cauces.
SDR máximo	Valor numérico entre 0 y 1	<p>Parámetro de calibración que se encuentra en función de la textura del suelo.</p> <p>Es la máxima tasa de entrega de sedimentos que puede alcanzar un elemento pictórico.</p>

Fuente: (Stanford University, 2019)

### 4.3. Procesos del modelo InVEST

El módulo SDR de InVEST estima la pérdida de suelo utilizando la Ecuación Universal de Suelo Revisada (*RUSLE*), sin embargo, al ser un modelo computacional espacialmente explícito utiliza algunas variantes de las expresiones detalladas en la sección 3.6.

El factor de la longitud y magnitud de pendiente  $LS$  está dado por el método desarrollado por (Desmet & Govers, 1996) para superficies bidimensionales, el cual se define como:

$$LS_i = S_i \cdot \frac{(A_{i-in} + D^2)^{m+1} - A_{i-in}^{m+1}}{D^{m+2} \cdot x_i^m \cdot 22.13^m} \quad (22)$$

Donde:

- $S_i$ : Es el factor de pendiente para cada píxel "i" calculado como función de la pendiente  $\theta$ . Este factor se describe mediante la siguiente expresión:

$$S = \begin{cases} 10,8 \cdot \text{sen}(\theta) + 0,03 ; \text{para } \theta < 9\% \\ 16,8 \cdot \text{sen}(\theta) - 0,50 ; \text{para } \theta \geq 9\% \end{cases} \quad (23)$$

(24)

- $\theta$ : Es la pendiente del terreno en (%).
- $A_{i-in}$ : Es el área tributaria en la entrada de un píxel que se calcula a partir del método de dirección de flujo d-finito en (m<sup>2</sup>).
- $D$ : Es la dimensión lineal del píxel.
- $x_i$ : Está dado por la siguiente ecuación:

$$x_i = |\text{sen}(\alpha_i)| + |\text{cos}(\alpha_i)| \quad (25)$$

- $\alpha_i$ : Es la dirección de aspecto en el píxel  $i$ .
- $m$ : Es el factor *RUSLE* del exponente de la longitud.

Para evitar la sobreestimación del factor  $LS$  en terrenos heterogéneos, (Desmet & Govers, 1996; Renard et al., 1997) recomiendan limitar la longitud de la pendiente a un máximo de 333 m.

Para la estimación de la entrega de sedimentos, el modelo se basa en la teoría detallada por (Borselli et al., 2008). Para esto el modelo primero estima el índice de conectividad ( $IC$ ) para cada píxel del área analizada. El índice de conectividad describe la conectividad hidrológica entre las fuentes de sedimento del terreno, y los sumideros que definen un cauce. Este concepto se basa en los principios de conservación de la energía y la conservación de la masa.

Valores más altos de  $IC$  implican que la erosión de la fuente tiene una alta probabilidad de llegar a un sumidero (mayor conectividad). Esto sucede en casos donde la vegetación es escasa o la pendiente del terreno es pronunciada. Los valores de  $IC$  bajos (baja conectividad), se asocian con áreas con vegetación densa o las pendientes menos pronunciadas.

El  $IC$  es una función del área pendiente arriba de cada píxel ( $D_{up}$ ) y la trayectoria del flujo entre cada píxel y el cauce más cercano ( $D_{dn}$ ). En casos con áreas pendiente arriba grandes y coberturas con vegetación densa, el coeficiente ( $D_{up}$ ) será bajo, indicando que el sedimento originado en la fuente tiene baja probabilidad de alcanzar un cauce.

El  $IC$  está dado por la siguiente expresión:

$$IC = \log_{10} \left( \frac{D_{up}}{D_{dn}} \right) \quad (26)$$

Donde:

- $D_{up}$ : Es el componente para los elementos pendiente arriba, definido como:

$$D_{up} = \overline{CS} \cdot \sqrt{A} \quad (27)$$

- $\bar{C}$ : Es el factor RUSLE (C) promedio, del área pendiente arriba de cada píxel.
- $\bar{S}$ : Es la pendiente promedio del área pendiente arriba de cada píxel en (m/m).
- $A$ : Es el área pendiente arriba de cada píxel en (m<sup>2</sup>).
- $D_{dn}$ : Es el componente que describe la trayectoria de flujo pendiente abajo, definido como:

$$D_{dn} = \sum_i \frac{d_i}{C_i \cdot S_i} \quad (28)$$

- $d_i$ : Es la longitud de la trayectoria de flujo a lo largo de cada píxel, siguiendo la dirección con la pendiente más empinada hacia aguas abajo.
- $C_i$ : Es el factor RUSLE (C) de cada píxel siguiendo la trayectoria de flujo hacia el cauce más cercano.
- $S_i$ : Gradiente de la pendiente de cada píxel siguiendo la trayectoria de flujo hacia el cauce más cercano.

En la siguiente figura, se muestra un diagrama que ilustra la metodología de cálculo para cada píxel según su área pendiente arriba, y la longitud pendiente abajo, siguiendo la trayectoria de flujo.

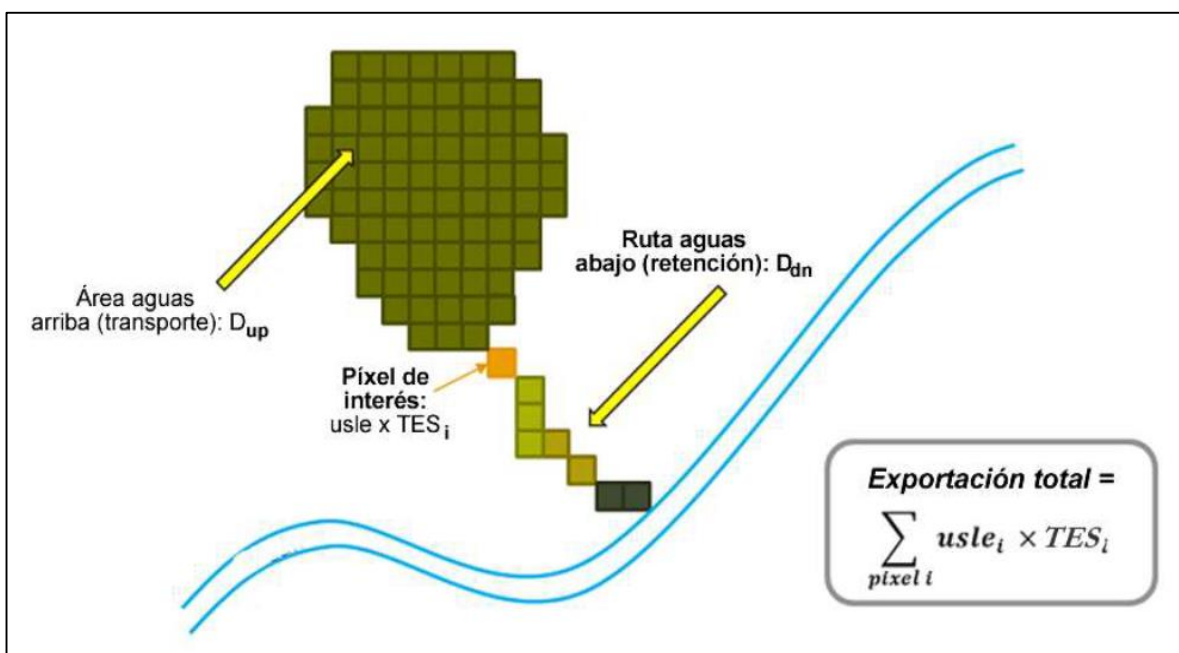


Figura 4-1. Diagrama de metodología de cálculo por píxel en modelo InVEST  
Fuente: (Stanford University, 2019)





Finalmente, para la estimación del Coeficiente de Entrega de Sedimentos para cada elemento pictórico del modelo, se utiliza la siguiente expresión:

$$SDR_i = \frac{SDR_{m\acute{a}x}}{1 + e^{\left(\frac{IC_0 - IC_i}{k}\right)}} \quad (29)$$

Donde:

- $SDR_{m\acute{a}x}$ : Es el valor de Coeficiente de Entrega de Sedimentos establecido en 0,8 de manera teórica según (Vigiak et al., 2012).
- $IC_0$  y  $k_b$ : Factores de calibración de (Borselli et al., 2008).

La relación entre los factores de calibración  $IC_0$  y  $k_b$  con el SDR, se muestra en la siguiente figura:

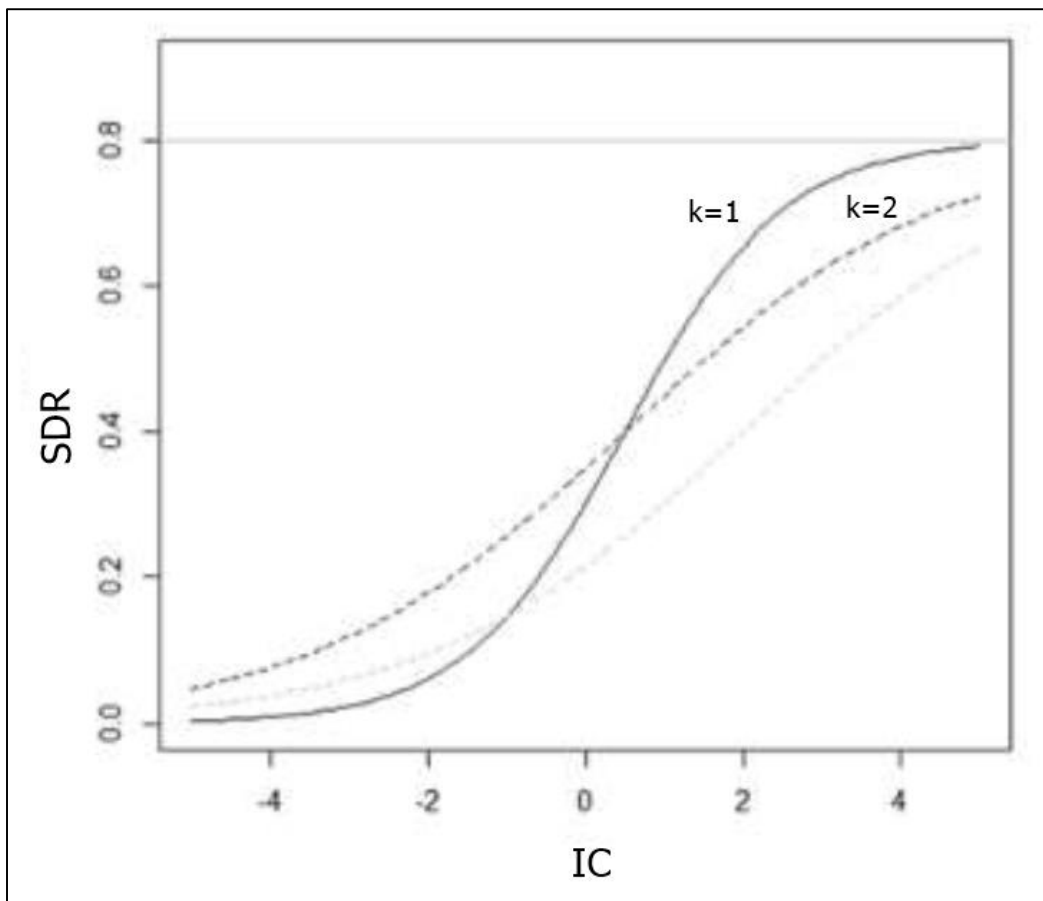


Figura 4-2. Relación entre SDR y factores de calibración  $IC_0$  y  $k_b$

Fuente: (Borselli et al., 2008)

Editado: (Matarrita, 2021)

## 4.4. Preparación de los insumos del modelo InVEST

A continuación, se describe el procedimiento utilizado para la preparación de los insumos del módulo SDR de InVEST mencionados en la sección 4.2. *Insumos del programa.*

### 4.4.1. Modelo de elevación digital

Para la caracterización física y morfológica de la cuenca del río Abangares, se utilizaron las siguientes hojas cartográficas del Instituto Geográfico Nacional (IGN):

- Escala 1:25 000:
  - El Dos.
  - Río Chiquito.
  - Juntas.
  - Monteverde.
  - Pozo Azul.
  - Guacimal.
- Escala 1:50 000:
  - Juntas.
  - Tilarán.

Se generó un área de amortiguamiento de un kilómetro más allá de la divisoria de aguas, esto siguiendo la recomendación de no cortar el MED en el borde de la cuenca para garantizar una ruta de flujo adecuada.

A partir de esta información, se generó una cuadrícula (*raster*) interpolando los valores de las curvas de nivel, generando un modelo hidrológicamente correcto<sup>2</sup>.

En la siguiente figura se muestra el MED con la extensión de la zona de amortiguamiento, respecto a la divisoria de aguas de la cuenca del río Abangares delimitada hasta el punto de control de La Marimba.

---

<sup>2</sup> Un modelo se considera hidrológicamente correcto cuando todas las elevaciones son continuamente decrecientes y no haya sumideros.

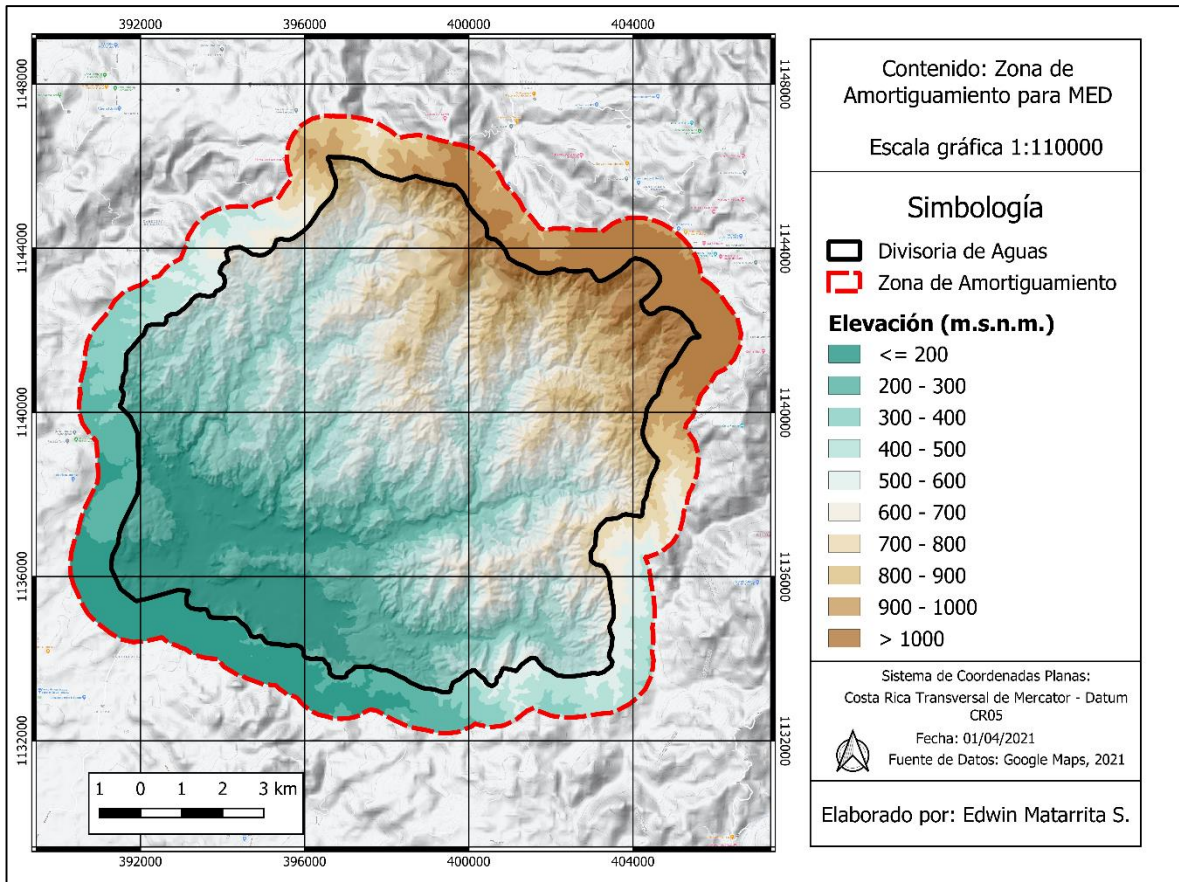


Figura 4-3. Zona de Amortiguamiento del MED de la cuenca del río Abangares

#### 4.4.2. Cuadrícula (*raster*) de erosividad (*R*)

La estimación de los factores de erosividad *R* para cada estación se realizó mediante el método de  $EI_{30}$  (Wischmeier & Smith, 1978).

Para la obtención de estos valores de erosividad de cada tormenta, se procedió a generar una base de datos con la información meteorológica registrada en cada una de las estaciones. Posteriormente, por medio de un lenguaje de consulta estructurada (SQL por sus siglas en inglés *Structured Query Language*) se programaron las ecuaciones (2), (3) y (4) de tal manera que, tomando como valores de entrada los intervalos de tiempo del registro de cada estación en minutos y los volúmenes de precipitación en (mm) de cada intervalo, se estimaron los valores de intensidad instantánea en  $\left(\frac{mm}{h}\right)$  y su respectiva energía instantánea  $E_c$  en  $\left(\frac{MJ}{ha \cdot mm}\right)$  para cada lapso del registro.

El valor de  $E_c$  de cada tormenta, se multiplica por su respectivo volumen total de precipitación en (mm), se obtiene así, la energía total de cada tormenta en  $\left(\frac{MJ}{ha}\right)$ .

Mediante el lenguaje SQL se programó además, el cálculo de la intensidad máxima de precipitación en un intervalo de 30 min. De manera iterativa se calculan todos los posibles intervalos de 30 min de cada tormenta, conservando el valor máximo de  $I_{30}$  en  $\left(\frac{mm}{h}\right)$  registrado en las iteraciones.

Finalmente, la rutina de SQL multiplica la energía total por la intensidad máxima en 30 min  $I_{30máx}$ . El producto de estos parámetros dividido entre 100 da como resultado el valor de  $EI_{30}$  de cada tormenta.

Para reducir la varianza en la estimación del promedio anual de erosividad en cada estación, se suman los valores de  $EI_{30}$  para obtener un valor total mensual de  $R$ . Posteriormente se estima un valor de  $EI_{30}$ , promediando los valores estimados para un mismo mes, en todos los años de registro, obteniendo así un valor mensual multianual del parámetro  $R$ .

La suma de los 12 valores de promedio mensual multianual, reduce la dispersión entre los valores de  $R$  dentro de un mismo año, reduciendo así la varianza del valor de  $R$  para cada estación.

En el siguiente cuadro, se muestra de manera esquemática la metodología utilizada para el cálculo de  $R$  para cada una de las estaciones a partir de los valores mensuales.

Cuadro 4-2. Metodología para el cálculo de la variable  $R$

	Mes 1	Mes 2	(...)	Mes 12
Año 1	$R_1'$	$R_2'$	(…)	$R'_{12}$
Año 2	$R_1''$	$R_2''$		$R''_{12}$
(:)	(:)	(:)		
Año (n)	$R_1'^n$	$R_2'^n$		$R'^n_{12}$
Promedio Mensual Multianual	$\overline{R_1}$	$\overline{R_2}$	(…)	$\overline{R_{12}}$

Finalmente, se estima el valor de  $R_{total}$  en  $\left(\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot h}\right)$  para cada estación sumando los valores promedio mensual multianual mediante la siguiente expresión:

$$R_{total} = \sum_{m=1}^{12} \overline{R_m} \quad (30)$$

Debido a que las mediciones de la precipitación son puntuales, se deben interpolar los valores de  $R$  calculados para realizar una distribución espacial de la erosividad en toda el área de drenaje.

Para el caso de la cuenca del río Abangares, tomando en consideración la cantidad de puntos de medición, así como su distribución espacial dentro de la cuenca, se optó por realizar una interpolación geoestadística por el método del inverso de la potencia de la distancia.

Esta metodología permite estimar los valores de erosividad en cada punto del área de drenaje realizando una asignación de pesos a los datos del entorno, en función inversa a la distancia que los separa de los puntos sí existe medición. Esto implica que los valores que se quieren representar cartográficamente, disminuyen su influencia conforme aumenta la distancia desde su ubicación de muestra.

El método del inverso de la potencia de la distancia está definido mediante la siguiente ecuación:

$$R_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{R_i}{d_{i,j}^P}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{i,j}^P}} \quad (31)$$

Donde:

- $R_j$ : Es el valor de erosividad en un punto cualquiera  $j$   $\left(\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot h}\right)$ .
- $R_i$ : Es el valor de erosividad en un punto  $i$  donde hay medición  $\left(\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot h}\right)$ .
- $P$ : Es el exponente de ponderación.
- $d_{i,j}$ : es la distancia entre el punto que se quiere interpolar  $j$  y el punto  $i$  donde se tiene medición (m).

En la Figura 4-4 se muestra el modelo de isoerodentas para la cuenca del río Abangares, delimitada hasta el punto de control La Marimba. Asimismo, en el Cuadro 4-3 se muestran los valores de  $R$  utilizados para el análisis de la producción de sedimento en la cuenca del río Abangares.

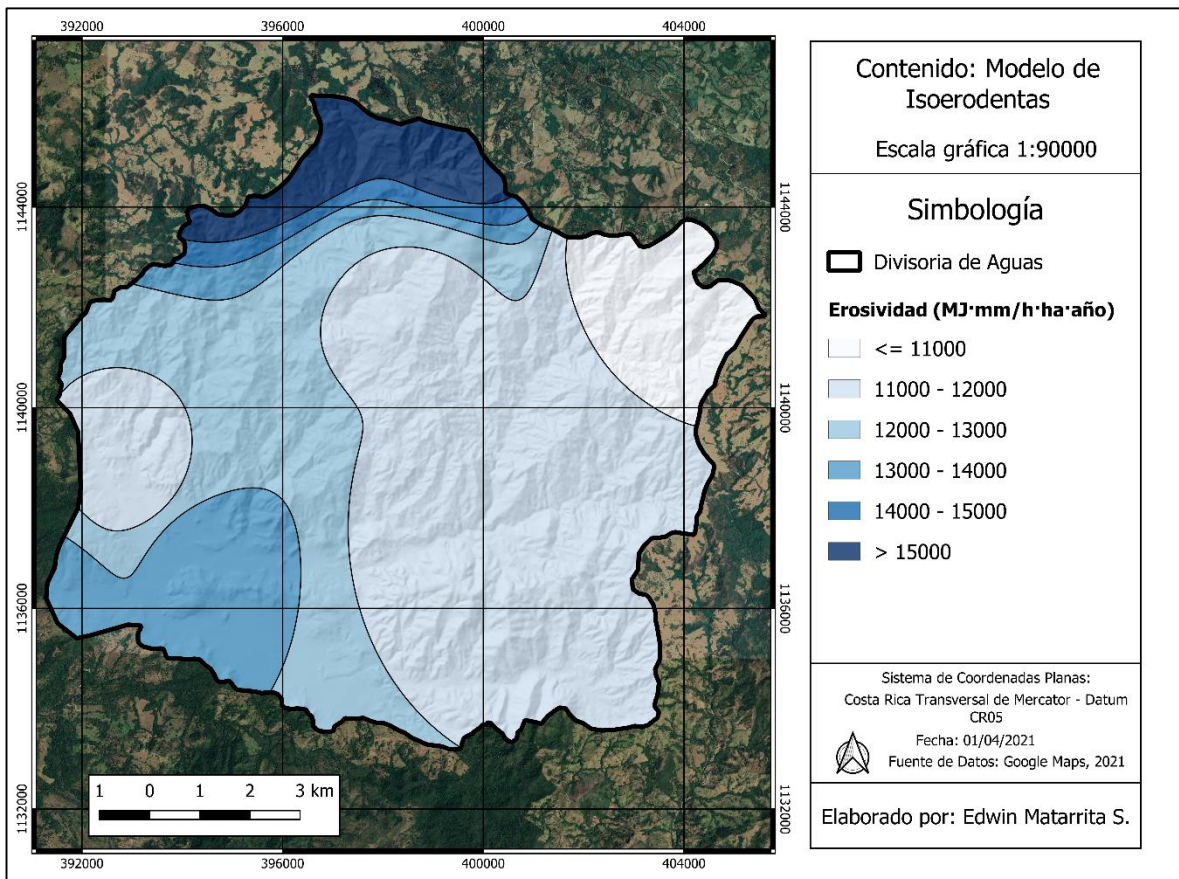


Figura 4-4. Modelo de isoerodentas para la cuenca del río Abangares

Cuadro 4-3. Valores totales de  $R$  por estación para la estimación de la producción de sedimento en la cuenca del río Abangares

Estación	$R \left( \frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot h} \right)$
Campos de Oro	15 349,74
Cerro San José	16 927,05
CINDEA Abangares	13 141,47
CTP Las Juntas	13 139,25
Ecomuseo	11 716,60
La Marimba	13 234,07
Marsellesa	11 914,27
Monteverde	14 619,71
San Rafael	10 109,69
Santa Lucía	11 767,18

#### 4.4.3. Cuadrícula (*raster*) de erodabilidad del suelo

Para la obtención de la información de las características del suelo, se consultó la información del *Mapa de Suelos de Costa Rica* elaborado por (Mata et al., 2012). Dicho mapa utiliza el sistema de clasificación WRB (*World Reference Base for Soil Resources*, 2007), en él se muestra la información de los órdenes y los subórdenes edafológicos del suelo y su respectiva ubicación dentro de Costa Rica. En la siguiente figura se muestra el mapa de los subórdenes de suelo de Costa Rica.

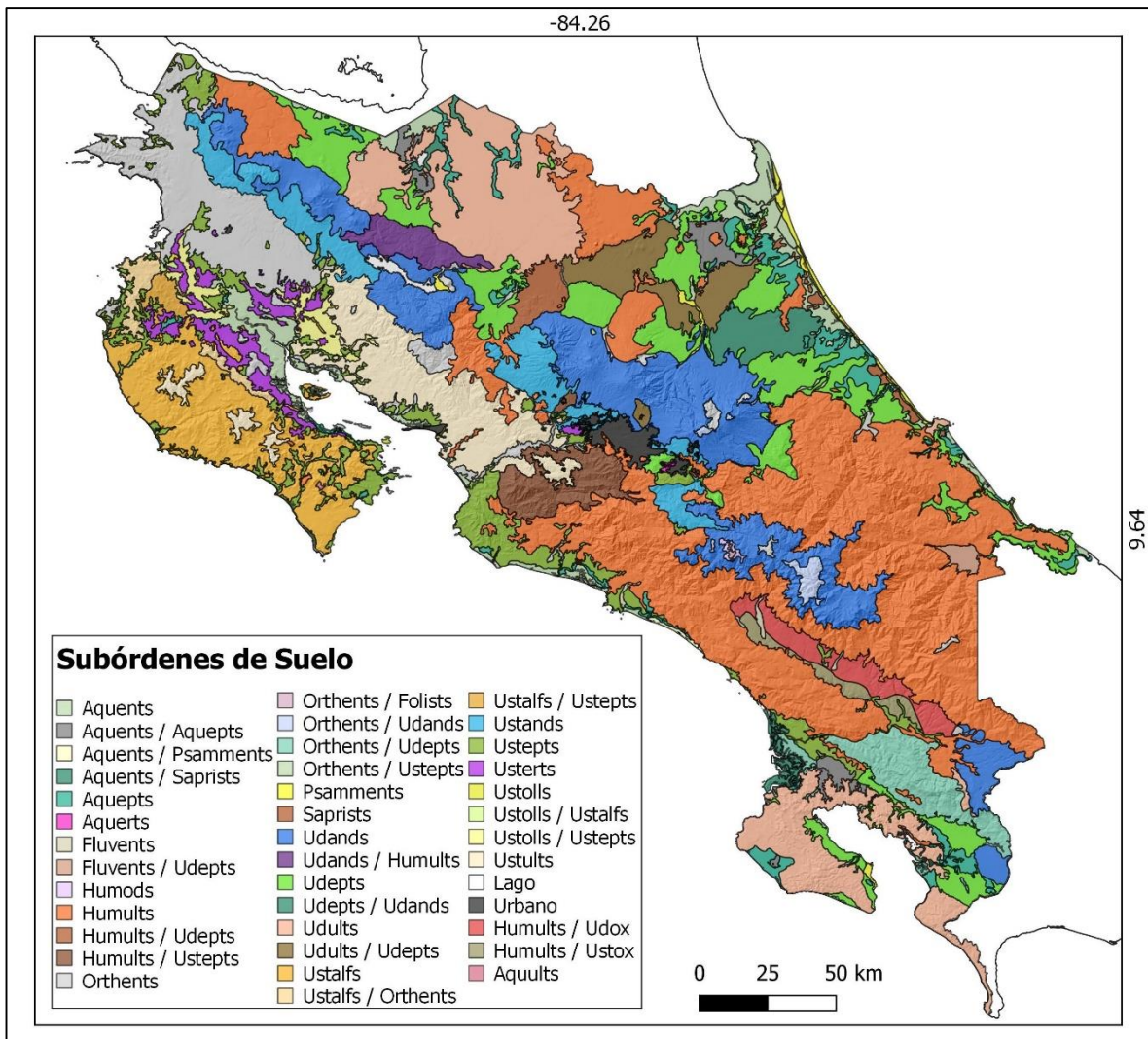


Figura 4-5. Mapa de subórdenes de Suelo

Fuente: (CIA-UCR, 2016)

Utilizando la información del mapa como referencia, se extraen los órdenes y los subórdenes de los suelos presentes en la cuenca del río Abangares. Finalmente, utilizando la información descrita en el Cuadro 3-2 se asocia un valor de  $K$  a cada tipo de suelo y se genera una cuadrícula (*raster*) que se utiliza como insumo del modelo InVEST.

En la Figura 4-6 se muestra el mapa de los subórdenes de suelo en la cuenca del río Abangares. Asimismo, en el Cuadro 4-4 se muestra el área de cada suborden de suelo dentro del área de drenaje.



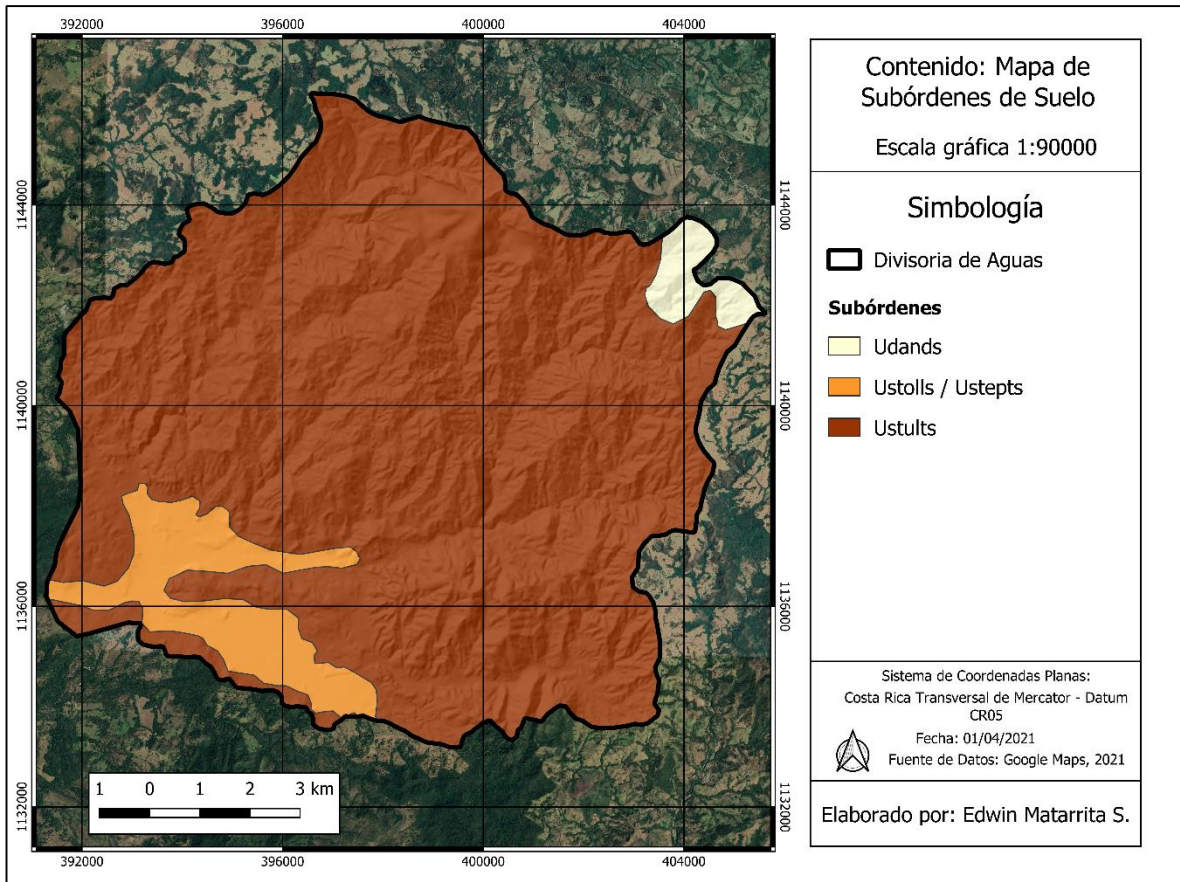


Figura 4-6. Mapa de los subórdenes de suelo en la cuenca del río Abangares, delimitada hasta el punto de control de La Marimba

Cuadro 4-4. Área de los órdenes y los subórdenes presentes en la cuenca del río Abangares

Orden	Suborden	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
<i>Andisoles</i>	<i>Udands</i>	2,55	2,04
<i>Mollisoles/Inceptisoles</i>	<i>Ustolls/Ustepts</i>	9,95	7,97
<i>Ultisoles</i>	<i>Ustults</i>	112,34	89,99
<b>Total</b>		124,84	100

#### **4.4.4. Cuadrícula (*Raster*) de uso y cobertura del suelo**

Para determinar la cobertura y el uso de suelo en la cuenca del río Abangares, se realizó una clasificación no supervisada de la cobertura mediante el procesamiento de imágenes satelitales, utilizando herramientas de teledetección.

La teledetección se conoce como la captura de imágenes desde satélites o plataformas aéreas, ofreciendo coberturas espaciales o globales de la superficie terrestre (SATELMAC, 2016).

Para el procesamiento y el análisis de imágenes satelitales se utilizó el software de SIG *QGIS* con el complemento *GDAL*, así como la plataforma de *Landsatlook* para la obtención de las imágenes satelitales. Una vez procesada la imagen satelital, se realizó un proceso de validación y corrección con el objetivo de asegurar que los usos asignados mediante la clasificación, coincidan con el uso real de la cuenca. En la Figura 4-7 se muestra el mapa de cobertura y el uso de suelo en la cuenca del río Abangares, delimitada hasta el punto de control de La Marimba.

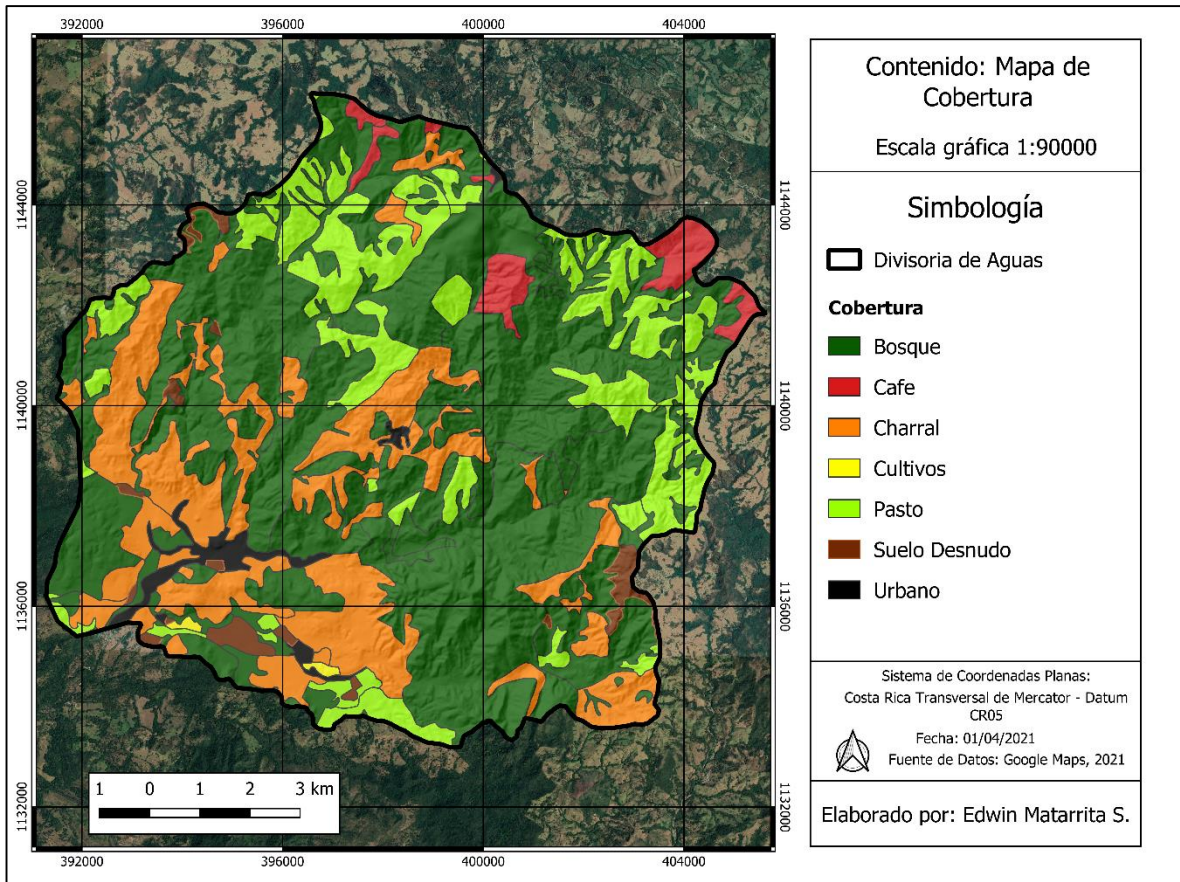


Figura 4-7. Mapa de los subórdenes de suelo en la cuenca del río Abangares, delimitada hasta el punto de control de La Marimba

En el Cuadro 4-5 se muestra el área de cada uso del suelo definido en la clasificación no supervisada de imágenes.

Cuadro 4-5. Conformación de la cobertura y el uso del suelo en la cuenca del río Abangares

<b>Cobertura del suelo</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>
Bosque	72,0	57,66
Café	3,49	2,79
Charral	25,12	20,12
Cultivos anuales	0,25	0,20
Pasto	19,74	15,81
Suelo desnudo	2,26	1,81
Urbano	2,02	1,62
<b>Total</b>	<b>124,84</b>	<b>100</b>

A cada tipo de cobertura se le asignó un número entero, el cual es el código para la asignación de los valores del factor de cobertura *C*. Estos códigos deben coincidir con los valores descritos en el cuadro biofísico.

#### **4.4.5. Cuadro biofísico**

El cuadro biofísico contiene la información que utiliza el modelo para la asignación de los coeficientes de cobertura *C* y de las prácticas de conservación *P* para cada uno de los tipos de cobertura y uso de suelo identificados en la cuenca. En el Cuadro 4-6 se muestra el cuadro biofísico utilizado para el estudio de la producción de sedimentos en la cuenca del río Abangares.

Cuadro 4-6. Cuadro biofísico con los valores de factores  $C$  y  $P$  utilizados para el modelado de la producción de sedimentos

Descripción	lucode	usle_c	usle_p
Café	1	0,09	1
Charral	2	0,012	1
Bosque	3	0,007	1
Urbano	4	0,0065	1
Pasto	5	0,013	1
Suelo Desnudo	6	1	1
Cultivos Anuales	7	0,65	1

#### 4.4.6. Polígono (*shapefile*) de cuencas

La capa de polígonos (*shapefile*) utilizada para la delimitación de las subcuencas que componen el área de drenaje del río Abangares, delimitada hasta el punto de control de La Marimba, se puede observar en la Figura 2-4.

#### 4.4.7. Calibración de los parámetros de Borselli ( $IC_0$ y $k_b$ )

Para efectuar una correcta estimación de los parámetros  $IC_0$  y  $k_b$  que representan de manera adecuada la producción de sedimentos en la cuenca del río Abangares, se utilizó como insumo el boletín de estadística de sedimentos del ICE para la estación fluviográfica 780121 Limonal Viejo.

Estos boletines contienen la información de los sedimentos en suspensión en toneladas, a nivel mensual y anual que se registró en la estación Limonal Viejo durante sus 22 años de operación (1970 hasta 1992).

Los volúmenes de sedimento en suspensión registrados en la estación Limonal Viejo corresponden al volumen de entrega de sedimentos de la cuenca, es decir, el volumen de sedimentos que alcanza un cauce de la red de drenaje y es transportado.

Debido a que la estación Limonal Viejo se ubicaba aproximadamente a 1,2 km hacia aguas abajo del sitio del embalse La Marimba, se considera que los volúmenes de sedimentos registrados son adecuados para la calibración del modelo al ser áreas de drenaje homólogas.

En la Figura 4-8 se presenta la ubicación de la estación 780121 Limonal Viejo respecto a la cuenca del río Abangares delimitada hasta el punto de control de La Marimba, además, en el Cuadro 4-7 se muestran los volúmenes anuales de sedimento registrados en dicha estación.

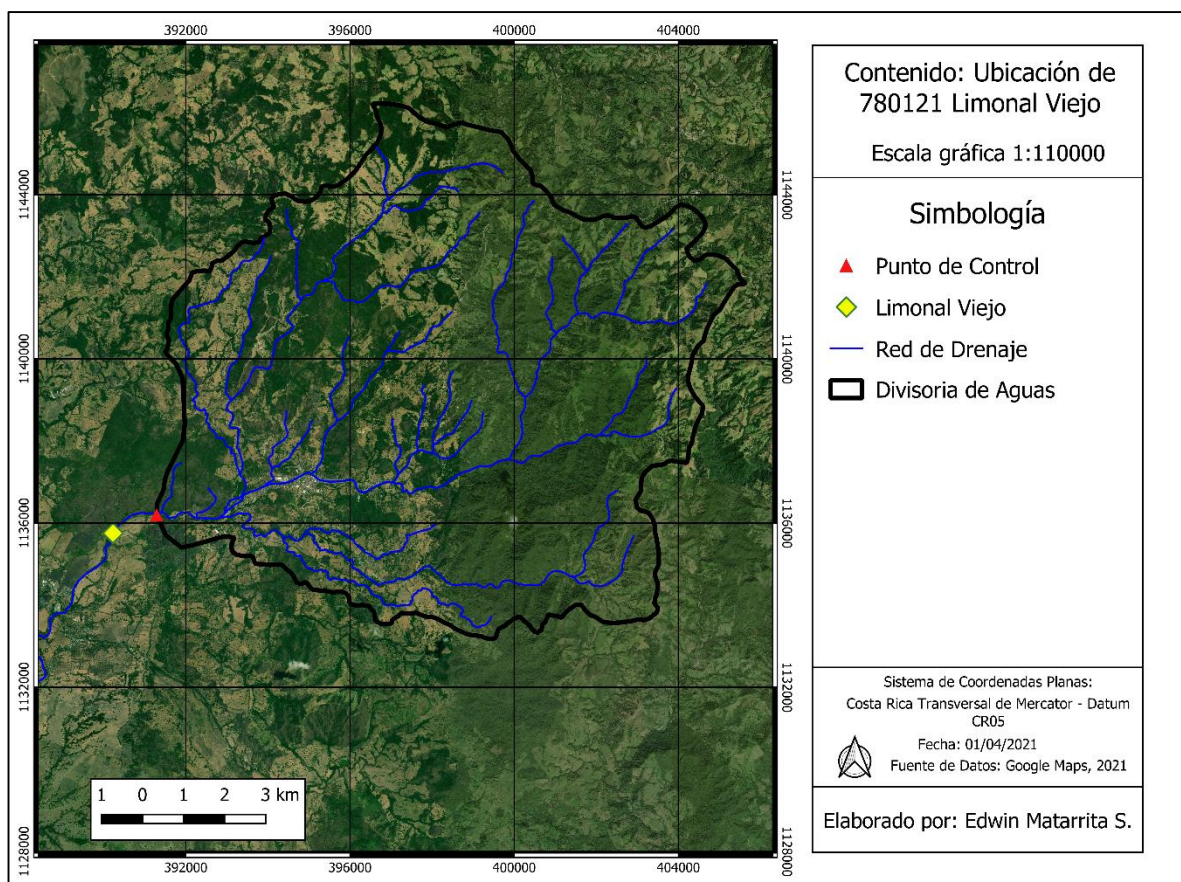


Figura 4-8. Ubicación de la estación 780121 Limonal Viejo respecto a la cuenca del río Abangares, delimitada hasta el sitio de embalse La Marimba

Cuadro 4-7. Volúmenes de sedimento registrados en la estación 780121 Limonal Viejo

Año hidrológico	Entrega de sedimento $\left(\frac{t}{año}\right)$	Pérdida de suelo $\left(\frac{t}{km^2 \cdot año}\right)$
1970 – 1971	14 041	111
1971 – 1972	33 055	262
1972 – 1973	22 933	182
1973 – 1974	22 045	175
1974 – 1975	20 927	166
1975 – 1976	20 382	162
1976 – 1977	17 898	142
1977 – 1978	16 696	132
1978 – 1979	17 012	135
1979 – 1980	17 990	143
1980 – 1981	17 323	137
1981 – 1982	17 157	136
1982 – 1983	16 312	129
1983 – 1984	15 618	118
1984 – 1985	15 340	116
1985 – 1986	15 343	116
1986 – 1987	14 748	112
1987 – 1988	14 396	109
1988 – 1989	15 713	119
1989 – 1990	15 572	118
1990 – 1991	15 433	117
1991 – 1992	14 925	113

Fuente: (ICE, 1992)

Del cuadro anterior se extrae que el promedio anual de la pérdida de suelo en la cuenca del río Abangares, es de  $139 \left( \frac{t}{km^2 \cdot año} \right)$ . Utilizando este valor como referencia, se realizó un estudio de espacio de variabilidad para determinar la combinación de los factores  $SDR_{máx}$ ,  $IC_0$  y  $k_b$  que calibran de forma óptima el modelo de producción de sedimentos.

Se realizaron 705 simulaciones utilizando el modelo InVEST, variando de manera sistemática para cada iteración, los valores de los parámetros  $SDR_{máx}$ ,  $IC_0$  y  $k_b$ , obteniendo así el valor de entrega de sedimentos de cada simulación. Posteriormente, se estimó la variabilidad de cada resultado respecto al valor de promedio anual de la pérdida de suelo, obtenido del registro histórico detallado en el boletín de sedimentos del ICE.

En la Figura 4-9 se muestra el espacio de variabilidad analizado para los tres parámetros de calibración del modelo. A partir de este análisis se obtiene que los valores que mejor representan las condiciones de la producción de sedimentos en la cuenta del río Abangares.



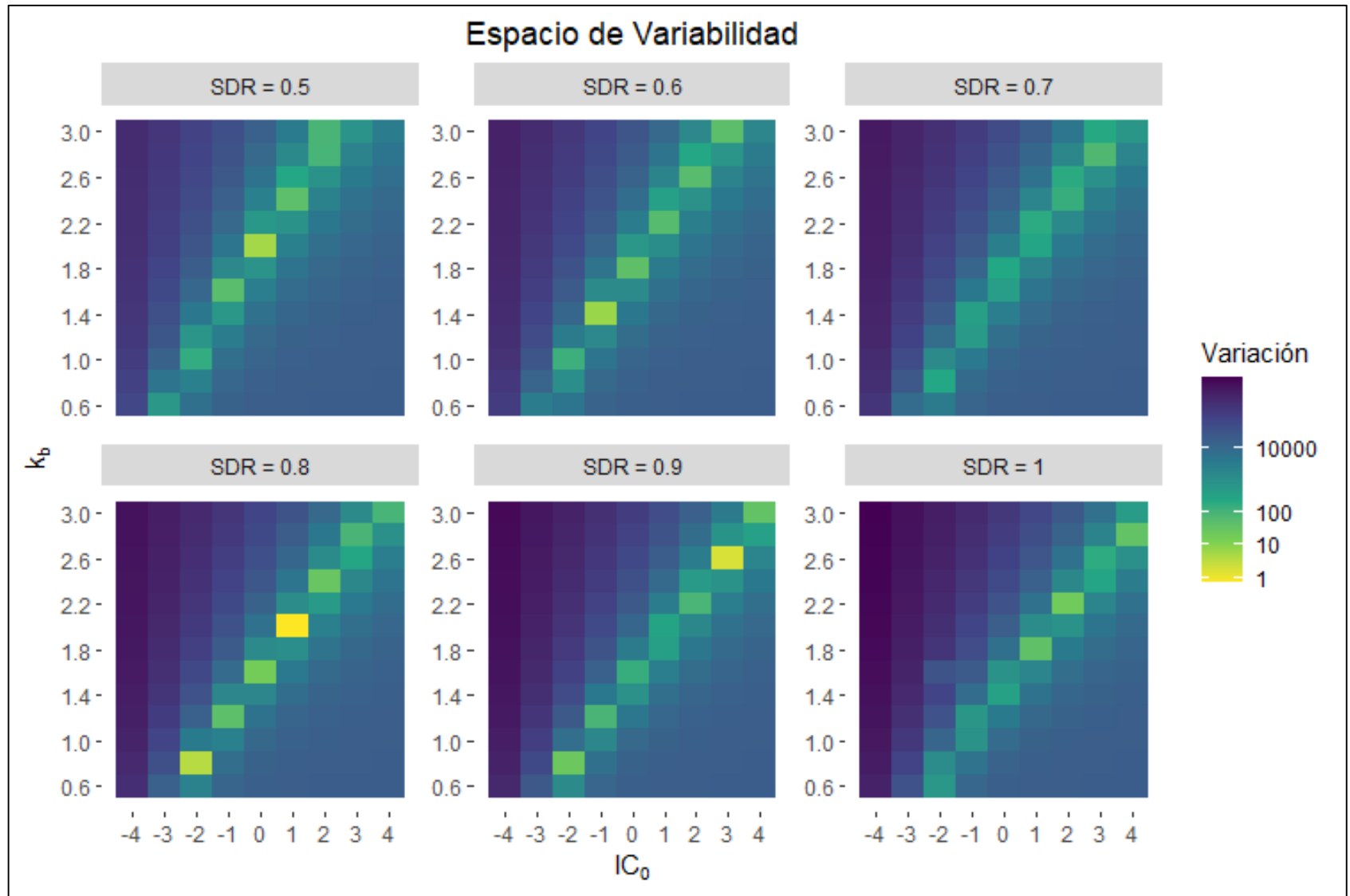


Figura 4-9. Espacio de variabilidad de los parámetros  $SDR_{m\acute{a}x}$ ,  $IC_0$  y  $k_b$

De la figura anterior se puede concluir que la combinación de valores que mejor representa la entrega de sedimentos en la cuenca del río Abangares es:

- $SDR_{m\acute{a}x}$ : 0,8
- $IC_0$ : 1
- $k_b$ : 2

Adicionalmente, en la Figura 4-9 se puede observar que existe una tendencia en los valores de mejor ajuste para cada uno de los conjuntos estudiados. Para determinar el origen de esta tendencia se realizó un análisis de sensibilidad, con el fin de conocer cómo influyen las variables de calibración sobre la producción de sedimentos.

Para el desarrollo del análisis de sensibilidad del efecto de las variables de calibración  $IC_0$  y  $k_b$ , se hizo una variación sistemática de los valores de una de las variables, mientras la otra se mantiene constante, con el objetivo de determinar el efecto individual de las variables sobre el modelo de producción de sedimentos.

Este análisis de sensibilidad del modelo se puede observar en la siguiente figura.

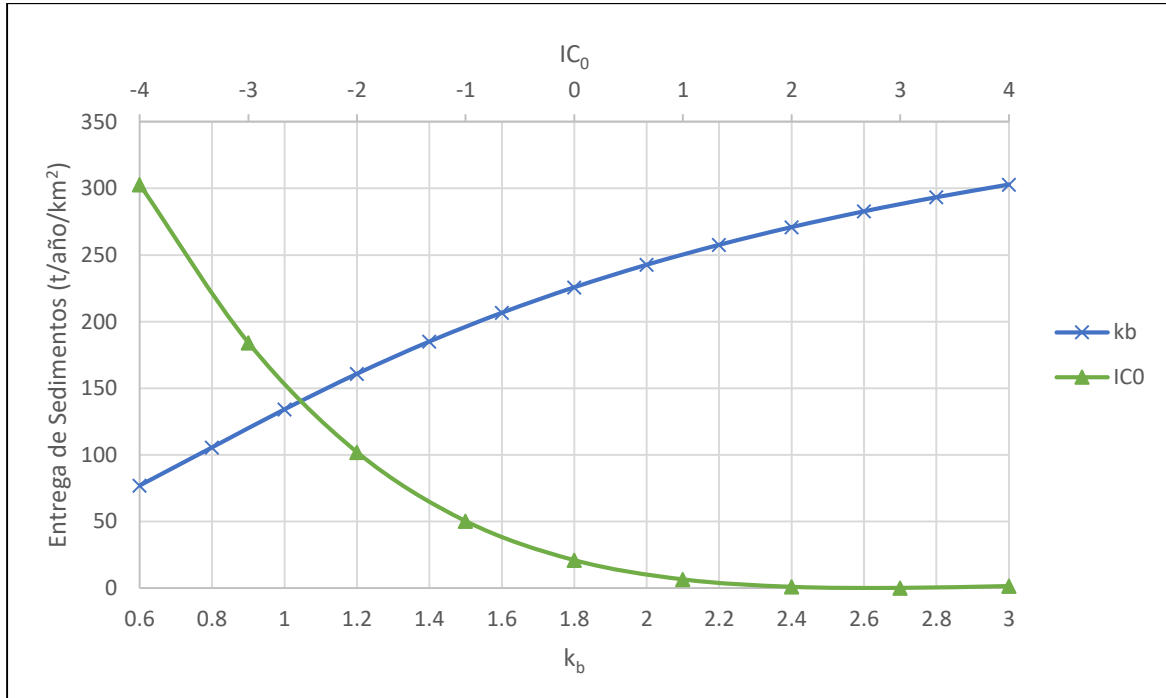


Figura 4-10. Análisis de sensibilidad de la estimación de producción de sedimentos, respecto a las variables de calibración  $IC_0$  y  $k_b$

En la Figura 4-10 se muestra el efecto que tiene cada una de las variables de calibración sobre la entrega de sedimentos. Mientras que al aumentar el valor de  $IC_0$  se disminuye la entrega de sedimentos, se tiene un efecto inverso y cuasiproportional con la variable  $k_b$ , ya que conforme esta aumenta, también lo hace el volumen de entrega de sedimentos.

El efecto de la interacción de ambas variables, genera una tendencia en los datos en donde la combinación de ambos factores conserva la proporcionalidad, sin embargo, al romperse esta condición, la variabilidad del modelo se intensifica.

La variable  $IC_0$  tiene un mayor peso en la estimación de los volúmenes de producción y la entrega de sedimentos, ya que como se puede observar en la Figura 4-10, esta variable tiene un decrecimiento más acelerado, respecto al crecimiento de la variable  $k_b$ .

## Capítulo 5 . Definición de las zonas de mayor potencial de producción de sedimentos

En este escenario se analizó la producción de sedimentos, bajo las condiciones de cobertura actual en la cuenca y sin aplicar metodologías de conservación de suelo, para determinar cuáles son las zonas dentro de la cuenca del río Abangares que son más vulnerables a la erosión.

Actualmente, a pesar de que se desarrollan actividades económicas relativas a la agricultura y a la ganadería, no se están aplicando medidas para evitar la pérdida del suelo por erosión hídrica. Es por esto que para este primer escenario, se mantiene un valor de factor  $P$  igual a 1 para todos los tipos de cobertura, simulando la inexistencia de prácticas de conservación de suelo.

En la Figura 5-1 se muestra el mapa de erosión potencial por rangos, a lo largo de toda el área de drenaje del río Abangares. En dicha figura se aprecia que las áreas más vulnerables a la erosión son aquellas que corresponden a los cultivos de café. En el Cuadro 5-1 se muestra el volumen de erosión potencial por tipo de cobertura.

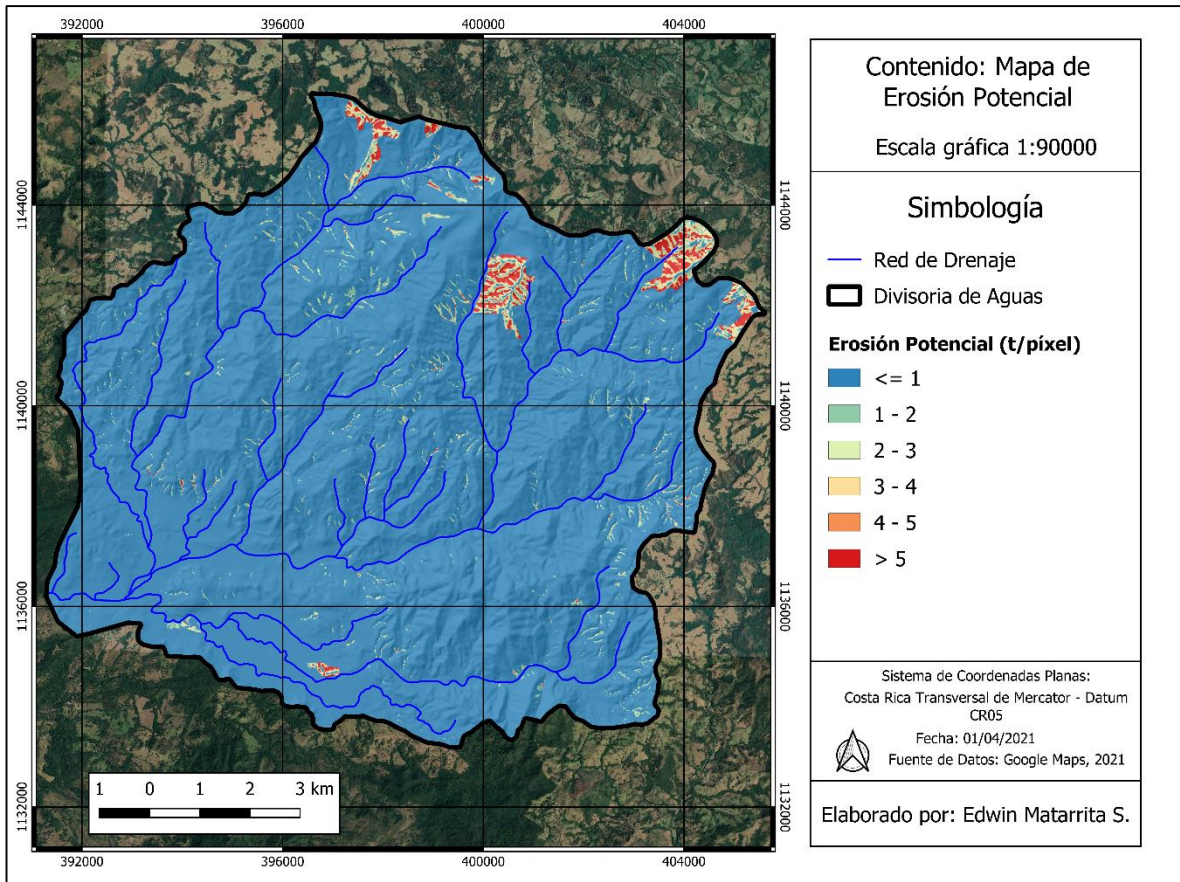


Figura 5-1. Mapa de la erosión potencial en la cuenca del río Abangares, delimitada hasta el punto de control de La Marimba para la condición actual

Cuadro 5-1. Erosión potencial por tipo de cobertura, para la condición actual de la cuenca

Cobertura y uso de suelo	Erosión total ( $\frac{t}{año}$ )	Erosión total (%)	Altura de lámina de suelo que se pierde (mm)
Bosque	47 044	12,3	0,8
Café	171 730	44,9	56,6
Charrales	75 417	19,7	3,5
Cultivos anuales	6 247	1,6	28,7
Pastos	76 899	20,1	4,5
Suelo desnudo	4 375	1,1	2,2
Urbano	495	0,1	0,3
<b>Total</b>	<b>382 207</b>	<b>100,0</b>	

Al obtener los resultados del análisis de la condición actual de la cuenca, se obtiene que la producción potencial total de sedimentos es de  $382\,207 \left(\frac{t}{año}\right)$  para toda la cuenca. Esto significa que se tiene un valor de producción promedio de  $31 \left(\frac{t}{ha \cdot año}\right)$ .

Por otro lado, se tiene que el volumen total de entrega de sedimentos a la red de drenaje y que eventualmente podría llegar hasta el punto de control del sitio de embalse La Marimba, corresponde a  $17\,626 \left(\frac{t}{año}\right)$ , lo que representa un valor promedio de  $1,4 \left(\frac{t}{ha \cdot año}\right)$ .

Estos valores de entrega de sedimentos equivalen a  $141 \left(\frac{t}{km^2 \cdot año}\right)$ , lo que implica una variación de únicamente 1,4% respecto al valor de referencia obtenido de los boletines de sedimento del ICE.

Las zonas con cobertura de cultivos de café, aportan aproximadamente un 45% del volumen total de sedimentos que se producen en la cuenca. La producción promedio para las zonas de producción de café es de aproximadamente  $492 \left(\frac{t}{ha \cdot año}\right)$  y una lámina de pérdida de suelo de hasta 56,6 mm.

Esto es una condición crítica, si se toma en consideración que el área destinada al cultivo de café corresponde únicamente a un 3% del total de la cuenca, pero aporta prácticamente la mitad del volumen potencial de sedimentos.

En estas zonas de cultivo de café se combinan varios factores para aumentar el volumen potencial de sedimentos, tales como la fuerte pendiente del terreno, la cual se puede ver en la siguiente figura.

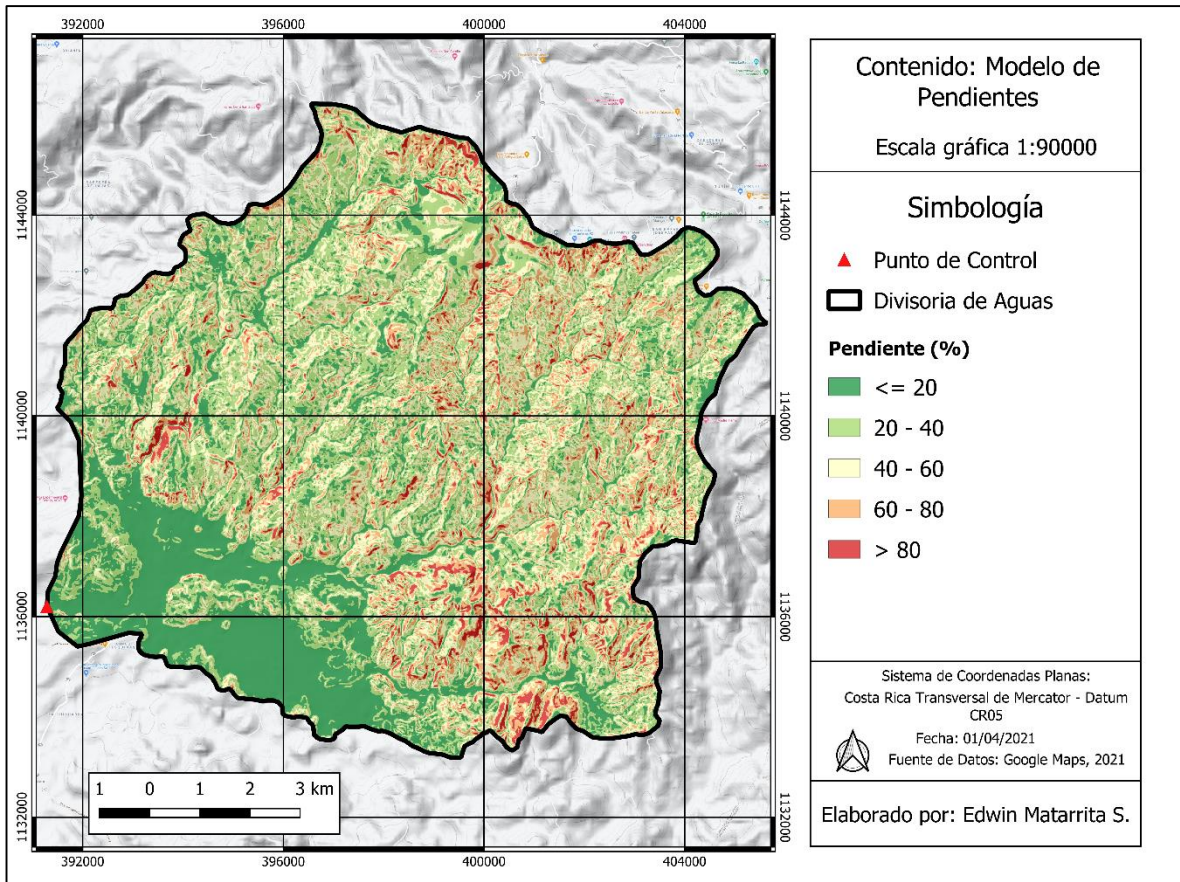


Figura 5-2. Modelo de pendientes de la cuenca del río Abangares

Como se ve en la figura anterior, las zonas donde se practica el cultivo de café corresponden a las regiones donde existen fuertes pendientes (mayores a 60%). Esto incide directamente en la producción de sedimentos ya que aumenta el valor del factor *LS*.

El modelo del factor *LS* para la cuenca del río Abangares se puede observar en la Figura 5-3. En dicha figura se verifica que las zonas del cultivo de café se ubican en las regiones donde la longitud y la magnitud de la pendiente favorecen la esorrentía y por lo tanto, el arrastre de sedimentos hacia los cauces de la red de drenaje.

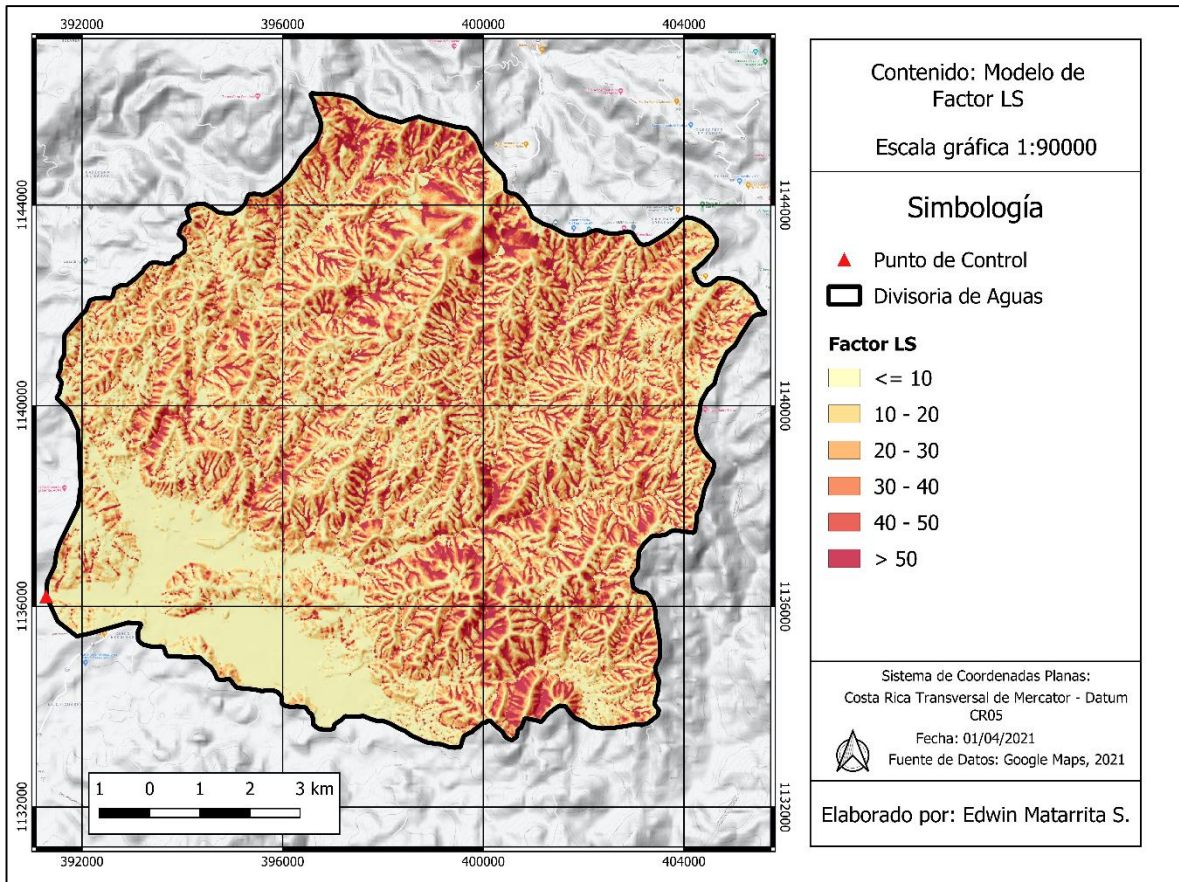


Figura 5-3. Modelo de factor LS en la cuenca del río Abangares

En la Figura 5-1 se puede ver además, que la mayoría del área de drenaje de la cuenca del río Abangares tiene una baja producción de sedimento. Para este caso se destaca la subcuenca del río San Juan, la cual posee fuertes pendientes como se puede observar en la Figura 5-2, pero sin embargo, la vulnerabilidad a la erosión es baja.

Esto se debe a que es una región con baja conectividad hidrológica. La conectividad hidrológica de la cuenca del río Abangares se puede observar en la siguiente figura.



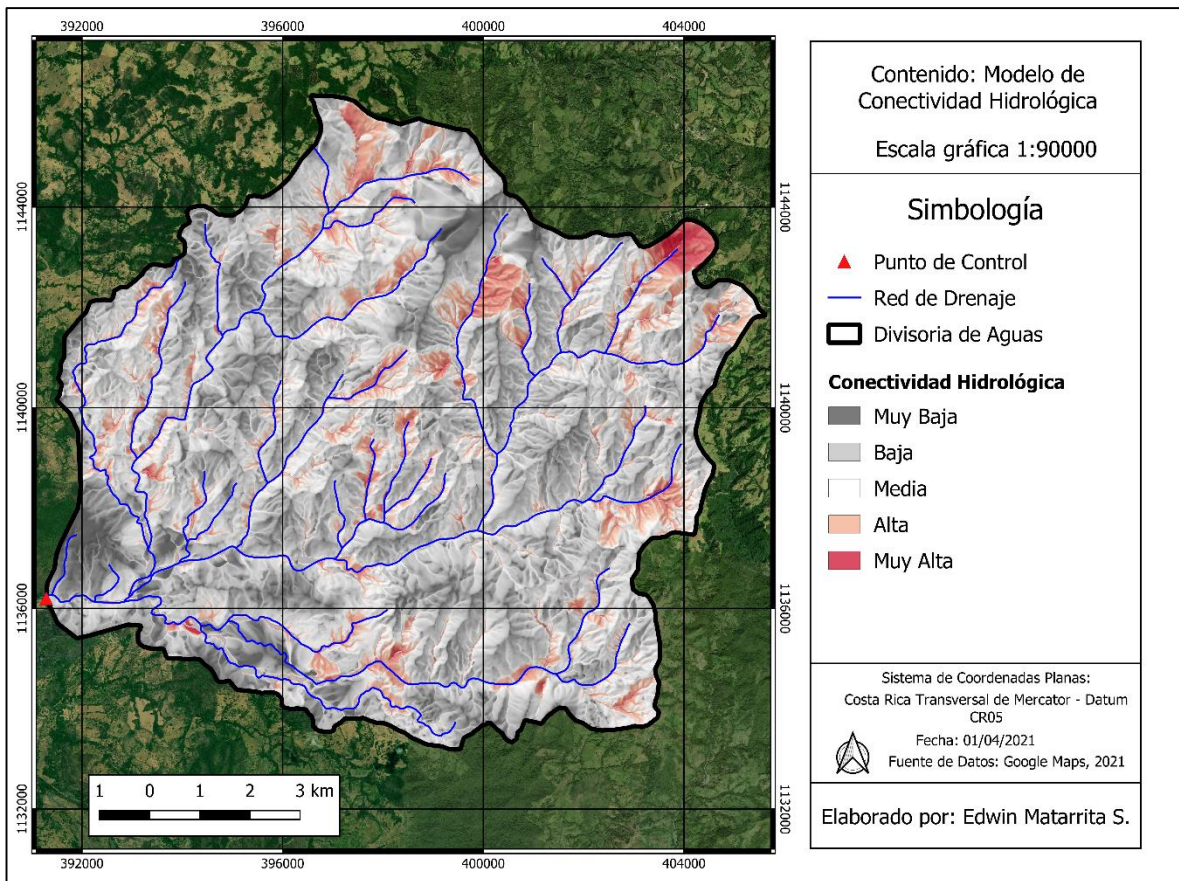


Figura 5-4. Modelo de conectividad hidrológica en la cuenca del río Abangares

Como se puede ver en la figura anterior, la mayor parte del área de drenaje de la cuenca se encuentra en una condición de conectividad hidrológica “muy baja” o “baja”. Esto quiere decir que, aunque el terreno tenga fuertes pendientes, es poco probable que el sedimento que se produce en estas regiones pueda ser transportado y alcanzar un cauce, por lo que será retenido dentro de las laderas, reduciendo así su vulnerabilidad a la erosión.

Esta condición se debe principalmente a que aproximadamente el 78% del área de la cuenca está cubierta por bosques y charrales. Esto implica no sólo que se protege el suelo de ser disgregado por la lluvia, sino que también la cobertura actúa amortiguando la escorrentía y reteniendo los sedimentos que en ella se transportan.

Las zonas donde se da una mayor conectividad hidrológica, se ubican donde están los cultivos de café, por lo que la suma de los distintos factores como recorridos cortos de ladera hasta alcanzar un cauce, la cobertura pobre, la fuerte pendiente y las altas intensidades de precipitación características de la parte alta de la cuenca, se integran para aumentar la vulnerabilidad a la erosión de estas regiones.

Aplicando este mismo análisis, pero a nivel de subcuenca, se obtienen los siguientes resultados.

Cuadro 5-2. Volumen anual potencial de sedimentos por subcuenca, para la condición actual

Subcuenca	Pérdida de suelo ( $\frac{t}{año}$ )	Aporte de sedimentos (%)	Entrega de sedimento ( $\frac{t}{año}$ )	SDR <sub>máx</sub> (%)
Abangares	1056	0,5	29	7
Aguas Claras	23 047	6	807	13
Boston	63 657	17	3 706	20
Gongolona	111 445	29	7 579	28
Interfluvio	41 594	11	1 058	14
San Juan	40 689	11	1 198	20
Santa Lucía	100 718	26	3 250	22
<b>Total</b>	<b>382 206</b>	<b>100</b>	<b>17 626</b>	Promedio = 20%

Del cuadro anterior se puede concluir que las subcuencas que presentan mayor producción de sedimentos, son las subcuencas del río Gongolona con un 29% del volumen total de sedimentos, y la subcuenca del río Santa Lucía con 26% del volumen total.

Utilizando los criterios de clasificación de la pérdida de suelo que detalla la (FAO, 1989), citado por (Gómez, 2002), se procedió a clasificar la pérdida de suelo en categorías de severidad. Esta clasificación se detalla en el siguiente cuadro.

Cuadro 5-3. Severidad de la erosión según la producción potencial anual

Pérdida de Suelo $\left(\frac{t}{ha \cdot año}\right)$	Severidad
0 – 10	Nula a ligera
10 – 50	Moderada
50 – 200	Severa
> 200	Muy severa

Fuente: (FAO, 1989)

Según el cuadro anterior, la cuenca del río Abangares delimitada hasta el punto de control de La Marimba, posee una condición de severidad moderada.

Empleando los criterios expuestos en el Cuadro 5-3, se procedió a clasificar la severidad de la erosión en cada una de las subcuencas que componen el área de drenaje del río Abangares, delimitada hasta el punto de control de La Marimba. En el siguiente cuadro se muestra dicha clasificación.

Cuadro 5-4. Severidad de la erosión en las subcuencas del río Abangares, para la condición actual

Subcuenca	Pérdida de suelo $\left(\frac{t}{ha \cdot año}\right)$	Severidad
Aguas Claras	21	Moderada
Boston	90	Severa
Gongolona	71	Severa
Interfluvio	16	Moderada
San Juan	16	Moderada
Santa Lucía	28	Moderada

Del cuadro anterior se extrae que las subcuencas con mayor vulnerabilidad a la erosión, son las subcuencas de los ríos Boston y Gongolona. En estas se presenta la mayor densidad de los cultivos de café, además de que poseen terrenos con pendientes pronunciadas y mayor conectividad hidrológica, lo que favorece los procesos de erosión.

# Capítulo 6 . Escenarios de la implementación de prácticas y técnicas de conservación de suelo

Para estos escenarios analizados, las condiciones de la pendiente, la erosividad, la erodabilidad, factor  $LS$  y la conectividad hidrológica se mantienen invariantes, al ser características intrínsecas de la cuenca del río Abangares.

## 6.1. Escenario 1: Evaluación de terrazas en los cultivos de café

Las zonas donde se cultiva el café son las más vulnerables a sufrir erosión, por lo que en este escenario se analiza la producción de sedimentos bajo el supuesto de que en los 3,5 km<sup>2</sup> que corresponden a dicho cultivo, se implementa la práctica de cultivo por medio de terrazas.

La práctica de cultivo en terrazas tiene una eficiencia de retención de sedimentos de aproximadamente un 80%, por lo que se quiere conocer qué efecto tiene al implementarse dentro de la cuenca del río Abangares.

Para la implementación de las prácticas de conservación dentro del modelo, se aplicó el valor del factor  $P$  que corresponde a terrazas dentro del cuadro biofísico, el cual se muestra a continuación.

Cuadro 6-1. Cuadro biofísico con los valores de los factores *C* y *P* utilizados para el modelado de la producción de sedimento bajo el escenario de la implementación de terrazas

Descripción	lucode	usle_c	usle_p
Café	1	0,09	0,12
Charral	2	0,012	1
Bosque	3	0,007	1
Urbano	4	0,0065	1
Pasto	5	0,013	1
Suelo desnudo	6	1	1
Cultivos anuales	7	0,65	1

En la Figura 6-1 se muestra el mapa de erosión potencial por rangos, a lo largo de toda el área de drenaje del río Abangares para el escenario con la implementación de terrazas para los cultivos de café. Adicionalmente, en el Cuadro 6-2 se muestra el volumen de erosión potencial por tipo de cobertura de este escenario.

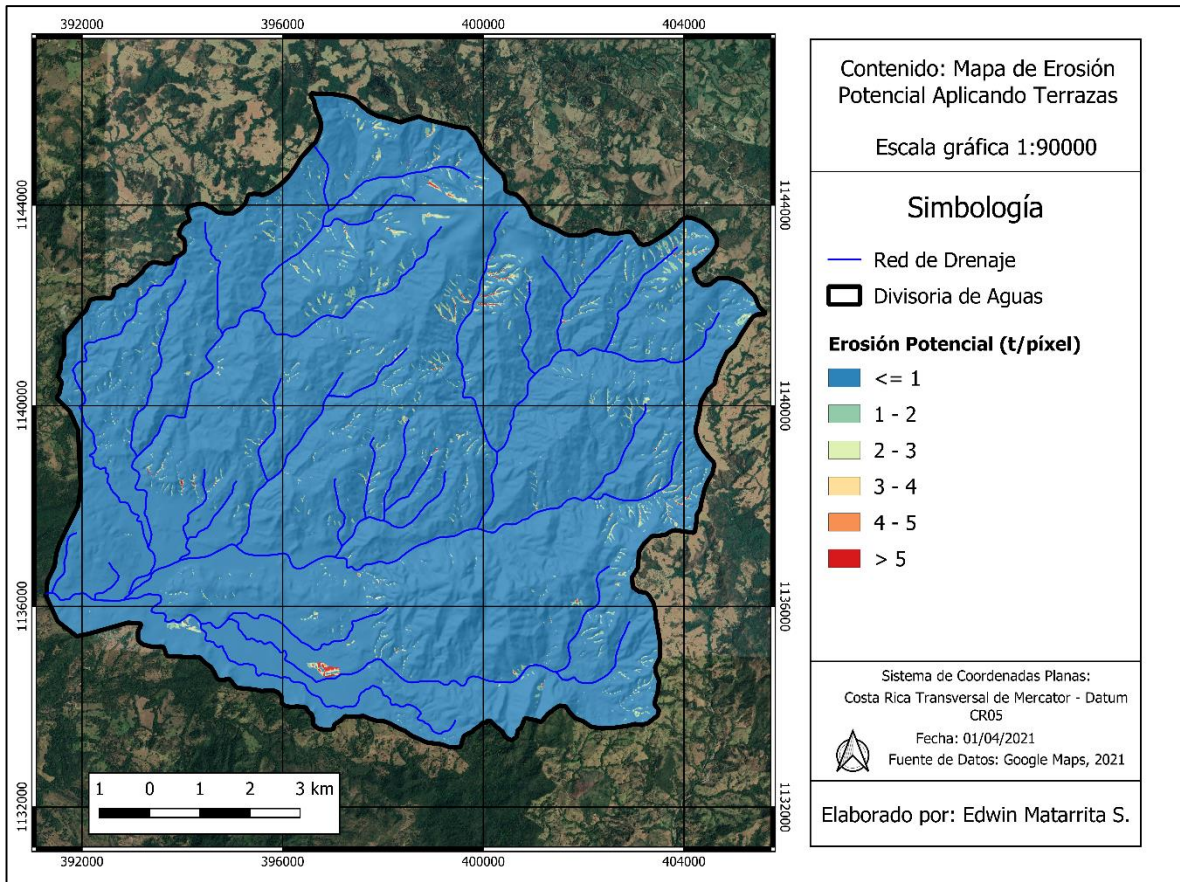


Figura 6-1. Mapa de la erosión potencial en la cuenca del río Abangares, cuando se implementan terrazas

Cuadro 6-2. Erosión potencial por el tipo de cobertura, cuando se implementan terrazas

Cobertura y uso de suelo	Erosión total ( $\frac{t}{año}$ )	Erosión total (%)	Altura de lámina de suelo que se pierde (mm)
Bosque	47 044	20,3	0,8
Café	21 778	9,4	7,2
Charrales	75 417	32,5	3,5
Cultivos anuales	6 247	2,7	28,7
Pastos	76 899	33,1	4,5
Suelo desnudo	4 375	1,9	2,2
Urbano	495	0,2	0,3
<b>Total</b>	<b>232 255</b>	<b>100,0</b>	

Al implementar terrazas dentro del modelo, se da una disminución en el volumen potencial de la producción de sedimentos. Para este caso de estudio, la producción potencial total es de  $232\,255 \left(\frac{t}{año}\right)$ , lo que representa una reducción del 40% respecto a la condición actual. Adicionalmente, la producción promedio en toda la cuenca se reduce a  $19 \left(\frac{t}{ha\,año}\right)$ .

Por otro lado, se tiene que el volumen total de entrega de sedimentos a la red de drenaje, corresponde a  $8\,417 \left(\frac{t}{año}\right)$ , lo que representa un valor promedio de  $0,7 \left(\frac{t}{ha\,año}\right)$  y una reducción del 53% respecto a la condición actual en el volumen sedimentos que pueden llegar hasta el sitio de embalse de La Marimba.

Utilizando la clasificación de severidad expuesta en el Cuadro 5-3, se tiene que al implementar las terrazas en las zonas con cultivos de café, la severidad de la erosión en la cuenca del río Abangares delimitada hasta el sitio de control de La Marimba mantiene una condición de severidad moderada.

A nivel de subcuenca, se obtienen los siguientes resultados.

Cuadro 6-3. Volumen potencial anual de sedimentos por subcuenca, cuando se implementan terrazas

Subcuenca	Pérdida de suelo ( $\frac{t}{año}$ )	Erosión total (%)	Entrega de sedimento ( $\frac{t}{año}$ )	SDR <sub>máx</sub> (%)
Abangares	1 770	1	29	7
Aguas Claras	23 355	10	807	13
Boston	19 192	8	956	20
Gongolona	31 604	14	1 721	28
Interfluvio	41 887	18	1 258	14
San Juan	41 024	18	1 398	20
Santa Lucía	73 423	32	2 249	22
<b>Total</b>	<b>232 255</b>	<b>100</b>	<b>8 417</b>	Promedio = 20%

Para este escenario, las subcuencas que presentan mayor producción de sedimentos son las subcuencas del río San Juan e Interfluvio con un 18% del volumen total de sedimentos, y la del río Santa Lucía con 31%. Se observa además que la subcuenca del río Boston sufrió una reducción en su producción de sedimentos.

Utilizando la clasificación de severidad de la (FAO, 1989), se catalogó la severidad de la erosión en las subcuencas bajo el escenario de la implementación de terrazas. En el siguiente cuadro se muestra dicha clasificación.



Cuadro 6-4. Severidad de la erosión en las subcuencas del río Abangares, implementando terrazas

Subcuenca	Pérdida de suelo $\left(\frac{t}{ha \cdot año}\right)$	Severidad	Reducción respecto a condición actual (%)
Aguas Claras	21	Moderada	0
Boston	27	Moderada	70
Gongolona	20	Moderada	72
Interfluvio	16	Moderada	0
San Juan	16	Moderada	0
Santa Lucía	20	Moderada	29

Del cuadro anterior se concluye que existe una reducción considerable, de aproximadamente un 70%, en la producción de sedimentos en las cuencas de los ríos Boston y Gongolona, por lo que la implementación de terrazas como herramienta de conservación de suelos es eficaz en la mitigación de la erosión hídrica.

Las terrazas a pesar de tener alta eficacia de atrape de sedimentos, pueden constituir un método de conservación de suelo oneroso y difícil de implementar, es por esto que los agricultores costarricenses se sienten reacios de implementarlas en sus cultivos. Por lo que se analizaron otras alternativas de prácticas de conservación de suelo más factibles de implementar, como lo es el cultivo en curvas de nivel.

A pesar de no tener la misma eficacia en la mitigación de la erosión, la siembra en curvas de nivel es una medida más sencilla de implementar y asequible a la economía de los agricultores.

## 6.2. Escenario 2: Evaluación del cultivo en curvas de nivel en los cultivos de Café

En este escenario se analiza la producción de sedimentos bajo el supuesto de que en los 3,5 km<sup>2</sup> que corresponden al cultivo de café, se implementa la práctica de cultivo curvas de nivel.

Para la implementación de las prácticas de conservación dentro del modelo, se aplicó el factor *P* que corresponde a cultivo en curvas de nivel dentro del cuadro biofísico, el cual se muestra a continuación.

Cuadro 6-5. Cuadro biofísico con los valores de factores *C* y *P* utilizados para el modelado de la producción de sedimento bajo el escenario de la implementación de cultivo en curvas de nivel

Descripción	lucode	usle_c	usle_p
Café	1	0,09	0,60
Charral	2	0,012	1
Bosque	3	0,007	1
Urbano	4	0,0065	1
Pasto	5	0,013	1
Suelo desnudo	6	1	1
Cultivos anuales	7	0,65	1

En la Figura 6-2 se muestra el mapa de erosión potencial por rangos, a lo largo de toda el área de drenaje del río Abangares. Para este escenario, las zonas donde se cultiva café se mantienen como las más vulnerables a sufrir erosión. En el Cuadro 6-6 se muestra el volumen de erosión potencial por tipo de cobertura.

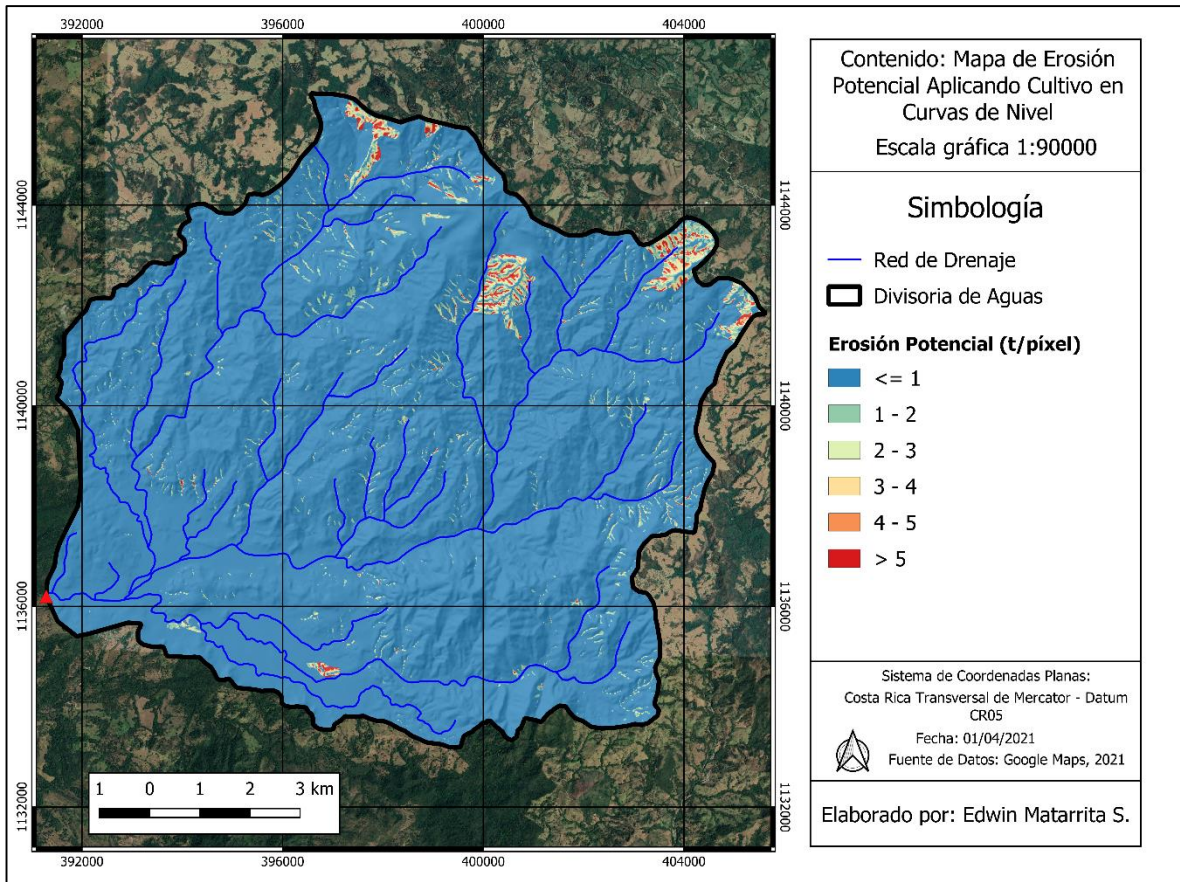


Figura 6-2. Mapa de erosión potencial en la cuenca del río Abangares, cuando se implementa el cultivo en curvas de nivel

Cuadro 6-6. Erosión potencial por tipo de cobertura, cuando se implementa el cultivo en curvas de nivel

Cobertura y uso de suelo	Erosión total ( $\frac{t}{año}$ )	Erosión total (%)	Altura de lámina de suelo que se pierde (mm)
Bosque	47 044	14,7	0,8
Café	108 795	34,1	35,8
Charrales	75 417	23,6	3,5
Cultivos Anuales	6 247	2,0	28,7
Pastos	76 899	24,1	4,5
Suelo Desnudo	4 375	1,4	2,2
Urbano	495	0,2	0,3
<b>Total</b>	<b>319 272</b>	<b>100,0</b>	

Para este escenario, la reducción en la pérdida de suelo no es tan significativa como en el caso de las terrazas, sin embargo, se nota una reducción en la erosión respecto a la condición actual.

Al implementar la práctica de cultivo en curvas de nivel, la producción total potencial de sedimentos es de 319 272  $\left(\frac{t}{año}\right)$ , lo que representa una reducción del 16% respecto a la condición actual y un aumento del 27% respecto al escenario de las terrazas.

La producción promedio de sedimentos para este escenario es de 26  $\left(\frac{t}{ha \cdot año}\right)$ . Además, se tiene que el volumen total de entrega de sedimentos a la red de drenaje y que eventualmente llega hasta el punto de control del sitio de embalse La Marimba, corresponde a 13 034  $\left(\frac{t}{año}\right)$ , lo que implica un valor promedio de 1,0  $\left(\frac{t}{ha \cdot año}\right)$  y una reducción del 28% en el volumen sedimentos que pueden llegar hasta el sitio de embalse respecto a la condición actual.

Utilizando la clasificación de severidad expuesta en el Cuadro 5-3, se tiene que al implementar la práctica del cultivo en curvas de nivel a las zonas productoras de café, la severidad de la erosión en la cuenca del río Abangares delimitada hasta el sitio de control de La Marimba, mantiene una condición de severidad moderada.

A nivel de las subcuencas, se obtienen los siguientes resultados.

Cuadro 6-7. Volumen potencial anual de sedimentos por subcuenca, cuando se implementa el cultivo en curvas de nivel

Subcuenca	Pérdida de suelo ( $\frac{t}{año}$ )	Erosión total (%)	Entrega de sedimento ( $\frac{t}{año}$ )	SDR <sub>máx</sub> (%)
Abangares	1 771	1	28	7
Aguas Claras	23 355	7	766	13
Boston	43 981	14	2 236	20
Gongolona	73 085	23	4 369	28
Interfluvio	39 292	12	1 195	14
San Juan	41 024	13	1 321	20
Santa Lucía	96 764	30	3 119	22
<b>Total</b>	319 272	100	13 034	Promedio = 20%

De acuerdo con la información del cuadro anterior se observa que, para las condiciones analizadas en este escenario, las subcuencas que presentan mayor producción de sedimentos son las subcuencas del río Gongolona y la del río Santa Lucía con un 23% y un 30% del volumen total respectivamente.

Adicionalmente, se clasificó la severidad de la erosión en cada una de las subcuencas bajo este escenario. En el siguiente cuadro se muestra dicha clasificación.

Cuadro 6-8. Severidad de la erosión en las subcuencas del río Abangares, cuando se implementa el cultivo en curvas de nivel

Subcuenca	Pérdida de Suelo $\left(\frac{t}{ha \cdot año}\right)$	Severidad	Reducción Respecto a Condición Actual (%)
Aguas Claras	21	Moderada	0
Boston	62	Severa	31
Gongolona	48	Moderada	32
Interfluvio	16	Moderada	0
San Juan	16	Moderada	0
Santa Lucía	28	Moderada	0

Del cuadro anterior se concluye que existe una reducción en la producción de sedimentos en las cuencas de los ríos Boston y Gongolona respecto a la condición actual, por lo que la implementación de la práctica de cultivos en curvas de nivel como herramienta de conservación de suelos es eficaz en la reducción de la producción de sedimentos.

La subcuenca del río Boston posee una vulnerabilidad a la erosión severa al implementar el cultivo en curvas de nivel.

El cultivo en curvas de nivel es una práctica de conservación de suelos más accesible para los agricultores y que requiere de una menor intervención al terreno de la cuenca. Adicionalmente por sí misma mejora y ayuda a mitigar la erosión y conservar el suelo, sin embargo, esta práctica se puede optimizar y aumentar su eficacia si se combina con otras técnicas de conservación de suelo.

### **6.3. Escenario 3: Evaluación de bermas filtrantes de compost, como complemento al cultivo en curvas de en cultivos de café**

En este escenario se analiza la producción de sedimentos bajo el supuesto de que en los 3,5 km<sup>2</sup> que corresponden al cultivo de café, se implementan técnicas de conservación de suelos como complemento a la práctica de cultivos en curvas de nivel. Particularmente, se analizó la implementación de bermas filtrantes de compost, conocidas coloquialmente como “terracetas”.

Al aplicar las bermas filtrantes de compost a los cultivos en curvas de nivel, se aumenta la eficacia de retención de sedimentos, se favorece la retención de nutrientes y la infiltración, lo que mitiga los caudales de escorrentía que podrían eventualmente arrastrar sedimentos y mejora la productividad de los cultivos.

Para la conformación de las bermas filtrantes de compost, el material puede venir del producto del desrame de las matas de café, el control de malezas, hojarasca y materia orgánica presente en los cafetales.

Para la implementación de esta técnica de conservación de suelo dentro del modelo, se utilizó el factor  $P$  que corresponde a bermas filtrantes de compost dentro del cuadro biofísico, el cual se muestra a continuación.

Cuadro 6-9. Cuadro biofísico con los valores de factores *C* y *P* utilizados para el modelado de la producción de sedimento cuando se implementa el cultivo en curvas de nivel complementado con bermas de compost

Descripción	lucode	usle_c	usle_p
Café	1	0,09	0,16
Charral	2	0,012	1
Bosque	3	0,007	1
Urbano	4	0,0065	1
Pasto	5	0,013	1
Suelo Desnudo	6	1	1
Cultivos Anuales	7	0,65	1

En la Figura 6-3 se muestra el mapa de la erosión potencial por rangos, a lo largo de toda el área de drenaje del río Abangares para este escenario.

Para este caso de estudio se reduce la vulnerabilidad a la erosión de las zonas donde se cultiva café. En el Cuadro 6-10 se muestra el volumen de la erosión potencial por tipo de cobertura.



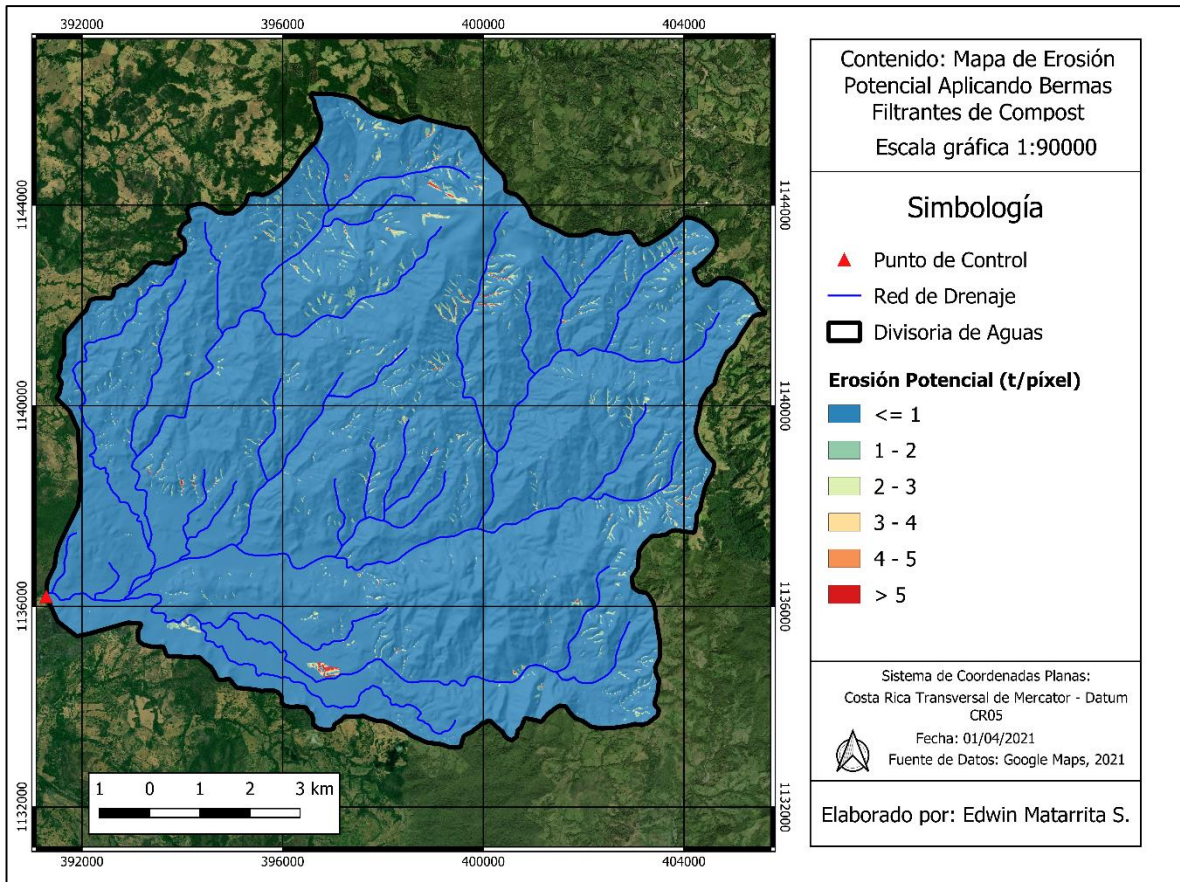


Figura 6-3. Mapa de la erosión potencial en la cuenca del río Abangares, cuando se implementa el cultivo en curvas de nivel con bermas de compost

Cuadro 6-10. Erosión potencial por tipo de cobertura, cuando se implementa el cultivo en curvas de nivel con bermas de compost

Cobertura y uso de suelo	Erosión total ( $\frac{t}{año}$ )	Erosión total (%)	Altura de la lámina de suelo que se pierde (mm)
Bosque	47 044	19,9	0,8
Café	25 778	10,9	8,5
Charrales	75 417	31,9	3,5
Cultivos anuales	6 247	2,6	28,7
Pastos	76 899	32,5	4,5
Suelo desnudo	4 375	1,9	2,2
Urbano	495	0,2	0,3
<b>Total</b>	<b>236 255</b>	<b>100,0</b>	

Para este escenario, la reducción en la pérdida de suelo es similar al caso en el que se implementaron las terrazas como práctica de conservación de suelos. La diferencia entre ambos escenarios es de únicamente 2%

A partir los resultados de este escenario, se puede observar la disminución en el volumen potencial de sedimentos, producto de la implementación de las bermas de compost al cultivo en curvas de nivel.

La producción total potencial es de 236 255  $\left(\frac{t}{año}\right)$ , lo que representa una reducción del 38% respecto al escenario actual. Adicionalmente, la producción promedio en toda la cuenca se reduce a 19  $\left(\frac{t}{ha año}\right)$ .

Por otro lado, se tiene que el volumen total de entrega de sedimentos a la red de drenaje, corresponde a 8 595  $\left(\frac{t}{año}\right)$ , lo que representa un valor promedio de 0,7  $\left(\frac{t}{ha año}\right)$  y una reducción del 51% respecto a la condición actual en el volumen sedimentos que pueden llegar hasta el sitio de embalse.

A nivel de subcuenca, se obtienen los siguientes resultados.

Cuadro 6-11. Volumen potencial anual de sedimentos por subcuenca, cuando se implementa el cultivo en curvas de nivel con bermas filtrantes de compost

Subcuenca	Pérdida de suelo ( $\frac{t}{año}$ )	Erosión total (%)	Entrega de sedimento ( $\frac{t}{año}$ )	SDR <sub>máx</sub> (%)
Abangares	1770	1	31	7
Aguas Claras	23 047	10	842	13
Boston	19 613	8	880	20
Gongolona	34 689	15	1 531	28
Interfluvio	40 689	17	1 315	14
San Juan	41 594	18	1 451	20
Santa Lucía	74 853	32	2 545	22
<b>Total</b>	<b>236 255</b>	<b>100</b>	<b>8 595</b>	Promedio = 20%

Para este escenario, las subcuencas que presentan mayor producción de sedimentos son las subcuencas del río San Juan con un 18% del volumen total de sedimentos, y la del río Santa Lucía con 32%.

Utilizando la clasificación de severidad de la (FAO, 1989), se clasificó la severidad de la erosión en las subcuencas bajo el escenario de la implementación de las bermas de compost al cultivo en curvas de nivel. En el siguiente cuadro se muestra dicha clasificación.

Cuadro 6-12. Severidad de la erosión en las subcuencas del río Abangares, cuando se implementa el cultivo en curvas de nivel con bermas de compost

Subcuenca	Pérdida de suelo $\left(\frac{t}{ha \cdot año}\right)$	Severidad	Reducción respecto a la condición actual (%)
Aguas Claras	21	Moderada	0
Boston	29	Moderada	68
Gongolona	22	Moderada	69
Interfluvio	16	Moderada	0
San Juan	16	Moderada	0
Santa Lucía	20	Moderada	29

Del cuadro anterior se concluye que existe una reducción considerable en la producción de sedimentos, respecto a la condición actual de la cuenca.

La producción de sedimentos en las subcuencas de los ríos Boston y Gongolona es de aproximadamente 70%. Esto significa que la implementación de las bermas de compost como complemento a la práctica de cultivos en curvas de nivel, tiene una alta eficacia en la conservación de suelos.

Finalmente, los terrenos con cobertura de pasto son principalmente utilizados para pastoreo y corta. Estos terrenos aportan aproximadamente un 20% del volumen total de sedimentos que se produce en la cuenca del río Abangares. Es por esto que se evaluó también el escenario en el que se implementan las técnicas de conservación de suelo detalladas en el Cuadro 3-9.

## 6.4. Escenario 4: Evaluación de trampas de sedimentos en suelos dedicados a la ganadería

En este escenario se analiza la producción de sedimentos bajo el supuesto de que en los aproximadamente 20 km<sup>2</sup> que corresponden a pastos, se implementen técnicas de conservación de suelo, específicamente trampas de sedimentos.

Se eligen las trampas de sedimentos ya que son consideradas como de bajo costo y fácil implementación.

Para la aplicación de las trampas de sedimentos dentro del modelo, se implementó el factor *P* que corresponde a las técnicas de conservación de suelo dentro del cuadro biofísico, el cual se muestra a continuación.

Cuadro 6-13. Cuadro biofísico con los valores de factores *C* y *P* utilizados para el modelado de producción de sedimento bajo el escenario de la implementación de trampas de sedimento en pastos dedicados a la ganadería

Descripción	lucode	usle_c	usle_p
Café	1	0,09	1
Charral	2	0,012	1
Bosque	3	0,007	1
Urbano	4	0,0065	1
Pasto	5	0,013	0,35
Suelo desnudo	6	1	1
Cultivos anuales	7	0,65	1

En la Figura 6-4 se muestra el mapa de la erosión potencial por rangos, a lo largo de toda el área de drenaje del río Abangares, bajo el escenario de implementación de las trampas de sedimentos.

En el Cuadro 6-14 se muestra el volumen de erosión potencial por tipo de cobertura.

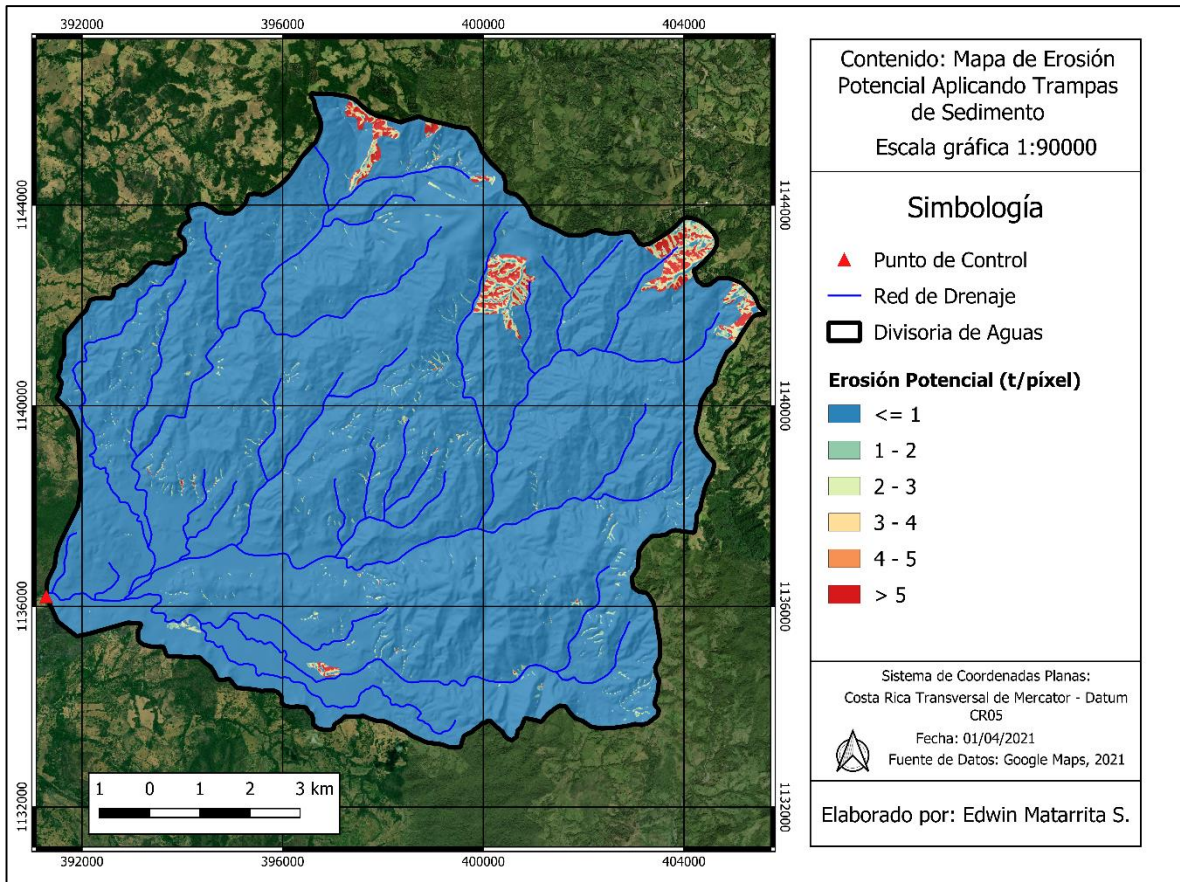


Figura 6-4. Mapa de la erosión potencial en la cuenca del río Abangares, cuando se implementan las trampas de sedimento en pastos

Cuadro 6-14. Erosión potencial por tipo de cobertura, cuando se implementan las trampas de sedimento en pastos

Cobertura y uso de Suelo	Erosión total ( $\frac{t}{año}$ )	Erosión total (%)	Altura de la lámina de suelo que se pierde (mm)
Bosque	47 044	14,3	0,8
Café	171 730	52,1	56,6
Charrales	75 417	22,9	3,5
Cultivos Anuales	6 247	1,9	28,7
Pastos	24 500	7,4	1,4
Suelo Desnudo	4 375	1,3	2,2
Urbano	495	0,2	0,3
<b>Total</b>	<b>329 808</b>	<b>100,0</b>	

En este escenario, se da una reducción en la erosión respecto a la condición actual. La producción potencial total de sedimentos es de 329 808  $\left(\frac{t}{año}\right)$ , lo que representa una reducción del 14% respecto al escenario actual. Asimismo, la producción promedio de sedimentos para este escenario es de 26  $\left(\frac{t}{ha \cdot año}\right)$  para toda el área de drenaje.

Para este caso de estudio, se tiene que el volumen total de entrega de sedimentos es de 17 119 t/año, lo que corresponde a un valor promedio de 1,4  $\left(\frac{t}{ha \cdot año}\right)$  y una reducción del 3% en el volumen sedimentos que pueden llegar hasta el sitio de embalse respecto a la condición actual.

Adicionalmente, se tiene que al implementar las trampas de sedimentos a los terrenos con cobertura de pasto, la severidad de la erosión en la cuenca, mantiene una condición de severidad moderada.

A nivel de subcuenca, se obtienen los siguientes resultados.

Cuadro 6-15. Volumen potencial anual de sedimentos por subcuenca, cuando se implementan las trampas de sedimento en pastos dedicados a la ganadería

Subcuenca	Pérdida de suelo $\left(\frac{t}{año}\right)$	Erosión total (%)	Entrega de sedimento $\left(\frac{t}{año}\right)$	SDR <sub>máx</sub> (%)
Abangares	1583	1	28	7
Aguas Claras	12 665	4	428	13
Boston	61 609	19	3 635	20
Gongolona	88 987	27	7 127	28
Interfluvio	37 439	11	1 153	14
San Juan	38 810	12	1 388	20
Santa Lucía	88 715	27	3 360	22
<b>Total</b>	<b>329 808</b>	<b>100</b>	<b>17 119</b>	Promedio = 20%

Como se observa en el cuadro anterior, las subcuencas que presentan mayor producción de sedimentos, son las subcuencas del río Gongolona y la del río Santa Lucía con un 30% y un 26% del volumen total de manera respectiva.

Siguiendo los lineamientos de la (FAO, 1989), se clasificó la severidad de la erosión en cada una de las subcuencas que componen el área de drenaje del río Abangares bajo este escenario. En el siguiente cuadro se muestra dicha clasificación.

Cuadro 6-16. Severidad de la erosión en las subcuencas del río Abangares, cuando se implementan las trampas de sedimento en pastos dedicados a la ganadería

Subcuenca	Pérdida de suelo $\left(\frac{t}{ha \cdot año}\right)$	Severidad	Reducción respecto al escenario actual (%)
Aguas Claras	11	Moderada	48
Boston	87	Severa	3
Gongolona	56	Severa	21
Interfluvio	14	Moderada	13
San Juan	15	Moderada	4
Santa Lucía	25	Moderada	11

Bajo las condiciones de este escenario, existe una reducción en la producción de sedimentos en todas las subcuencas del río Abangares, principalmente en la cuenca del río Aguas Claras.

Esto es un resultado importante, si se toma en consideración que el río Aguas Claras abastece al acueducto municipal de la ciudad de Las Juntas, por lo que la implementación de técnicas de conservación de suelos como un mecanismo de la reducción de la erosión, puede resultar en una reducción de costos en el tratamiento del agua.

Sin embargo, para este escenario al no contemplarse ningún tipo de manejo de los cultivos de café de la parte alta, las condiciones de severidad de la erosión en las cuencas de los ríos Boston y Gongolona se catalogan nuevamente como severas.



## 6.5. Escenario 5: Evaluación de la implementación conjunta de prácticas de conservación de Suelo en la cuenca del río Abangares

En este escenario se analiza la producción de sedimentos en la cuenca del río Abangares, cuando se implementan dentro del modelo, la práctica de cultivos en curvas de nivel complementados con bermas filtrantes de compost, en conjunto con las trampas de sedimento a los terrenos con cobertura de pastos dedicados a la ganadería.

Se eligen estas metodologías ya que son la que probaron ser más eficaces en la retención de sedimentos, y que adicionalmente son de bajo costo y fácil implementación. Esto facilitaría su aceptación por parte de los agricultores y ganaderos del cantón de Abangares.

Para la aplicación de estas prácticas de conservación, se implementaron los factores *P* que correspondientes dentro del cuadro biofísico, el cual se muestra a continuación.

Cuadro 6-17. Cuadro biofísico con los valores de factores *C* y *P* utilizados para el modelado de producción de sedimento bajo el escenario de implementación conjunta de prácticas de conservación de suelo

Descripción	lucode	usle_c	usle_p
Café	1	0,09	0,16
Charral	2	0,012	1
Bosque	3	0,007	1
Urbano	4	0,0065	1
Pasto	5	0,013	0,35
Suelo Desnudo	6	1	1
Cultivos Anuales	7	0,65	1

En la Figura 6-5 se muestra el mapa de erosión potencial por rangos, a lo largo de toda el área de drenaje del río Abangares, bajo el escenario de implementación de técnicas de conservación de suelos.

En el Cuadro 6-18 se muestra el volumen de erosión potencial por tipo de cobertura.

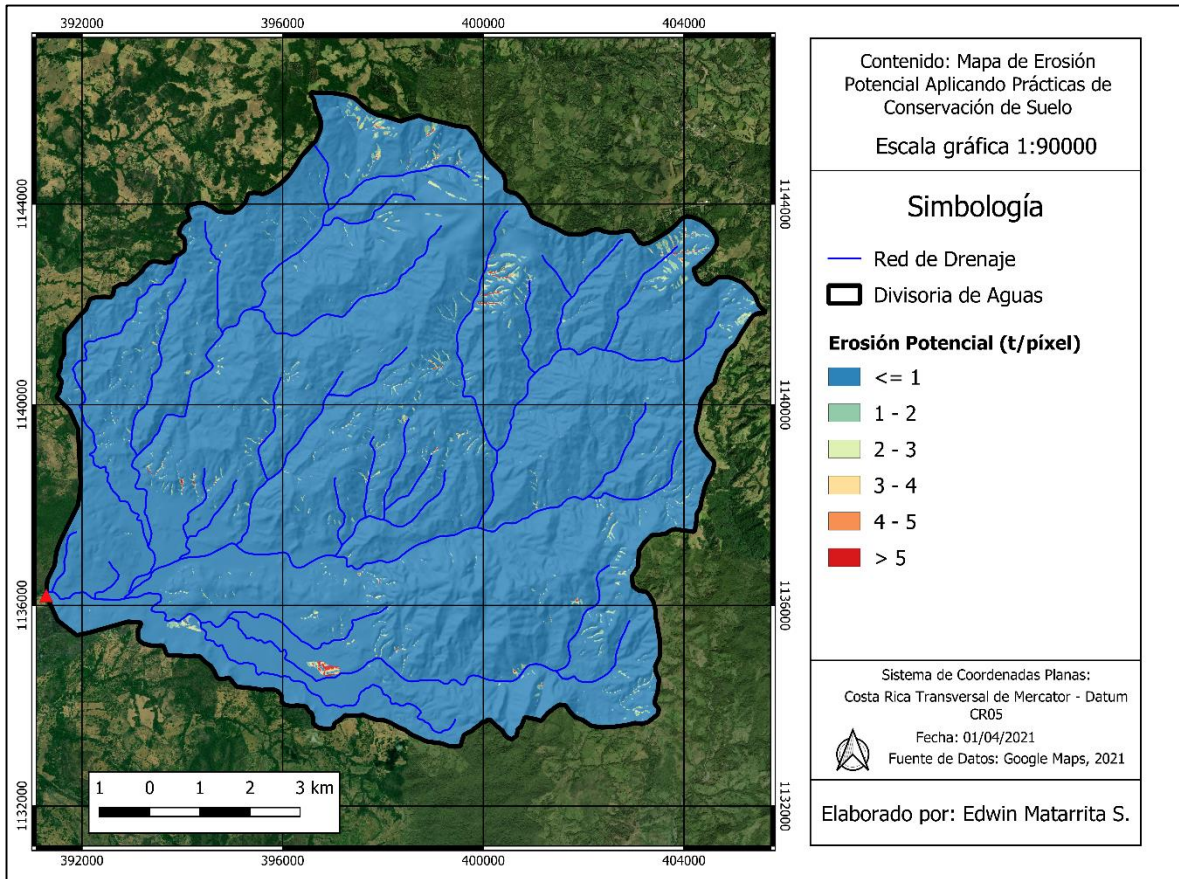


Figura 6-5. Mapa de erosión potencial en la cuenca del río Abangares, cuando se implementan prácticas conjuntas de conservación de suelos

Cuadro 6-18. Erosión potencial por tipo de cobertura, cuando se implementan prácticas conjuntas de conservación de suelos

<b>Cobertura y uso de Suelo</b>	<b>Erosión total <math>\left(\frac{t}{año}\right)</math></b>	<b>Erosión total (%)</b>	<b>Altura de la lámina de suelo que se pierde (mm)</b>
Bosque	47 044	25,6	0,8
Café	25 778	14,0	8,5
Charrales	75 417	41,0	3,5
Cultivos Anuales	6 247	3,4	28,7
Pastos	24 500	13,3	1,4
Suelo Desnudo	4 375	2,4	2,2
Urbano	495	0,3	0,3
<b>Total</b>	<b>183 856</b>	<b>100</b>	

Al implementar las prácticas de conservación de suelos seleccionadas, se da una reducción en el volumen de producción potencial de sedimentos respecto a la condición actual. La producción total potencial de sedimentos se reduce a 183 856  $\left(\frac{t}{año}\right)$ , lo que representa una reducción del 52% respecto al escenario actual. Asimismo, la producción promedio de sedimentos para este escenario es de 15  $\left(\frac{t}{ha año}\right)$  para toda el área de drenaje.

Esto implica que al implementar la práctica de cultivo en curvas de nivel complementadas con bermas filtrantes de compost, en conjunto con las trampas de sedimentos en pastos dedicados a la ganadería, se logra reducir en más de la mitad la producción actual de sedimentos en la cuenca.

Al implementar las prácticas de conservación, se tiene que el volumen total de entrega de sedimentos es de 7 276 t/año, lo que corresponde a un valor promedio de 0,6  $\left(\frac{t}{ha año}\right)$  y una reducción del 59% en el volumen sedimentos que pueden llegar hasta el punto de control respecto a la condición actual.

A nivel de subcuenca, se obtienen los siguientes resultados.

Cuadro 6-19. Volumen anual potencial de sedimentos por subcuenca, cuando se implementan prácticas conjuntas de conservación de suelos

Subcuenca	Pérdida de Suelo ( $\frac{t}{año}$ )	Erosión Total (%)	Entrega de Sedimento ( $\frac{t}{año}$ )	SDR <sub>máx</sub> (%)
Abangares	236	0.1	28	7
Aguas Claras	12 068	7	458	13
Boston	17 083	9	892	20
Gongolona	25 030	14	1 473	28
Interfluvio	36 396	20	1 165	14
San Juan	37 607	20	1 392	20
Santa Lucía	55 439	30	1 869	22
<b>Total</b>	<b>183 856</b>	<b>100</b>	<b>7 276</b>	<b>Promedio = 20%</b>

Como se observa en el cuadro anterior, las subcuencas que presentan mayor producción de sedimentos, son las subcuenca con mayor producción de sedimentos es la del río Santa Lucía con 30% del volumen total.

Siguiendo los lineamientos de la (FAO, 1989), se catalogó la severidad de la erosión en cada una de las subcuencas que componen el área de drenaje del río Abangares bajo este escenario. En el siguiente cuadro se muestra dicha clasificación.

Cuadro 6-20. Severidad de la erosión en las subcuencas del río Abangares, cuando se implementan prácticas conjuntas de conservación de suelos

Subcuenca	Pérdida de suelo $\left(\frac{t}{ha \cdot año}\right)$	Severidad	Reducción respecto a la condición actual (%)
Aguas Claras	10	Nula o Ligera	52
Boston	24	Moderada	73
Gongolona	16	Moderada	78
Interfluvio	14	Moderada	15
San Juan	15	Moderada	7
Santa Lucía	15	Moderada	45

Aplicando prácticas conjuntas de conservación a los suelos dedicados a cultivos de café y pastos para ganadería, existe una reducción en la producción de sedimentos en todas las subcuencas del río Abangares, principalmente en las subcuencas de los ríos Boston y Gongolona donde la reducción en el volumen potencial de sedimentos es de 73% y 78% respectivamente. Adicionalmente, se da una reducción del 52% en la producción de sedimentos en la subcuenca del río Aguas Claras que abastece el acueducto municipal de Las Juntas.

Al aplicar las medidas de mitigación de la erosión a la cuenca del río Abangares, se da una reducción del 60% en el volumen de entrega de sedimentos, es decir, se reduce en un 60% la cantidad de sedimentos que llegaría hasta el punto de control de La Marimba, mejorando así la operación del embalse.

## 6.6. Resumen de resultados

A continuación, se presentan de manera resumida los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios estudiados.

En el siguiente cuadro comparativo se muestran los valores de la producción de sedimentos para los seis escenarios estudiados.

Cuadro 6-21. Volúmenes de la producción de sedimento para los seis escenarios analizados

Escenario	Erosión total ( $\frac{t}{año}$ )	Promedio de pérdida de suelo ( $\frac{t}{ha \cdot año}$ )	Entrega de sedimentos ( $\frac{t}{año}$ )	Reducción respecto a la condición actual (%)
Condición actual	382 206	31	17 626	0
Terrazas	232 255	19	8 417	39
Cultivo en curvas de nivel	319 272	26	13 034	16
Cultivo en curvas de nivel con bermas de compost	236 255	19	8 595	38
Trampas de sedimentos en pastizales	329 808	26	17 119	14
Prácticas conjuntas de conservación de suelo en la cuenca del río Abangares	183 856	15	7 276	52

Del Cuadro 6-21 se puede concluir que tanto las terrazas como el cultivo en curvas de nivel complementado con bermas de compost, son las prácticas que mayor eficiencia de mitigación de la erosión.

Sin Embargo, al combinar la práctica de cultivos en curvas de nivel complementadas con bermas filtrantes de compost, con las trampas de sedimento en terrenos dedicados a la ganadería, se logra reducir en más de la mitad el volumen potencial de producción de sedimentos que se pueden producir en la cuenca del río Abangares.

Adicionalmente, en el Cuadro 6-22 se muestran los volúmenes de producción potencial, según el tipo de cobertura, para cada escenario analizado.

Cuadro 6-22. Resumen de la erosión potencial total por tipo de cobertura, para los seis escenarios analizados

Cobertura y uso de suelo	Erosión Total ( $\frac{t}{año}$ )					
	Condición actual	Terrazas	Cultivo en curvas de nivel	Cultivo en curvas de nivel con bermas de compost	Trampas de sedimentos en pastizales	Prácticas conjuntas de conservación de suelo en la cuenca del río Abangares
Bosque	47 044	47 044	47 044	47 044	47 044	47 044
Café	171 730	21 778	108 795	25 778	171 730	25 778
Charrales	75 417	75 417	75 417	75 417	75 417	75 417
Cultivos Anuales	6 247	6 247	6 247	6 247	6 247	6 247
Pastos	76 899	76 899	76 899	76 899	24 500	24 500
Suelo Desnudo	4 375	4 375	4 375	4 375	4 375	4 375
Urbano	495	495	495	495	495	495
<b>Total</b>	<b>382 206</b>	<b>232 255</b>	<b>319 272</b>	<b>236 255</b>	<b>329 808</b>	<b>183 856</b>

En el Cuadro 6-22 se detalla la variación de la producción de sedimentos para cada escenario, según la cobertura. La principal variación se da en la cobertura de café, donde las principales reducciones se dan con la implementación de prácticas de conservación en terrazas y de cultivo en curvas de nivel, complementadas con bermas de compost.

En el Cuadro 6-23 se especifican los volúmenes de pérdida de suelo promedio y la clasificación de severidad las subcuencas del río Abangares. Asimismo, en la Figura 6-6 se muestra de manera gráfica la variación de la pérdida de suelos promedio para cada subcuenca, según el escenario analizado.

Cuadro 6-23. Resumen de perdida promedio de suelo por subcuenca, para los seis escenarios analizados

Cobertura y uso de suelo	Pérdida promedio de suelo $\left(\frac{t}{ha \cdot año}\right)$					
	Condición actual	Terrazas	Cultivo en curvas de nivel	Cultivo en curvas de nivel con bermas de compost	Trampas de sedimentos en pastizales	Prácticas conjuntas de conservación de suelo en la cuenca del río Abangares
Aguas Claras	21	21	21	21	11	10
Boston	90	27	62	29	87	24
Gongolona	71	20	48	22	56	16
Interfluvio	16	16	16	16	14	14
San Juan	16	16	16	16	15	15
Santa Lucía	28	20	28	20	25	15



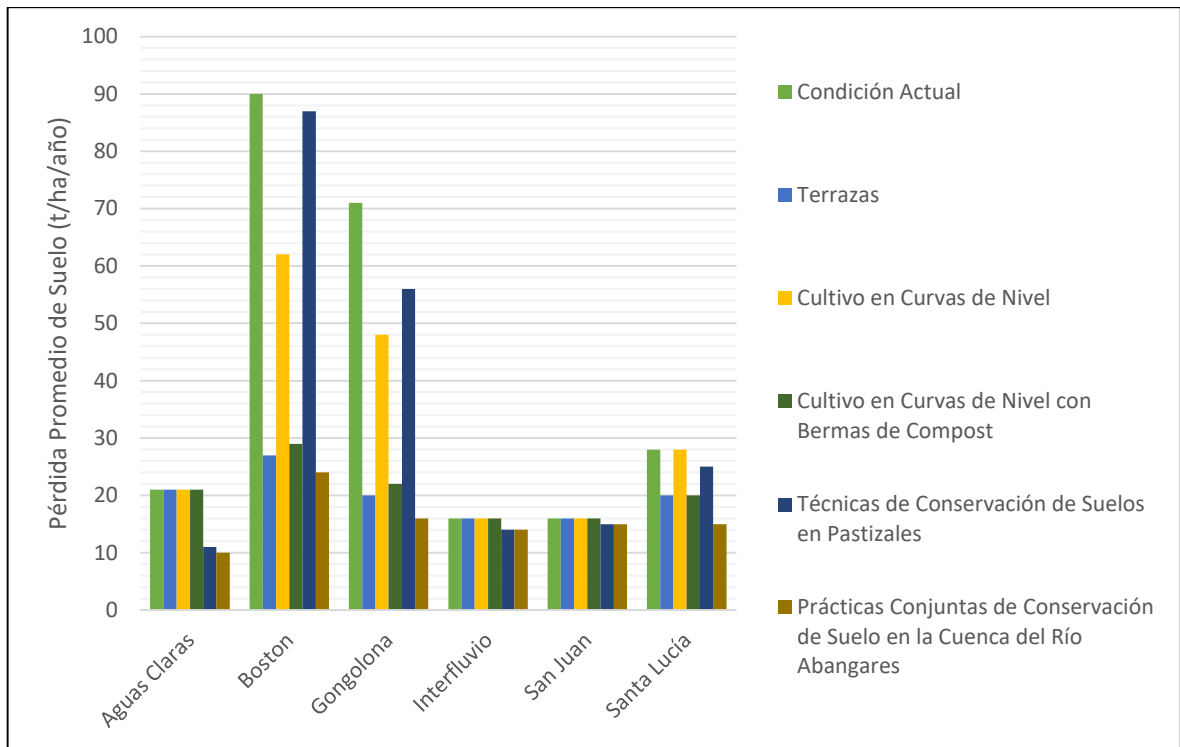


Figura 6-6. Pérdida promedio de suelo en las subcuencas del río Abangares, para los seis escenarios analizados

Finalmente, en el cuadro 6-24 se muestra la reducción potencial en la producción de sedimentos, respecto a la condición actual, para cada una de las subcuencas que componen el área de drenaje del río Abangares.

Cuadro 6-24. Reducción en la producción de sedimentos por subcuenca, para los seis escenarios analizados

Cobertura y uso de suelo	Reducción respecto a la condición actual (%)				
	Terrazas	Cultivo en curvas de nivel	Cultivo en curvas de nivel con bermas de compost	Trampas de sedimentos en pastizales	Prácticas conjuntas de conservación de suelo en la cuenca del río Abangares
Aguas Claras	0	0	0	48	52
Boston	70	31	68	3	73
Gongolona	72	32	69	21	78
Interfluvio	0	0	0	13	15
San Juan	0	0	0	4	7
Santa Lucía	29	0	29	11	45

Del Cuadro 6-24 se puede concluir que la mayor reducción en la producción de sedimentos, respecto a la condición actual, se da al aplicar la práctica de conservación de cultivos en curvas de nivel complementada con bermas filtrantes de compost, en conjunto con las trampas de sedimento en los terrenos dedicados a pastos para la ganadería.

Es necesario hacer énfasis en que la implementación de estas prácticas y técnicas de conservación de suelos, deben venir de la mano con capacitaciones al sector agrícola y ganadero del cantón de Abangares, mediante enfoques interdisciplinarios que faciliten su implementación.

Se debe promover la conservación de suelos desde la enseñanza y promoción del manejo integral de los recursos agua y suelo, para así garantizar que las medidas que se vayan a implementar sean persistentes en el tiempo.

# Capítulo 7 . Conclusiones y recomendaciones

## 7.1. Conclusiones

- 1) La erosión es un proceso que se da de manera natural, pero puede acelerarse por la actividad humana.
- 2) La cuenca del río Abangares presenta una alta variación de elevaciones en la parte alta, lo que resulta en fuertes pendientes que favorecen la erosión laminar.
- 3) A pesar de que la cuenca del río Abangares tiene una densidad de drenaje alta, la mayor parte de su área tiene una conectividad hidrológica baja debido a las largas longitudes de las laderas y su cobertura primordialmente boscosa.
- 4) La recopilación bibliográfica realizada permite aclarar los conceptos teóricos detrás del fenómeno de la erosión hídrica.
- 5) La RUSLE es un modelo ampliamente investigado y con respaldo teórico, por lo que se considera adecuado para estimar la producción de sedimentos en la cuenca del río Abangares, sin embargo, es necesario continuar realizando estudios que permitan adaptar esta metodología a las condiciones de nuestro país.
- 6) El factor de erosividad  $R$  es la principal fuente de variabilidad del modelo, ya que la precipitación es una medida puntual por lo que se debe interpolar para el resto de la cuenca.
- 7) La resolución de las imágenes satelitales utilizadas para la determinación de la cobertura de la cuenca, no permite identificar caminos de lastre, considerados como una fuente considerable de sedimentos, al encontrarse en condición de suelo desnudo.
- 8) La mayor parte del área de drenaje de la cuenca posee suelos del tipo *ultisoles*, los cuales son suelos de textura muy fina y de alta vulnerabilidad a la erosión.
- 9) El modelo InVEST permite modelar y calibrar de manera sencilla y eficaz la producción de sedimentos por erosión hídrica.
- 10) Es necesario contar con información de estadística de sedimentos para poder estimar de manera precisa los parámetros de calibración de Borselli  $IC_0$  y  $k_b$ .

- 11) Los volúmenes de erosión potencial obtenidos se consideran subestimaciones, ya que el modelo no permite estimar el aporte de surcos, cárcavas y movimientos de masa, ya que no se conoce el verdadero aporte asociado a estos mecanismos.
- 12) Las zonas de mayor vulnerabilidad a la erosión se ubican en la parte alta de la cuenca y corresponden a las regiones donde se da el cultivo de café.
- 13) La principal fuente de producción de sedimento está dada por los cultivos de café de la parte alta de la cuenca. Aproximadamente el 45% del volumen potencial de sedimentos se produce en los cultivos de café a pesar de cubrir únicamente el 3% del área de drenaje.
- 14) La cuenca del río Abangares delimitada hasta el sitio de embalse La Marimba, tiene una condición de erosión clasificada como severa. Esto puede deberse a la intervención humana en la parte alta de la cuenca y la textura fina del suelo.
- 15) Las subcuencas de los ríos Gongolona, Boston y Santa Lucía son las más vulnerables a la erosión, ya que poseen fuertes pendientes, una cobertura pobre y alta conectividad hidrológica.
- 16) Las subcuencas de los ríos Boston y Gongolona presentan una condición de erosión catalogada como severa.
- 17) La práctica de cultivo en terrazas es la medida más eficaz de conservación de suelos.
- 18) El cultivo en curvas de nivel ayuda a mitigar el efecto de la erosión laminar, pero en menor medida que las terrazas.
- 19) Al complementar el cultivo en curvas de nivel con bermas de compost (terracetas), se alcanza una eficiencia de retención de sedimentos equiparable a la de las terrazas.
- 20) Al aplicar prácticas de conservación de suelos a los cultivos de café ubicados en la parte alta de la cuenca, se alcanza una reducción de hasta un 39% en la producción de sedimentos.
- 21) La implementación conjunta de prácticas de conservación de suelo reduce en más de la mitad la producción de sedimentos por erosión hídrica laminar.
- 22) Las zonas de pastos se dedican casi en su totalidad al pastoreo y corta, aportando un 20% del volumen total de sedimentos.
- 23) El implementar trampas de sedimentos reduce la producción de sedimentos en todas las subcuencas que componen el área de drenaje del río Abangares.

- 24) El mayor impacto de implementar trampas de sedimentos en los pastos dedicados a la ganadería se observa en la subcuenca del río Aguas Claras.
- 25) Las subcuencas del río San Juan e Interfluvio poseen una conectividad hidrológica catalogada como baja, por lo que la implementación de medidas de conservación de suelo en estas áreas de drenaje no tendrá un impacto significativo en la mitigación de la erosión hídrica.
- 26) Las técnicas de conservación de suelos son medidas de bajo costo y de fácil de implementación, que además inciden de manera directa en la reducción del volumen de sedimentos por erosión hídrica.
- 27) Para tener un mejor manejo operativo de los embalses del sistema de regulación, es necesario reducir la cantidad de sedimentos que entra a la red de drenaje de la cuenca del río Abangares.

## 7.2. Recomendaciones

- 1) Implementar un sistema de medición de sedimentos en suspensión en las cuencas Boston y Gongolona para su control de erosión al ser las cuencas que presentan mayores valores de producción de sedimentos.
- 2) Iniciar campañas de muestreo de sedimentos en suspensión en conjunto con campañas de aforos, con el objetivo de poder generar una curva de descarga de sedimentos que permita cuantificar de manera continua y remota la producción de sedimentos en la cuenca, por medio de las estaciones fluviográficas y definir así la operación del embalse La Marimba y los demás embalses del sistema de regulación.
- 3) Corroborar los resultados obtenidos en este estudio mediante visitas de campo a las zonas definidas como vulnerables a la erosión.
- 4) Implementar parcelas experimentales de sedimentos para mejorar la estimación del factor de erosividad en la cuenca del río Abangares. Estas deben ubicarse en las partes alta, media y baja de la cuenca, cerca de una estación meteorológica.
- 5) Para mitigar el efecto erosivo de la lluvia en las zonas donde se cultiva café, se puede aplicar la metodología de café con sombra para aumentar la cobertura y amortiguar el impacto de las gotas de lluvia.
- 6) Implementar terrazas en las zonas de cultivo de café en la parte alta de la cuenca, ya que es la medida de conservación de suelos más eficaz, porque promueve la reducción de la escorrentía, la retención de nutrientes y la recarga de acuíferos.
- 7) En caso de que no sea posible implementar las terrazas, se deben efectuar prácticas de cultivo en curvas de nivel en las zonas donde se produce café, para así reducir el volumen de sedimentos que viaja hasta la red de drenaje de la cuenca.
- 8) Complementar la práctica de cultivo en curvas de nivel con bermas filtrantes de compost (terracetas) para aumentar su eficiencia de retención de sedimentos, amortiguar los caudales de escorrentía, y retener nutrientes.
- 9) Implementar técnicas y prácticas de conservación de suelos en la cuenca del río Aguas Claras, ya que esta es la principal fuente de abastecimiento del acueducto municipal de la ciudad de Las Juntas, lo que reduciría los costos de potabilización del agua.

- 10) Implementar de manera conjunta la práctica de cultivo en curvas de nivel complementada con bermas filtrantes de compost, junto con las trampas de sedimentos en los terrenos dedicados a la ganadería.
- 11) Cuando se identifique que se ha dado un movimiento de masa cercano a un cauce, debe ser intervenido para reducir la entrada de sedimentos a la red de drenaje de la cuenca.
- 12) Promover sistemas de estabulación del ganado para reducir su movilidad y mitigar el efecto del pisoteo sobre el suelo.
- 13) Reducir el pastoreo en terrenos de fuerte pendiente.
- 14) Implementar las trampas de sedimentos, las bermas de compost o roca, las medias filtrantes o barreras de pacas de heno en los terrenos dedicados a la ganadería para retener los sedimentos que se generan producto del pastoreo del ganado.
- 15) Promover el uso de barreras vivas para la retención de suelo. El vetiver es una planta que ha dado resultados cualitativos prometedores en su aplicación en las zonas cafetaleras de Naranjo.
- 16) Aumentar la vegetación ribereña para reducir la conectividad hidrológica y disminuir la entrada de sedimentos a los cauces.
- 17) Fomentar la labranza de terrenos dedicados a pastizales de engorde y de corta para promover la infiltración y reducir la escorrentía.
- 18) Reducir la cantidad de sedimentos que entra a la red de drenaje de la cuenca para minimizar el volumen de sólidos que eventualmente se podría depositar en el sistema de regulación por medio de embalses.

# Bibliografía

- Aarne, Vesilind, Susan, M., & Lauren, H. (2010). *Introduction to Environmental Engineering*. Cengage Learning.
- Abel Basile, P. (2018). *Transporte de Sedimentos y Morfodinámica de Ríos Aluviales*. Rosario, Argentina: Universidad Nacional de Rosario.
- Alfaro, R. (2018). *Análisis del Comportamiento de los Sedimentos en el Embalse del Centro de Producción Pirrís*. San Pedro: Universidad de Costa Rica.
- Aparicio, F. (2006). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Mexico, D.F: Limusa, S.A.
- Arnoldus, H. (1977). *Predicting Soil Losses due to Sheet and Rill Erosion*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, ONUAA.
- ASCE. (2007). *Sedimentation Engineering*. American Society of Civil Engineers.
- Avendaño, C., Cobo, J., & Sanz, M. (1994). *La modelización matemática, ajuste y contraste del Sediment delivery ratio a los embalses. Aplicación al cálculo de la erosión de cuencas fluviales*. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).
- Bashir, S., Javed, A., Irshad, B., & Ahmad, N. (2018). *Soil and Water Conservation*. Pakistan: Institute of Soil and Environmental Sciences.
- Borselli, L., Cassi, P., & Torri, D. (2008). *Prolegomena to Sediment and Flow Connectivity in the Landscape: A GIS and Field Numerical Assesment*. CNR-IRPI.
- Bouguerra, H., Bouanani, A., Khanchoul, K., & Derdous, O. (2017). *Mapping erosion prone areas in the Bouhamdane watershed (Algeria) using the Revised Universal Soil Loss Equation through GIS*. Algeria: Journal of Water and Land Development 32((I-III)):13-23.
- Brooks, K., Ffolliott, P., & Magner, J. (2013). *Hydrology and the Management of Watersheds*. Wiley-Blackwell.
- Charlton, R. (2008). *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*. Routledge.



- Chow, V. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá: McGraw-Hill.
- Corrales Azofeifa, J. P. (2007). *Análisis de la Problemática de los Sedimentos en un Embalse Pequeño de Almacenamiento y sus Posibles Soluciones*. San Pedro: Universidad de Costa Rica.
- Cubero, D. (1996). *Manual de Manejo y Conservación de Suelos y Aguas*. San José: Editorial de la Universidad Estatal a Distancia.
- Deng, C. Z., Liu, Y., Nie, X., Li, Z., Liu, J., & Zhu, D. (2021). *Advantages and Disadvantages of Terracing: A Comprehensive Review*. International Soil and Water Conservation Research.
- Desmet, P., & Govers, G. (1996). *A GIS Procedure for Automatically Calculating the USLE LS Factor on Topographically Complex Landscape Units*. Journal of Soil and Water Conservation.
- Dissmeyer, G., & Foster, G. (1984). *A Guide for Predicting Sheet and Rill Erosion on Forest Land*. United States Department of Agriculture.
- Dunne, T., & Leopold, L. (2002). *Water in Environmental Planning*. New York: W.H. Freeman.
- FAO. (1989). *Informe Técnico No. 2. Evaluación de los Estados de Erosión Hídrica de los Suelos en Costa Rica*. Roma, Italia: Programa de Cooperación FAO/Italia.
- Gómez, F. (2002). *Evaluación de la Erosión Potencial en Tres Cuencas de Costa Rica*. San Pedro: Universidad de Costa Rica.
- Gracia, J. (1996). *Pérdida de Suelo en Cuencas*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Haan, C., & Barfield, B. (1978). *Hydrology and Sedimentology of Surface Mined Lands*. University of Kentucky.
- Haan, C., Barfield, B., & Hayes, J. (1994). *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*. Academic Press.
- InVEST (3.9.0) [Software]. (2019). Obtenido de <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>

- Investiga.TEC. (2014). *Atlas Digital de Costa Rica*. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Kuiper, E. (1965). *Water Resources Development: Planning, Engineering and Economics*. New York: Springer Science + Business Media.
- Lianes, E., Marchamalo, M., & Roldán, M. (2009). *Evaluación del Factor C de la RUSLE Para el Manejo de Coberturas Vegetales en el Control de la Erosión en la Cuenca del Río Birris, Costa Rica*. Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica.
- Linsley, R., Kohler, M., & Paulhus, J. (1958). *Hydrology for Engineers*. New York: McGraw-Hill.
- Loucks, D., & Van Beek, E. (2005). *Water Resources Systems Planning and Management*. United Nations Scientific and Cultural Organization.
- Maidment, D. (1993). *Handbook of Hydrology*. Austin, Texas: McGraw-Hill.
- Mancilla, G. (2008). *Uso de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE) en el Campo Forestal*. Universidad de Chile.
- Marchamalo, M. (2007). *Cuantificar el potencial de conservación de suelo y agua basado en un análisis territorial de la cuenca. Estudio de caso de la cuenca del río Birris*. . Turrialba: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Martin, J., Martin, W., Paye, J., Raney, W., & DeMent, J. (1955). *Soil Aggregation*. Academic Press.
- Mata, R., Vásquez, A., & Rosales, A. (2012). *Mapa de Suelos de Costa Rica*. Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica.
- Mays, L. (2001). *Water Resources Engineering*. Arizona.
- McCuen, R. (2017). *Hydrologic Analysis and Design*. Pearson.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (1991). *Manual Descriptivo de la leyenda del Mapa de Capacidad de Uso de la Tierra de Costa Rica Escala 1:200.000*. Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria (SEPSA).

- Ministerio de Medioambiente de España. (1998). *Restauración Hidrológico Forestal de Cuencas y Control de la Erosión* (Segunda ed.). Madrid, España: TRAGSA.
- Morales Ascarrunz, M. C. (2014). *Estimación de la erosión laminar y sedimentación con modelos hidrológicos para la selección de prácticas de conservación de suelos y cambios de cobertura en la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint-Louis Du Sud- Haití* . Turrialba: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Mudd, S., & Furbish, D. (2003). *Influence of Chemical Denudation on Hillslope Morphology*. Journal of Geophysical Research.
- Natural Resources Conservation Service. (1997). *National Engineering Handbook*. United States Department of Agriculture.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., & Williams, J. (2005). *Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua - Documentación Teórica*. Grassland, Soil and Water Research Laboratory.
- Pacheco, H., Marcano, A., & Cartaya, S. (2014). *Cálculo del factor C de la USLE, en la cuenca del río Carache, Trujillo, Venezuela usando imágenes del Satélite Miranda VRSS-1*. Medellín: XVI Simposio Internacional Selper 2014.
- Pierre, J. (2010). *Erosion and Sedimentation*. Cambridge.
- Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano. (1977). *Estudios Hidrológicos*. Managua, Nicaragua: Naciones Unidas.
- QGIS (3.18 Zürich) [Software]. (2021). Obtenido de <https://www.qgis.org/en/site/>
- Renard, K., & Laurensen, E. (1997). *USDA (1997) - Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with RUSLE*. United States Natural Resources Conservation Service.
- Rheinheimer, D., & Yarnell, S. (2017). *Water for the Environment*. Academic Press.
- Sánchez, Y., Martínez-Graña, A., & Yenes, M. (2018). *Cálculo del volumen de sedimentos erosionados en la cuenca vertiente del Jerte*. Salamanca: Sociedad Geológica España.
- Serrano, A. (2018). *Apuntes del curso de Hidrología IC-0808*. San Pedro: Universidad de Costa Rica.

- Shahvarooghi, S., Soheili, F., & Amin, M. (2016). *Effects of Contour Farming on Runoff and Soil Erosion Reduction: A Review Study*. Elixir International Journal, Agriculture.
- Solano, S. (2010). *Determinación del Potencial Erosivo de la Subcuenca del Río Pirrís*. San Pedro: Universidad de Costa Rica.
- Stanford University. (2019). *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) User's Manual*. Stanford University.
- Sustainable Technologies Evaluation Program. (2015). *Soil Risk Assessment Tool Handbook*. Ontario, Canada: Toronto and Region Conservation Authority.
- United States Department of Agriculture. (1972). *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*. Natural Resources Conservation Service.
- United States Department of Agriculture. (1993). *Clarification of Soil Texture Class Boundaries*. Natural Resources Conservation Service.
- Vahrson, W. (1990). *El Potencial Erosivo de la Lluvia en Costa Rica*. Agronomía Costarricense.
- Vargas, F. (2010). *Estimación de pérdida de carbono en el suelo por erosión hídrica laminar bajo diferentes escenarios de producción hortícola y ganadera en la subcuenca del río Birrís, Costa Rica*. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza .
- Vigiak, O., Borselli, L., & Newham, L. (2012). *Comparison of Conceptual Landscape Metrics to Define Hillslope-scale Sediment Delivery Ratio*. *Geomorphology* 138.
- Williams, I. (1975). *Sediment Yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor*. United States Department of Agriculture.
- Wischmeier, & Smith. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses*. United States Department of Agriculture.

# **Apéndice A. Características de los subórdenes de suelo según (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991)**

## ***A.1. Dystrandeps***

Son suelos ácidos, de regiones con clima húmedo a perhúmedo. Se desarrollaron principalmente en el Pleistoceno tardío.

Son suelos localizados en relieves fuertemente ondulados a escarpados, son moderadamente profundos y de texturas moderadamente finas a finas. Su génesis viene de suelos sedimentarios y aluviales entre moderadamente y poco consolidados.

Se caracterizan por poseer colores pardo oscuro, pardo amarillento claro a gris claro, de drenaje ligeramente excesivo, permeables, de baja fertilidad y abundante pedregosidad y efectos erosivos ligeros.

## ***A.2. Haplustult***

Son de relieve ondulado, profundo, texturas medias a moderadamente finas, colores pardo oscuro a negro, o se hayan además en colores rojizos.

Son suelos bien drenados, son moderadamente permeables a permeables, fertilidad baja. Se desarrollan en clima tropical húmedo, su contenido de arcilla varía según la profundidad

## ***A.3. Usthorthent***

Son de relieve plano a fuertemente ondulado, superficiales, texturas medias, colores pardo oscuro a pardo pálido, de drenaje bueno a ligeramente excesivo, permeables y de muy baja fertilidad, tiene piedra superficial abundante y erosión laminar ligera.

#### ***A.4. Ustropepts***

Son suelos característicos de relieve muy escarpado, superficiales, menos 50 cm, texturas moderadamente finas a finas, colores pardo oscuro, pardo amarillento oscuro a pardo amarillento, de drenaje excesivo moderadamente permeables y de baja permeabilidad. El contenido de piedras es abundante y los efectos erosivos moderados.

La disponibilidad de materia orgánica (M.O.) y nitrógeno es media, el contenido de fósforo es bajo generalmente y la provisión de potasio es alta especialmente en áreas secas y tropicales.

#### ***A.5. Tropohumult***

Son suelos localizados en un relieve fuertemente ondulado a escarpado o montañosos, con pendientes menores del 40. Son profundos, de texturas finas a muy finas.

Se caracterizan por tener colore pardo oscuro a rojo y rojo amarillento en el subsuelo, de drenaje bueno y permeabilidad moderada, poseen además una baja fertilidad.

Se pueden encontrar también en relieves ondulados a depresionados (pequeños suamos). Profundos a superficiales (alto nivel freático).

Son típicamente de texturas finas, color pardo oscuro a rojo y rojo amarillento en el subsuelo en las áreas de lomeríos y de pardo grisáceo muy oscuro en la superficie a pardo grisáceo a grisáceo en el subsuelo en las depresiones. Son de drenaje bueno a pobre, y de fertilidad baja a alta.

#### ***A.6. Humitropept***

Son suelos de relieve ligeramente ondulados. Profundos, de texturas finas y de color pardo oscuro a pardo fuerte y pardo amarillento en el subsuelo. Son de drenaje bueno y permeabilidad moderada, bajos en la fertilidad.

### ***A.7. Dystropept***

Se localizan en terrenos que van de escarpado a fuertemente escarpado (pendiente 40-60). Son suelos de horizontes profundos, con texturas moderadamente finas en el subsuelo.

De color característicamente pardo fuerte a rojo amarillento y drenaje alto y permeabilidad moderada. Poseen además fertilidad baja.

### ***A.8. Troporthent***

Son típicos en relieves planos a ligeramente inclinados, con profundidad de poca a moderada. Son de texturas moderadamente gruesas a gruesas, la cual varía con la profundidad.

Su color es pardo grisáceo oscuro a pardo amarillento oscuro con manchas de color pardo fuerte y pardo grisáceo oscuro. Son de drenaje moderado a bien drenado, moderadamente permeables y baja fertilidad.

### ***A.9. Ustifluvents***

Son suelos presentes en relieves planos, son típicamente de horizontes profundos, aproximadamente más de 100 cm, poseen texturas medias moderadamente finas, colores pardo grisáceo muy oscuro pardo oscuro, pardo amarillento oscuro, son de drenaje bueno, permeables, y fertilidad moderada.

### ***A.10. Ustropept***

Son de relieve escarpado a muy escarpado, de horizonte superficial a poco profundos, posee texturas medias a moderadamente finas, con colores pardo oscuro, pardo amarillento oscuro, pardo amarillento.

Posee drenaje ligeramente excesivo, moderadamente permeables y fertilidad media. Son suelos de abundantes piedras y de erosión moderada.

### **A.11. *Humitropept***

Son suelos de relieve ondulado a fuertemente ondulado, con horizonte moderadamente profundos, sus texturas típicas moderadamente finas a finas.

Poseen color gris muy oscuro, pardo rojizo oscuro a pardo rojizo, de drenaje bueno, moderadamente permeables y de fertilidad media. Además, son de pedregosidad media, erosión ligera.



## Apéndice B. Ilustraciones de técnicas de conservación de suelos según (Sustainable Technologies Evaluation Program, 2015)

### B.1. Berma filtrante de compost



Figura B-1. Berma filtrante de compost  
Fuente: (Catchments & Creeks Pty Ltd, 2010)

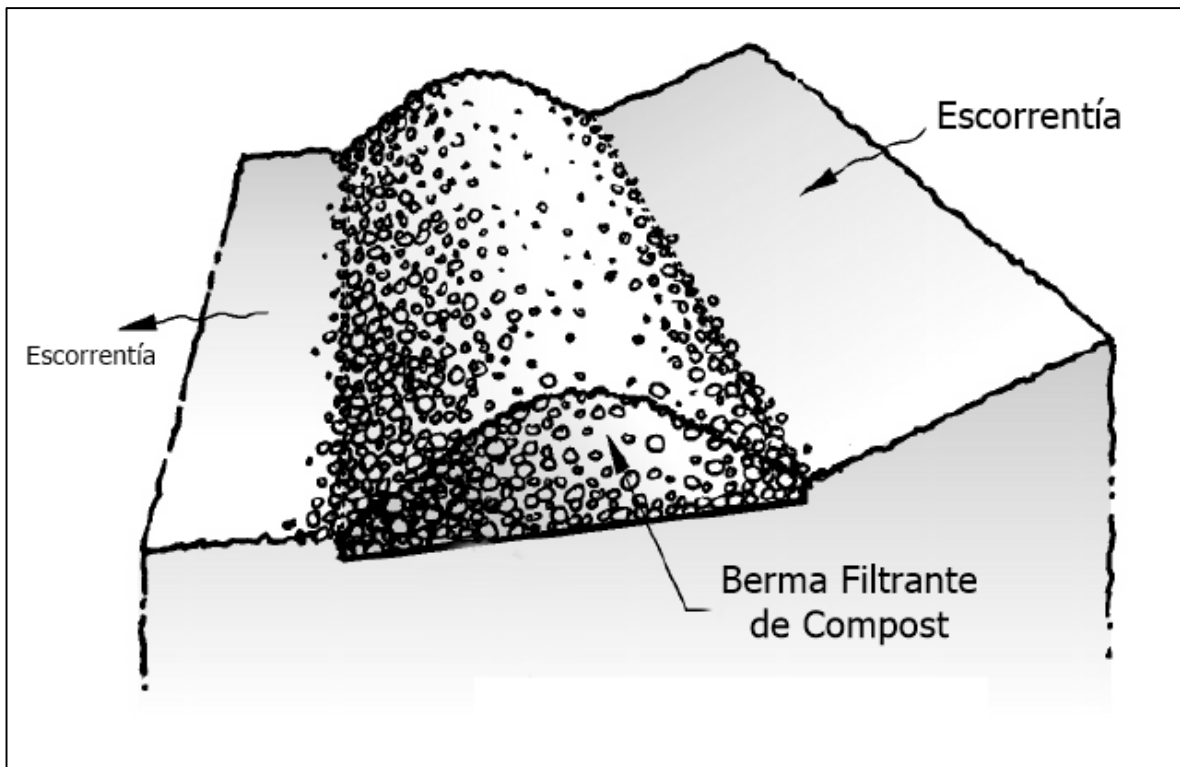


Figura B-2. Diagrama de berma filtrante de compost  
Fuente: (Minnesota Stormwater Manual, 2021)  
Editado: (Matarrita, 2021)

## B.2. Presa filtrante



Figura B-3. Presa filtrante  
Fuente: (DTNEXT, 2021)

### B.3. Media filtrante de compost



Figura B-4. Media filtrante de compost en entorno urbano  
Fuente: (Erosion Control Products, 2021)



Figura B-5. Media filtrante de compost en entorno natural  
Fuente: (Meadowbrook, 2015)

#### B.4. Barreras de sedimento para tragantes

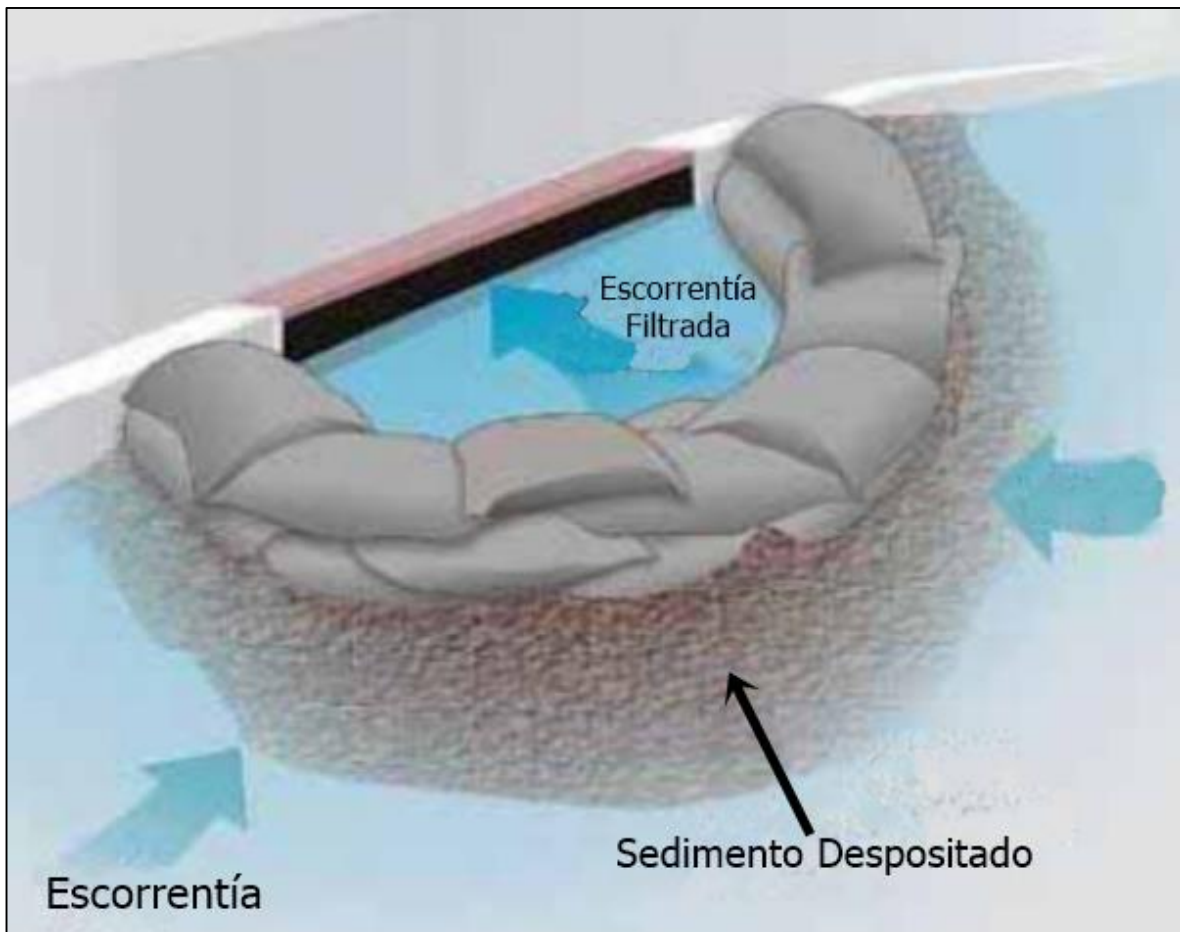


Figura B-6. Barreras de sedimento para tragantes

Fuente: (Minnesota Stormwater Manual, 2021)

Editado: (Matarrita, 2021)

## B.5. Rollos de zarzo o fibra



Figura B-7. Rollos de zarzo  
Fuente: (Minnesota Stormwater Manual, 2021)

## B.6. Berma filtrante de roca

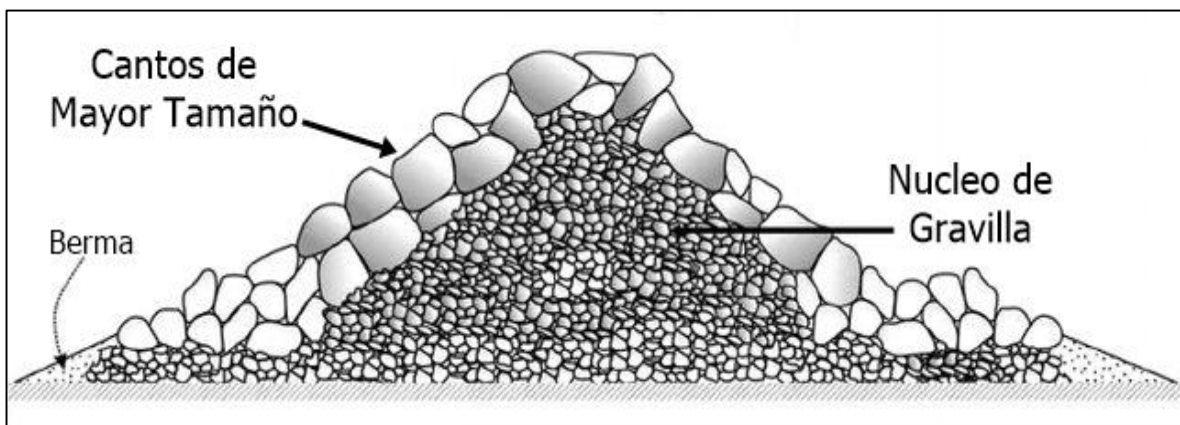


Figura B-8. Berma filtrante de roca  
Fuente: (Özvan, Ali et al., 2011)  
Editado: (Matarrita, 2021)

## B.7. Barreras de bolsas de arena



Figura B-9. Barreras de bolsas de arena  
Fuente: (Idaho Best Management Practices Manual., 2011)

## B.8. Estanque sedimentador

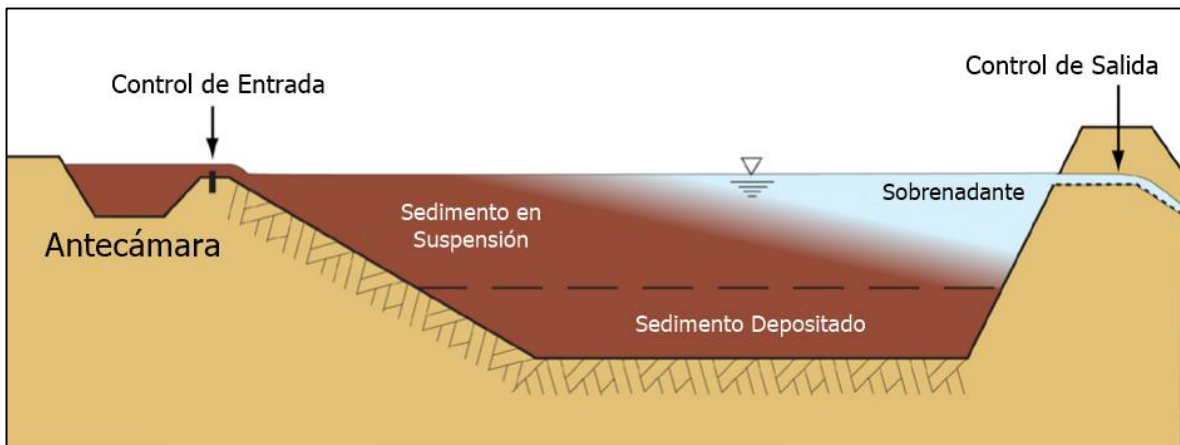


Figura B-10. Estanque sedimentador  
Fuente: (Catchments & Creeks Pty Ltd, 2010)  
Editado: (Matarrita, 2021)

## B.9. Barreras de sedimento



Figura B-11. Barreras de sedimento  
Fuente: (Oververde, 2021)

## B.10. Barreras de paca de heno



Figura B-12. Barreras de pacas de heno  
Fuente: (Massachusetts Clean Water Toolkit, 2021)