# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

## CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

### TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

**TEMA:**

"EVALUACIÓN DEL RIESGO DE EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO APUELA, COTACACHI-ECUADOR"

Trabajo de titulación previo a la obtención del título en Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

**Línea de investigación:** Biotecnología, energía y recursos naturales renovables


**AUTOR:**

Gabriela Alejandra Chillagano Tipán

Cintya Pamela Lara Escobar

**DIRECTOR:**

PhD. Darío Paúl Arias Muñoz


**Ibarra – Ecuador 2026**

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA**

# AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

# A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

| DATOS DE CONTACTO | |
|---|---|
| **APELLIDOS Y NOMBRES:** | Chillagano Tipán Gabriela Alejandra |

| DATOS DE CONTACTO | |
|---|---|
| **APELLIDOS Y NOMBRES:** | Lara Escobar Cintya Pamela |

| DATOS DE LA OBRA | |
|---|---|
| **TÍTULO:** | "EVALUACIÓN DEL RIESGO DE EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO APUELA, COTACACHI-ECUADOR" |
| **AUTORES:** | Chillagano Tipán Gabriela Alejandra<br>Lara Escobar Cintya Pamela |
| **FECHA:** | 31/07/2026 |
| **PROGRAMA:** | [x] PREGRADO [ ] POSGRADO |
| **TITULO POR EL QUE OPTA:** | Ingeniero en Recursos Naturales Renovables |
| **DIRECTOR:** | PhD. Darío Paúl Arias Muñoz |
| **ASESOR:** | MSc. Gabriel Alejandro Chimbo Yépez |

## 2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 31 días del mes de Julio de 2026.

**LAS AUTORAS**

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
GABRIELA ALEJANDRA CHILLAGANO TIPAN

Chillagano Tipán Gabriela Alejandra

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
CINTYA PAMELA LARA ESCOBAR

Lara Escobar Cintya Pamela

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente documento trabajo fue desarrollado por las señoritas **CHILLAGANO TIPÁN GABRIELA ALEJANDRA,** con cédula de identidad Nro. 172454224-4 y **LARA ESCOBAR CINTYA PAMELA,** con cédula de identidad Nro. 100537834-2, bajo mi supervisión en calidad de director.




PhD. Darío Paúl Arias Muñoz

**DIRECTOR**

## AGRADECIMIENTO

*Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad Técnica del Norte, institución que nos acogió y nos brindó las herramientas académicas, científicas y humanas necesarias para llevar adelante este proyecto de tesis. La formación recibida en sus aulas fue un recurso y una oportunidad de crecer en un ambiente de investigación y reflexión que han sido pilares fundamentales en nuestro desarrollo profesional y personal.*

*A nuestro director de tesis, PhD. Paúl Arias, reconocemos con especial gratitud su constante guía, su paciencia y su compromiso con la excelencia académica. Sus observaciones, consejos y exigencias fueron esenciales para dar forma a este trabajo. De igual manera, extendemos nuestro sincero agradecimiento al asesor, MSc. Gabriel Chimbo, por su apoyo técnico y académico, por la dedicación con la que reviso cada detalle y por la confianza depositada en nuestras capacidades. Sus aportes enriquecieron significativamente la investigación y nos ayudaron a comprender con mayor profundidad los aspectos prácticos y metodológicos que se sustentan en este estudio.*

*A los docentes que, con su vocación y entrega, dejaron huella en nuestro aprendizaje con cada clase, orientación y cada palabra de aliento contribuyeron a cimentar las bases que hoy sostienen este proyecto. Su vocación y entrega han dejado una huella imborrable en nuestro camino académico y personal.*

*Finalmente, a nuestros compañeros y colegas, quienes, con su compañía, colaboración y ánimo hicieron más llevadero este proyecto, les dedicamos también este logro. Las conversaciones, las horas compartidas de estudio y el apoyo mutuo fueron un motor invaluable que nos impulsaron a continuar y a culminar con éxito esta etapa.*

*Este trabajo es fruto no solo de un esfuerzo individual, sino de un acompañamiento colectivo reflejando la importancia de la comunidad académica. A todos quienes caminaron junto a nosotras en este trayecto, les ofrecemos nuestro más sincero agradecimiento dedicándoles con aprecio este logro alcanzado.*

***Gabriela Alejandra Chillagano Tipán***

***Cintya Pamela Lara Escobar***

## DEDICATORIA

*"Loado seas, mi Señor, por nuestra hermana la madre tierra, la cual nos sustenta y gobierna, y produce diversos frutos con coloridas flores y hierba." San Francisco de Asís, Cántico de las Criaturas*

*A Dios, por ser la luz que va guiando mi camino y es la fuerza que me sostuvo en los momentos de incertidumbre. En cada paso de este proceso académico encontré en Él la paz para continuar, la esperanza para no rendirme y la certeza de que todo esfuerzo tiene un propósito mayor. Su amor y presencia ha sido el fundamento principal sobre el cual se construye este logro, recordándome que la sabiduría, el entendimiento y la fe caminan juntas.*

*A mis padres, Gonzalo y Lucinda quienes con su amor infinito y sacrificio silencioso son el pilar de mi vida. Gracias a su ejemplo de perseverancia y entrega aprendí que los sueños se alcanzan con disciplina y humildad. Cada gesto de apoyo, cada palabra de aliento y cada abrazo en los momentos de cansancio me dieron la fuerza para seguir adelante. Este trabajo también es fruto de su dedicación y de la confianza que siempre depositaron en mí.*

*A mis hermanos, Alex, Vero y Andrés a mi cuñado Miguel y mis sobrinos Mia y Dante, quienes con su cariño y compañía me recordaron que la familia es un refugio donde siempre se encuentra alegría, amor y motivación. Sus sonrisas, consejos y complicidad compartida fueron un bálsamo en los días de mayor exigencia. Ellos me enseñaron que los logros personales son más valiosos cuando se celebran en unidad y se comparten con quienes forman parte de nuestra historia.*

*A mis amigos, Michael, Amber, Pame, Silvana, Esteban, Dick, Pau y Kenneth, quienes con su amistad sincera y apoyo constante me acompañaron en este recorrido. Su presencia en los momentos de duda, sus palabras de ánimo y la confianza que siempre me brindaron fueron esenciales para mantener el equilibrio entre la exigencia académica y la vida cotidiana. Gracias a ellos comprendí que la amistad verdadera es también una fuente de fortaleza y esperanza, capaz de sostenernos cuando el camino parece difícil.*

*Finalmente, dedico este trabajo a la creación misma, reflejo del amor de Dios y testimonio de su grandeza. La madre tierra, con sus ríos, montañas y valles, ha sido no solo escenario de mi investigación, sino también maestra silenciosa que me enseñó la importancia de cuidar y respetar aquello que nos sustenta. Que este esfuerzo académico sea también un compromiso de vida: reconocer en la naturaleza la huella divina y trabajar por su conservación, como un acto de gratitud hacia Dios y hacia las generaciones que vendrán.*

***Gabriela Alejandra Chillagano Tipán***

## DEDICATORIA

*"Escucha atentamente lo que la naturaleza susurra; responde si te importa." – Nausicaä*

*Por encima de todo elevo mi más grande agradecimiento a Dios, autor de cada paso de mi existencia. Todo lo que soy y cada gota de mi esfuerzo la entrego a quienes amo, a la sangre que me dio la vida y a los amigos que la vida me regalo como familia y han sido pilar fundamental en mi vida:*

*De manera muy especial este gran paso lo dedico a mis abuelitos (+) Rosita Escobar y (+) Jorge Lara, los mejores ejemplos de vida, que formaron a la mujer que ahora soy y aunque la vida los llevó por otro camino, el recuerdo, el orgullo y el amor eterno jamás se irán de mi corazón porque vivo con la esperanza de un día volverles a ver.*

*A mi mamá, Susana Lara, por transmitirme los más grandes valores de amor, disciplina y obediencia, por cada esfuerzo diario, muchas veces invisible a los ojos del mundo, pero enorme a los míos, fue el motor silencioso que impulsó cada uno de mis pasos. No existen palabras suficientes para agradecer tu entrega incondicional y las veces que creíste en mí incluso cuando yo dudaba de mí mismo. Por esto y mucho más este logro es tuyo.*

*A mis mejores amigos Paul Pinango y Danny Rivera, por demostrarme todo su amor, su apoyo, su comprensión y su ayuda en los momentos que más he necesitado y por cada risa compartida que aligeró el peso de los días difíciles. No fue la sangre lo que nos unió, sino la elección mutua de creer el uno en el otro, y de construir una amistad capaz de resistir el paso del tiempo y las adversidades. Este logro también lleva un poco de cada uno de ustedes, porque en sus palabras encontré fuerza, en su compañía encontré refugio, y en su amistad encontré una de las mayores riquezas de mi vida.*

*A mis mejores amigas, Gabby, Silvana, Sofi y Sarita por cada abrazo oportuno, por cada palabra sabia en momentos de incertidumbre, y por esa complicidad única que solo se construye con el tiempo y la confianza verdadera. Ustedes son mi refugio en los días grises, mi motivo de risa en los días buenos, y mi fortaleza silenciosa cuando las dudas amenazaban con detenerme. Este trabajo lleva también un pedazo de cada una de ustedes, porque en su amistad encontré una de las certezas más bonitas de mi vida.*

*A (+) Tony, unas de las personas que más confió en mis sueños, incluso cuando nadie lo hizo. La persona que compartió su familia, su cariño, su esfuerzo y su amor conmigo. Te convertiste en una presencia imborrable en mi historia, aunque no estés aquí. Este logro es para ti, aunque hoy no estés aquí para verlo, sé que lo celebras conmigo desde donde te encuentres.*

*A mis amigos Jimy, Andrés, Jhoset y Vane, esos amigos de travesía que la vida fue colocando en mi camino como pequeñas luces en los días de niebla, les dedico un pedazo de este logro. Gracias por todo el cariño y por ser parte de mi historia.*

***Cintya Pamela Lara Escobar***

## ÍNDICE DE CONTENIDO

*CAPÍTULO I* ..... *1*

*INTRODUCCIÓN* ..... *1*

**1.1 Revisión de antecedentes** ..... **1**

**1.2 Problema de investigación** ..... **2**

**1.3 Justificación de investigación** ..... **2**

**1.4 Pregunta directriz de la investigación** ..... **3**

**1.5 Objetivo** ..... **3**

*CAPÍTULO II* ..... *4*

*REVISION DE LITERATURA* ..... *4*

**2.1 Evaluación de la erosión hídrica del suelo** ..... **4**

2.1.1 Erosión Hídrica ..... 5

2.1.2 Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica ..... 7

2.1.3 Relación entre la producción de sedimentos con la erosión hídrica en cuencas hidrográficas ..... 8

2.1.4 Conservación del Suelo Frente a la Erosión ..... 10

**2.2 Marco legal** ..... **12**

*CAPÍTULO III* ..... *16*

*METODOLOGÍA* ..... *16*

**3.1 Descripción del área de estudio** ..... **16**

**3.2 Morfometría de la cuenca hidrográfica del río Apuela** ..... **17**

3.2.1 Edafología ..... 19

**3.3 Métodos** ..... **20**

3.3.1 Modelo matemático RUSLE ..... 21

3.3.2 Factor de Erosividad de la precipitación (R) ..... 21

3.3.3 Factor de Erodabilidad del suelo (K) ..... 22

3.3.4 Factor Topográfico (LS) ..... 23

3.3.5 Factor Cobertura del Suelo (C) ..... 25

3.3.6 Factor Prácticas de Conservación (P) ..... 26

3.3.7 Calibración del Modelo RUSLE: Análisis comparativo en la producción de sedimentos ..... 27

3.3.8 Muestreo de agua y análisis en laboratorio ..... 30

3.3.9 Evaluación del Riesgo de Erosión ..... 36

**3.4 Propuesta de estrategias de conservación del suelo para mitigar los efectos de erosión hídrica ..... 37**
3.4.1 Indicadores de Presión: Caracterización de las clases agrológicas, el uso potencial y los conflictos de uso ..... 38
3.4.2 Indicadores de Estado: Cualificación del estado de la pérdida de suelo por erosión hídrica ..... 40
3.4.3 Indicadores Respuesta: Implementación de la matriz de Fortalezas, Amenazas, Oportunidades y Debilidades ..... 41
**3.5 Limitaciones metodológicas ..... 41**
***CAPÍTULO IV ..... 43***
***RESULTADOS Y DISCUSIÓN ..... 43***
**4.1 Determinación de la pérdida de suelo por erosión hídrica empleando el modelo RUSLE. 43**
**4.2 Calibración del modelo RUSLE ..... 45**
**4.3 Cuantificación de la pérdida de suelo: un análisis de la profundidad efectiva de pérdida 46**
**4.4 Zonificación del riesgo de erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río Apuela ..... 46**
**4.5 Modelo Presión-Estado-Respuesta aplicado para la cuenca hidrográfica del río Apuela.. 47**
4.5.1 Indicadores de presión ..... 48
4.5.2 Indicador de estado ..... 50
4.5.3 Respuesta ..... 51
**4.6 Discusión ..... 60**
**4.6.1 Comparación de resultados con estudios previos ..... 60**
4.6.2 Calibración del modelo mediante PBIAS ..... 62
4.6.3 Clases agrologicas, uso potencial del suelo y conflictos de uso ..... 62
4.6.4 Estrategias de conservación ..... 63
***CAPÍTULO V ..... 64***
***CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..... 64***
**5.1 Conclusiones ..... 64**
**5.2 Recomendaciones ..... 65**
***CAPÍTULO VI ..... 67***
***REFERENCIAS ..... 67***
***ANEXOS ..... 76***

## ÍNDICE DE TABLAS

*Tabla 1. Tipos de erosión* _____ *5*

*Tabla 2. Técnicas para evitar la erosión* _____ *12*

*Tabla 3. Características físicas de la cuenca hidrográfica del río Apuela* _____ *17*

*Tabla 4. Valores del factor C según cobertura terrestre* _____ *26*

*Tabla 5. Clasificación de los valores PBIAS* _____ *36*

*Tabla 6. Densidad aparente del suelo (g/cm³)* _____ *36*

*Tabla 7. Categorías de erosión y sus principales características* _____ *37*

*Tabla 8. Capacidad de uso de suelo* _____ *39*

*Tabla 9. Uso potencial del suelo* _____ *40*

*Tabla 10. Combinación de la matriz FODA* _____ *41*

*Tabla 12. Matriz FODA de la cuenca del río Apuela* _____ *51*

*Tabla 13. Matriz de estrategias FA, FO, DO, DA derivadas del análisis FODA de la cuenca del río Apuela* _____ *53*

*Tabla 14. Matriz Operativa Estrategia 1* _____ *55*

*Tabla 15. Matriz Operativa Estrategia 2* _____ *57*

*Tabla 16. Matriz Operativa Estrategia 3* _____ *58*

*Tabla 17. Matriz Operativa Estrategia 4* _____ *59*

## ÍNDICE DE FIGURAS

*Figura 1. Estimación de erosión del suelo en el Ecuador* ..... *4*

*Figura 2. Fases de producción de sedimentos por erosión hídrica* ..... *9*

*Figura 4. Causas, impactos y consecuencias de la erosión* ..... *11*

*Figura 5. Pirámide de Kelsen del marco legal* ..... *15*

*Figura 6. Delimitación de la cuenca hidrográfica del río Apuela* ..... *17*

*Figura 7. Edafología de la cuenca hidrográfica del río Apuela* ..... *19*

*Figura 8. Esquema metodológico de la ecuación RUSLE* ..... *20*

*Figura 9. Esquema metodológico de la validación del modelo RUSLE* ..... *29*

*Figura 10. Punto de muestreo de agua* ..... *30*

*Figura 11. Toma de muestra de agua por la investigadora.* ..... *32*

*Figura 12. Puntos de muestreo del suelo a través de calicatas* ..... *33*

*Figura 13. Metodología aplicada en laboratorio para análisis de suelo.* ..... *34*

*Figura 14. Esquema del método Presión-Estado-Respuesta* ..... *38*

*Figura 15. Factores del modelo RUSLE* ..... *44*

*Figura 16. Erosión hídrica en la cuenca del río Apuela* ..... *45*

*Figura 17. Pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río Apuela.* ..... *46*

*Figura 18. Zonificación de la erosión hídrica en la cuenca del río Apuela* ..... *47*

*Figura 19. Uso potencial del suelo de la cuenca del río Apuela* ..... *48*

*Figura 20. Clases agrológicas de la cuenca del río Apuela* ..... *49*

*Figura 21. Conflictos de uso de suelo de la cuenca del río Apuela* ..... *49*

*Figura 22. Estrategias de conservación propuestas en la cuenca hidrográfica del río Apuela* ..... *55*

## ÍNDICE DE ANEXOS

*Anexo 1. Delimitación de la cuenca hidrográfica del río Apuela* ..... *76*

*Anexo 2. Edafología de la cuenca hidrográfica del río Apuela* ..... *76*

*Anexo 3. Punto de muestreo de agua* ..... *77*

*Anexo 4. Factor de erosividad de la cuenca hidrográfica del río Apuela* ..... *77*

*Anexo 5. Factor de erodabilidad de la cuenca hidrográfica del río Apuela* ..... *78*

*Anexo 6. Factor de longitud y pendiente de la cuenca hidrográfica del río Apuela* ..... *78*

*Anexo 7. Factor de cobertura de la cuenca hidrográfica del río Apuela* ..... *79*

*Anexo 8. Erosión hídrica en la cuenca del río Apuela* ..... *79*

*Anexo 9. Zonificación de la erosión hídrica en la cuenca del río Apuela* ..... *80*

*Anexo 10. Mapa de pérdida de suelo en la cuenca hidrográfica del río Apuela* ..... *80*

*Anexo 11. Clases agrológicas de la cuenca del río Apuela* ..... *81*

*Anexo 12. Uso potencial del suelo de la cuenca del río Apuela* ..... *81*

*Anexo 13. Conflictos de uso de suelo de la cuenca del río Apuela* ..... *82*

*Anexo 14. Estrategias de conservación y manejo del suelo* ..... *82*

*Anexo 15. Matriz de confusión de Marco Vanetti e índice Kappa* ..... *83*

*Anexo 16. Cálculo del PBIAS y RMSE para la validación del modelo RUSLE* ..... *83*

*Anexo 17. Cálculo del PBIAS y RMSE para la validación de la densidad aparente* ..... *84*

*Anexo 18. Resultados del análisis de suelo* ..... *84*

*Anexo 19. Resultados del análisis de agua* ..... *85*

*Anexo 20. Análisis de la textura de suelo de la cuenca hidrográfica del río Apuela* ..... *86*

*Anexo 21. Fotografías de salidas a campo* ..... *86*

**RESUMEN**

La erosión hídrica es el principal proceso de degradación del suelo que ocurre cuando la lluvia impacta en la superficie de la tierra. A nivel mundial, este proceso ocasiona cada año una pérdida significativa de la capa superficial del suelo, el cual afecta directamente la productividad agrícola y contribuye a la contaminación de ríos y lagos debido al transporte de sedimentos y nutrientes. El objetivo principal de la investigación es la evaluación del riesgo de erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río Apuela mediante la aplicación del modelo RUSLE con el fin de proponer estrategias de conservación. En la metodología se delimitó la zona de estudio para obtener los factores del método RUSLE con información calculada, a través de datos primarios: Propiedades del suelo desde SoilGRIDS; capa temática de uso y capacidad de los suelos desde SIGTIERRAS y datos hidrológicos desde el INAMHI. Se registró la tasa media de erosión hídrica de 2.08 ton/ha/año equivalente a 1.30 cm/año con distribuciones irregulares en la cuenca hidrográfica. La mayoría del territorio registró un riesgo nulo en las zonas altas, mientras que el riesgo alto es menor y se encuentra en los poblados de la zona baja de la cuenca. Aunque el riesgo de erosión hídrico no es alto en la actualidad, no significa que la cuenca esté exenta de riesgo, sino que este resultado proporciona una base sólida de la situación edafológica. Los resultados obtenidos constituyen una herramienta fundamental para la toma de decisiones por los Gobiernos Autónomos Descentralizados. Además, orienta a la formulación de medidas de manejo y conservación de suelo ajustadas a las condiciones reales del territorio.

**Palabras clave:** erosión hídrica, degradación, cuenca, RUSLE, riesgo, edafológica, conservación de suelo

## ABSTRACT

Water erosion is the primary process of soil degradation that occurs when rain strikes the earth's surface. Globally, this process causes a significant loss of topsoil each year, which directly affects agricultural productivity and contributes to the pollution of rivers and lakes due to the transport of sediments and nutrients. The main objective of this research is to assess the risk of water erosion in the Apuela River watershed by applying the RUSLE model in order to propose conservation strategies. The methodology involved delineating the study area to obtain the RUSLE model parameters using information derived from primary data: soil properties from SoilGRIDS; a thematic layer on land use and soil capacity from SIGTIERRAS; and hydrological data from INAMHI. The average water erosion rate was recorded at 2.08 metric tons/ha/year, equivalent to 1.30 cm/year, with irregular distributions across the watershed. Most of the territory showed zero risk in the upper areas, while high risk is less prevalent and is found in the villages in the lower part of the watershed. Although the risk of water erosion is not currently high, this does not mean that the watershed is risk-free; rather, this result provides a solid basis for understanding the soil conditions. The results obtained constitute a fundamental tool for decision-making. Most of the territory showed zero risk in the highlands, while high risk is less prevalent and is found in the villages in the lower part of the watershed. Although the risk of water erosion is not high at present, this does not mean that the watershed is risk-free; rather, this result provides a solid basis for understanding the soil conditions. The results obtained serve as an essential tool for decision-making by decentralized autonomous governments. Furthermore, they guide the formulation of soil management and conservation measures tailored to the actual conditions of the territory.



**Keywords:** water erosion, degradation, watershed, RUSLE, risk, edaphological, soil conservation

# CAPÍTULO I

# INTRODUCCIÓN

En el Ecuador se han realizado investigaciones para evaluar la erosión hídrica en diferentes cuencas y subcuencas hasta abarcar todo el sistema hídrico al que pertenecen tanto de la vertiente Amazónica como de la vertiente del Pacífico (Arias-Muñoz et al., 2023; Aray Saltos et al, 2024; Andrade-Carreño et al., 2025). Aunque es poca la información que se posee sobre el riesgo de erosión del suelo en el país es esencial analizar estudios previos tanto nacionales como regionales junto con la normativa y las implicaciones para la gestión del suelo, con el fin de sustentar las decisiones metodológicas de la investigación.

La cuenca del río Apuela, está ubicada en el cantón Cotacachi, provincia de Imbabura, y constituye un sistema hidrográfico estratégico para la región de Intag. Los ecosistemas que abarca esta cuenca son bosques siempreverdes montanos, páramos y áreas agrícolas, estos mantienen tanto la biodiversidad como las actividades productivas de las comunidades locales (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural de Apuela, 2015). En base a esta información, en el período 2002-2023, estudios de teledetección evidenciaron que, el territorio mantuvo una cobertura ecosistémica del 86.46% donde se evidencia una estabilidad aparente, también se registró perdida de bosque montano y una expansión de cultivo del 3% los que ha generado presiones sobre la calidad ambiental en la cuenca (Andrade, 2025).

## 1.1 Revisión de antecedentes

La erosión hídrica es uno de los principales procesos de degradación del suelo, que afecta la productividad agrícola y contribuye a la contaminación de los cuerpos de agua debido al transporte de sedimentos y nutrientes (Morgan, 2005). Considerándose como el desafío principal para la gestión sostenible de los recursos naturales y del suelo. Este fenómeno ocurre cuando la lluvia impacta en la superficie de la tierra y causa el desprendimiento de partículas del suelo que son arrastradas por el agua en movimiento (Carranza-Patiño et al., 2024). Los factores que influyen en este proceso son la intensidad y duración de las lluvias, la presencia de cobertura vegetal, la inclinación del terreno y las técnicas utilizadas para el manejo del suelo (Arias-Muñoz et al., 2023). Además, en América Latina, las características climáticas y geográficas, así como las actividades humanas, como la deforestación y los sistemas agrícolas

intensivos, provocan que este problema se agrave y que estas áreas resulten vulnerables (Palomino & Ccoa, 2022).

En Ecuador los problemas de erosión del suelo se pueden ver reflejados en problemas de estabilización de taludes por la textura de suelo (Macías et al., 2021). Al realizar análisis de textura de suelo en la cuenca del río Esmeraldas se obtuvo arena 35%, arcilla 26%, limo 32% y SOC (Soil Organic Carbon) 6% de la materia orgánica concentrada en la capa superficial. A pesar de que la cuenca del río Esmeraldas es uno de los sistemas hidrográficos de la vertiente del Pacífico, no se han registrado suficientes datos en cuanto a pérdida de suelo por erosión hídrica. Dicho estudio solo se enfocó en el Factor K o erodabilidad del suelo, que concluyó que existe una baja erosión en la cuenca con rangos entre 0.04 – 0.011 ton/ha*MJ*MM, que significó que no existe un riesgo elevado de problemas erosivos (Fernández et al., 2023).

### 1.2 Problema de investigación

La erosión hídrica en la cuenca del río Apuela establece una amenaza para la estabilidad ecológica, social y económica de la zona. La erosión hídrica depende de la acción de factores naturales y actividades humanas que provocan la pérdida continua de suelos fértiles, para la productividad agrícola y la seguridad alimentaria de las comunidades. Junto con la accidentada topografía presente en el área de estudio se incrementa la vulnerabilidad de suelo en laderas escarpadas. Que disminuyen progresivamente la capa fértil, esto facilita el lavado de suelo y el arrastre de sedimentos hacia los afluentes más cercanos.

La combinación de relieves abruptos, prácticas agropecuarias no sostenibles y la reducción de cobertura vegetal en áreas críticas de bosque nativo ha intensificado la pérdida de superficie fértil, sedimentación de cauces y la alteración de los ciclos hidrológicos. Esto evidencia la urgencia de proponer medidas para la cuantificación de la erosión, para delimitar zonas críticas, lo cual pueden ser utilizadas por instituciones y comunidades en la implementación de estrategias de conservación. Al tener en cuenta la normativa legal vigente, tanto nacional como provincial, cantonal y local, se puede implementar medidas en distintos territorios para la gestión y uso del recurso suelo.

### 1.3 Justificación de investigación

La erosión hídrica afecta la productividad agrícola, la disponibilidad de agua y la estabilidad de los ecosistemas (Espinosa et al., 2022). En la cuenca del río Apuela la

combinación de factores naturales y actividades antrópicas han incrementado la vulnerabilidad del suelo, reduce la capa fértil, aumenta el arrastre de sedimentos y altera los ciclos hidrológicos. Esta investigación fue crucial, al permitir la identificación de los principales factores que contribuyen la erosión hídrica de la cuenca y delimitan las zonas más vulnerables para proponer alternativas de gestión sostenible de suelo. Además, los resultados de este estudio contribuyen al diseño de medidas de mitigación, que se adapten a las características geomorfológicas y socioambientales de la zona, al promover prácticas agrícolas sostenibles, que fortalezcan la restauración ecológica y el manejo adecuado del suelo, para beneficiar a las comunidades locales y que el impacto ambiental de la erosión se vea reducido.

## 1.4 Pregunta directriz de la investigación

- ¿Cuál es la pérdida de suelo causada por la erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río Apuela?

## 1.5 Objetivo

### Objetivo general

Evaluar el riesgo de erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río Apuela mediante la aplicación del modelo RUSLE con el fin de proponer estrategias de conservación.

### Objetivos específicos

1. Determinar la pérdida de suelo causada por erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río Apuela mediante la aplicación del modelo RUSLE.
2. Zonificar el riesgo de erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río Apuela.
3. Proponer estrategias de conservación del suelo para mitigar los efectos de erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río Apuela.

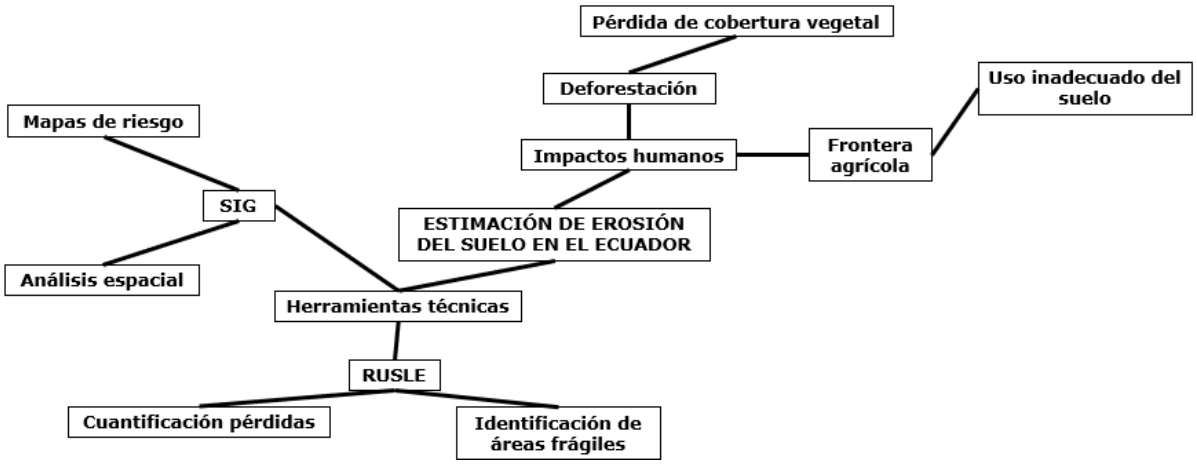
# CAPÍTULO II

# REVISION DE LITERATURA

## 2.1 Evaluación de la erosión hídrica del suelo

La erosión hídrica del suelo constituye uno de los principales problemas ambientales en Ecuador, el avance acelerado de este fenómeno ha generado extensas áreas infértiles y una notable degradación y agotamiento de los recursos naturales, el cual afecta a la biodiversidad, la fertilidad de los suelos y la sostenibilidad de las actividades productivas locales (Espinosa et al., 2022). Diversos estudios han señalado que factores como la intensidad y duración de las precipitaciones, la pendiente, la cobertura vegetal y las prácticas de manejo agrícola son determinantes en la susceptibilidad de los suelos a la erosión hídrica (Camargo & Andrés, 2017; Cherlinka, 2022; Andrade-Carreño et al., 2025; Sergieieva, 2025). En la Figura 1 se presenta un proceso metodológico para la estimación de erosión del suelo en Ecuador.

***Figura 1***. *Estimación de erosión del suelo en el Ecuador*




En el contexto ecuatoriano, la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) junto con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), permiten identificar las áreas más frágiles de una zona (Andrade-Carreño et al., 2025). Dicho modelo busca cuantificar las pérdidas potenciales de suelo para orientar la implementación de estrategias de conservación con el propósito de devolver al territorio su capacidad de sustento. Además, se reconoce que la intervención humana, a través de la deforestación, el avance de la frontera agrícola y el uso inadecuado del suelo ha intensificado el proceso erosivo, lo que subraya la necesidad de estudios específicos que permitan comprender la magnitud y distribución del riesgo en territorios como el de la cuenca del río Apuela.

### 2.1.1 Erosión Hídrica

La erosión hídrica y sus diferentes tipos representan un riesgo significativo para la estabilidad del suelo, la calidad del agua y la sostenibilidad ambiental, especialmente en zonas con alta densidad poblacional y menor cobertura vegetal (Tabla 1). La investigación destaca la necesidad urgente de implementar medidas de mitigación y manejo sostenible del suelo para reducir estos riesgos, y considera además los efectos amplificados del cambio climático. La metodología resulta adaptable para otras regiones con condiciones similares, facilita una gestión integral y preventiva de la erosión hídrica en cuencas hidrográficas y territorios amplios (Andrade-Carreño et al., 2025).

***Tabla 1.*** *Tipos de erosión*

| Tipos | Características |
|---|---|
| **Erosión Hídrica** | Es la fuerza principal en una cuenca y ocurre en diferentes etapas de manera progresiva:<br>**Erosión por salpicadura:** El impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo desnudo desprende partículas.<br>**Erosión laminar:** El agua de escorrentía fluye en una capa delgada, esta arrastra una capa uniforme de suelo.<br>**Erosión en surcos:** El agua se concentra en pequeños canales o riachuelos.<br>**Erosión en cárcavas:** Los surcos se profundizan y ensanchan, forma canales grandes e insalvables.<br>**Erosión de riberas:** Es el desgaste de las orillas de los ríos por el exceso de caudal o velocidad del agua |
| **Erosión Gravitatoria** | Se genera por la fuerza de gravedad y la inestabilidad de las laderas:<br>**Deslizamientos:** Movimientos en masa de grandes cantidades de tierra y roca ladera abajo.<br>**Derrumbes y caídas de rocas:** Desprendimientos repentinos comunes en topografías muy escarpadas, como ocurre frecuentemente en los Andes ecuatorianos |
| **Erosión Eólica** | Causada por la fuerza del viento que levanta y transporta partículas de suelo. Es más frecuente en zonas planas, secas y con poca cobertura vegetal, provoca la pérdida de la capa fértil. |
| **Erosión Antrópica** | Provocada por las actividades humanas que alteran el suelo natural:<br>**Prácticas agrícolas inadecuadas:** El arado excesivo en favor de la pendiente y la deforestación.<br>**Urbanización y minería:** Modificaciones del terreno y alteración de los cauces naturales. |

*Fuente: Cherlinka (2022), Firoozi (2024), Sergieieva (2025), GeografiAndo (2025)*

El estudio sobre la distribución espacio-temporal de los reducidos y la erosión hídrica en una cuenca andina tropical resalta que la topografía escarpada, la alta variabilidad climática y la composición heterogénea del suelo hacen que estas cuencas sean altamente vulnerables a procesos erosivos y movimientos en masa. La erosión hídrica no solo provoca la pérdida significativa de suelo en las laderas, sino que también incrementa la sedimentación en los sistemas fluviales, afecta la calidad del agua y daña infraestructuras civiles (Vanacker et al., 2020). La erosión hídrica en estas cuencas puede alcanzar tasas muy elevadas, con valores reportados que varían desde 0 hasta más de 800 t/ha/año, y una media aproximada de 33 t/ha/año, lo que indica una erosión severa especialmente en áreas con poca cobertura vegetal y pendientes pronunciadas (Arias-Muñoz et al., 2023).

En zonas andinas, los eventos climáticos extremos como El Niño intensifican estos riesgos, afecta en sectores vulnerables, al sufrir ciclos de humedecimiento y secado a una velocidad diferente a lo habitual, sin permitir la infiltración natural del agua lluvia, debido a esto los sedimentos se transportan por escorrentía superficial donde aumenta sus niveles en los sistemas de drenaje a los cauces naturales (Grupo Excala, 2025). En particular, las áreas con suelos expuestos, pendientes abruptas y lluvias intensas presentan las mayores tasas de erosión, algunas superiores a 190 t/ha/año, lo que pone en peligro la fertilidad del suelo y la sostenibilidad ambiental (Andrade-Carreño et al., 2025).

El estudio en la provincia de Manabí (Ecuador) emplea el modelo geoespacial RUSLE para estimar tasas de erosión y evaluar el riesgo en todo el territorio provincial, supera el enfoque limitado a cuencas específicas (Andrade-Carreño et al., 2025). Los resultados indican que el 68% de los cantones presentan un riesgo medio-alto y muy alto de erosión, con tasas que varían entre 0.06 y 190.49 t/ha/año, lo que evidencia una distribución irregular pero preocupante del fenómeno, que consecuentemente genera mayor riesgo de inundaciones en la temporada de lluvias extremas y altera ecosistemas acuáticos por exceso de sedimentos (Aray et al., 2024).

Los estudios enfatizan el uso de modelos geoespaciales como RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) para mapear y cuantificar la erosión hídrica, al integrar factores determinantes que influyen en el riesgo de pérdida de suelo (Wischmeier & Smith, 1978). Dichos factores son la erosividad de la lluvia, la erosionabilidad del suelo, la pendiente del terreno, la cobertura vegetal y las prácticas de conservación. La aplicación de RUSLE en entornos de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite obtener mapas detallados de distribución espacial de la erosión. Los mismos facilitan la identificación precisa de zonas

críticas con alta vulnerabilidad, lo que es clave para orientar estrategias de manejo y conservación del suelo (Molina et al., 2021).

### 2.1.2 Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica

La erosión del suelo es un fenómeno de degradación natural provocado por la convergencia de factores naturales que se ha agravado por factores antrópicos que han alterado el ciclo de clima esto causa un aumento en el nivel del calentamiento global y las lluvias extremas (Caiza, 2018). Estas deterioran los nutrientes del suelo, al reducir significativamente la fertilidad y consecutivamente su productividad. Las cuencas interandinas se ven especialmente afectadas por un rápido aumento de la población que conduce a la conversión de grandes áreas de bosque montano en pastizales y tierras de cultivo (Ochoa et al., 2013). En Ecuador, la preocupación por medir la erosión ha crecido, especialmente en áreas con alto crecimiento poblacional, aunque los estudios suelen centrarse en cuencas específicas o factores aislados, se limitan las soluciones integrales (Andrade-Carreño et al., 2025).

Para determinar la vulnerabilidad del suelo se toma en cuenta la erosión hídrica, es necesario estimar las tasas de pérdida de suelo por erosión, se han registrado más de 400 modelos distintos para calcular la erosión del suelo, pero sus componentes no permiten que todas las opciones sean aplicables (Borrelli et al., 2021). En Ecuador, el número de metodologías aplicables se reduce por las condiciones ambientales diferentes que afectan al comportamiento de los factores. Además, la base de datos meteorológicos a cargo del Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología (INAMHI) es una limitante debido al deficiente registro. Varias investigaciones han afirmado que la distribución espacial no homogénea de estaciones de aforo del INAMI, genera una estimación que no es representativa de las precipitaciones en todo el territorio nacional, esto afecta la calidad de los análisis hidrológicos y climáticos (Erazo et al., 2018; Aray et al, 2024; Andrade-Carreño et al., 2025).

Entre los modelos disponibles, RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) ha sido una de las ecuaciones más utilizadas a nivel de Sudamérica y la más empleada en Ecuador (Borrelli et al., 2021). Es el modelo más utilizado para adaptarse fácilmente a las condiciones del medio, ya que las metodologías convencionales no siempre son compatibles con las características del país. Este modelo requiere del cálculo de cinco factores: Factor R, conocido como erosividad de la lluvia y desencadenante de la erosión hídrica; Factor K, erodabilidad del suelo; Factor LS, resultante de la combinación de los parámetros de longitud y la gradiente de

la pendiente; Factor C, uso y cobertura del suelo y; Factor P, prácticas de apoyo agrícola (Wischmeier & Smith, 1978; Renard et al., 1997; Andrade-Carreño et al., 2025).

Su aplicación en Ecuador en diferentes estudios ha sido validada en varias cuencas hidrográficas, donde se demuestra resultados confiables y útiles para la planificación y manejo sostenible del suelo en regiones con diversidad climática y topográfica como los Andes (Arias-Muñoz et al., 2023; Aray et al, 2024; Andrade-Carreño et al., 2025). La facilidad para combinar datos locales con herramientas geoespaciales y su capacidad para generar mapas de erosión detallados hacen que al utilizar la metodología del modelo RUSLE sea una herramienta preferida para apoyar la toma de decisiones en conservación de suelos en el país (Delgado et al., 2022).

### 2.1.3 Relación entre la producción de sedimentos con la erosión hídrica en cuencas hidrográficas

La producción de sedimentos (SY) se define como el proceso de descarga de material erosionado desde una sección específica del cauce del río, por unidad de área de drenaje y por unidad de tiempo, que es la pérdida total de sedimento del área (Rabelo et al., 2026). La relación entre la producción de sedimentos (SY) y la erosión hídrica en cuencas hidrográficas se explica mediante el concepto de la relación de entrega de sedimentos (SDR). Mientras que la erosión hídrica representa el desprendimiento total de suelo en las laderas por efecto de la precipitación y la escorrentía, la producción de sedimentos (SY) corresponde únicamente a la fracción de ese material erosionado que efectivamente logra salir de la cuenca y llegar a su punto de desagüe (Lu et al., 2004).

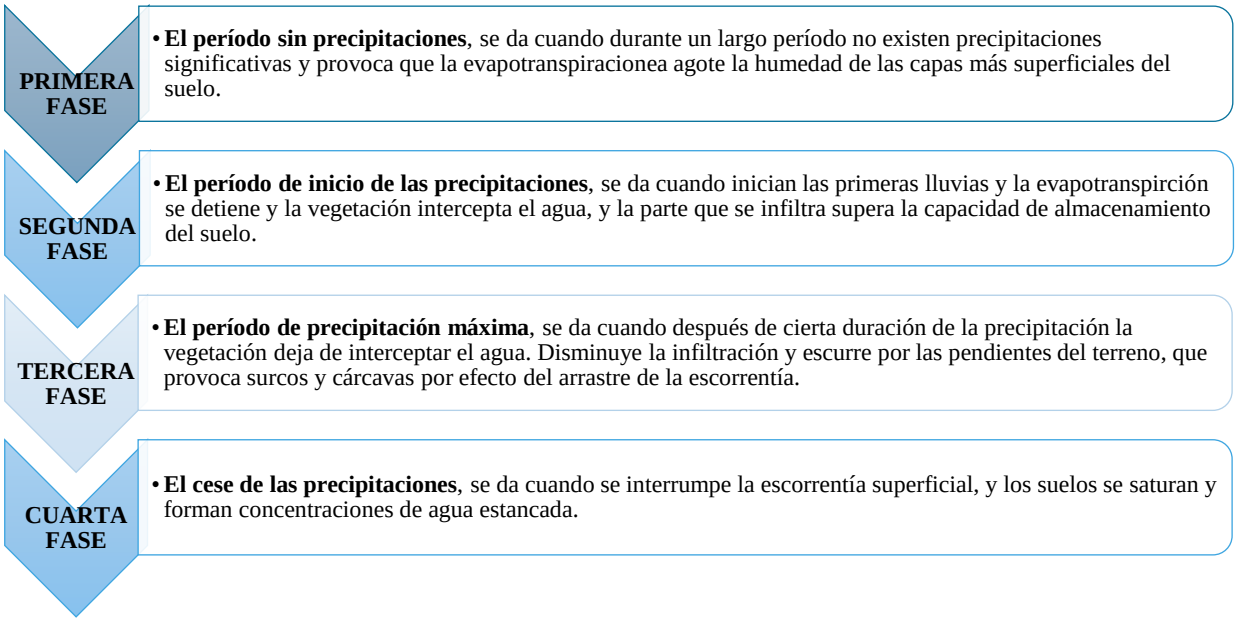
Para estimar la erosión y rendimiento del suelo dentro de una cuenca se desarrolló el concepto de relación de entrega de sedimentos (SDR), para explicar cómo entre la variación de carga de sedimentos de una cuenca se compara con el área de la superficie (Tiruwa et al., 2021). La SDR es la proporción entre el rendimiento de sedimentos en el río y la erosión total en la cuenca. Es necesario comparar la predicción del transporte y la deposición de sedimentos con los resultados de los valores observados (Tamrakar & Karki, 2019). No obstante, la erosión del sedimento está relacionada con su desprendimiento, mientras que la entrega está asociada al almacenamiento, movilización y transporte del sedimento hacia la salida (Yigez et al., 2021).

El RUSLE solo estima la erosión media anual del suelo por erosión laminar en las zonas vulnerables a dicha degradación. Sin embargo, no tiene en cuenta la deposición y no puede

estimar el rendimiento de sedimentos en ubicaciones aguas abajo, por lo que necesariamente se manifiesta el uso de SDR (Renard et al., 1997). SDR para cualquier cuenca depende de una amplia gama de factores hidrogeológicos, geomorfológicos y ambientales como el relieve, las características de las laderas, el agua subterránea, el patrón de drenaje, las variaciones climatológicas, la cobertura vegetal, la textura del suelo, etc. SDR es un factor entre 0 y 1 que indica la proporción del sedimento erosionado que realmente se moviliza y sale de la cuenca, siendo mayor cerca de los ríos y menor en las zonas altas o alejadas del cauce (Walling, 1983).

Según el análisis de correlación sobre el rendimiento espacial de sedimentos al usar RUSLE, el factor topográfico (LS) es el parámetro más sensible respecto a la erosión de sedimentos. Las zonas de pendientes más pronunciadas cerca de la ladera del río se vuelven vulnerables a la erosión del suelo (Tiruwa et al., 2021). En las zonas de topografía más alejadas del cauce, aunque pueda existir erosión, gran parte del sedimento queda atrapado en el trayecto debido a la menor energía del flujo. La topografía no solo condiciona el desprendimiento del suelo, sino también su transporte y depósito a lo largo de la cuenca (Yigez et al., 2021). El enfoque empleado en este estudio podría aplicarse potencialmente en otras cuencas con características fisiográficas similares para la estimación del rendimiento sedimentario (Ghimire et al., 2024).El proceso de la producción de sedimentos (SY) por erosión hídrica se puede describir mediante fases (Figura 2).

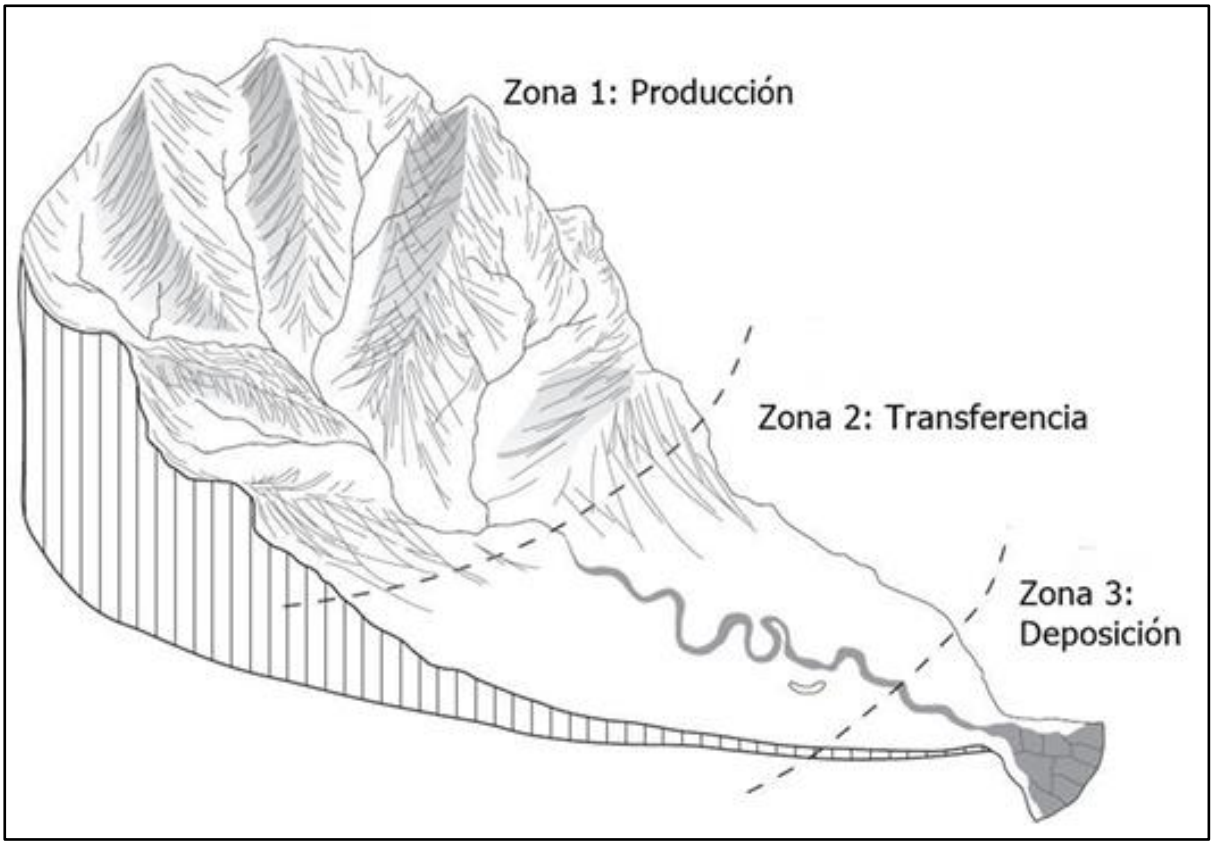
***Figura 2.*** *Fases de producción de sedimentos por erosión hídrica*




*Nota. Adaptada de Matarrita (2021).*

Una cuenca como sistema se subdivide en tres zonas geomorfológicas donde se llevan a cabo la producción de sedimentos (Figura 3): A) zona de producción se refiere a las partes altas de la cuenca, donde las pendientes son más pronunciadas y son propensas a desprendimientos de rocas y movimientos de masas de suelo y la lámina de escorrentía logra alcanza la mayor cantidad de sedimentos, B) zona de transferencia se refiere a la zona de la cuenca donde las pendientes menos pronunciadas y la producción de sedimentos depende de variaciones en el clima, fuerza tectónica y actividades antropogénicas y C) zona de deposición se ubica en las partes bajas de la cuenca, donde las bajas pendientes y las velocidades aumenta el material que se sedimenta en el fondo del cauce (Matarrita, 2021).

**Figura 3.** Zonas geomorfológicas para la producción de sedimentos




*Fuente: Charlton (2008), Matarrita (2021)*

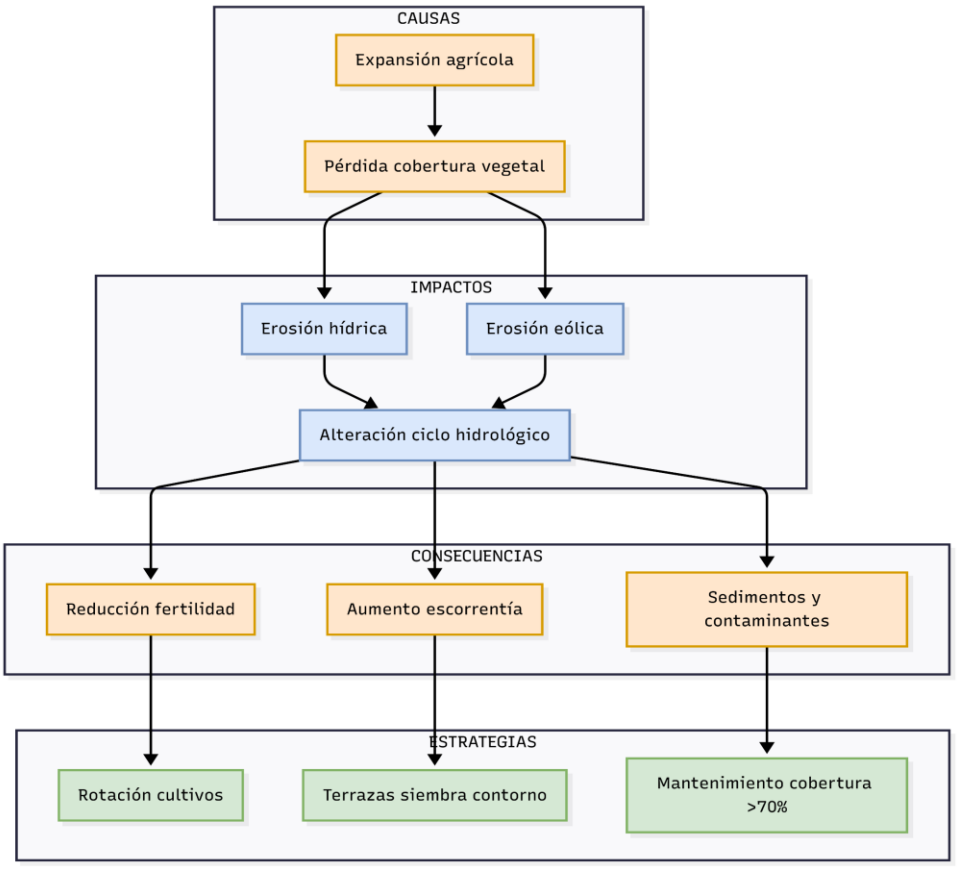
### 2.1.4 Conservación del Suelo Frente a la Erosión

Las cuencas hidrográficas en varias regiones del mundo presentan procesos de degradación ambiental donde se representa un desafío para la conservación de recursos naturales. Dicho deterioro inicia con la pérdida de cubierta vegetal por múltiples factores naturales y antrópicos de índole económica, social y cultural. La erosión y pérdida de propiedades físicas y químicas del suelo en su mayoría son provocados por la deforestación

para la expansión de la frontera agrícola que representa la explotación intensiva de recursos naturales sin considerar la capacidad de regeneración y las consecuencias que representan para la seguridad humana (Andrade-Carreño et al., 2025).

En la Figura 4 se presenta la pérdida de cobertura vegetal tiene consecuencias directas sobre el suelo, al actuar como una barrera natural de protección sobre la acción del agua y el viento. Al quedar expuesto a procesos de erosión hídrica y eólica pierde poco a poco sus propiedades derivadas a la compactación, la reducción de porosidad, incremento de la escorrentía superficial y disminución de la capacidad de infiltración del agua que altera el ciclo hidrológico del agua al limitar la cantidad de agua que recarga los acuíferos (Camargo & Andrés, 2017). Al no existir un manto natural se aumenta significativamente el transporte de sedimentos y contaminantes que van hacia los cuerpos de agua perjudica la calidad y cantidad del ambiente (Andrade, 2025). La alteración del régimen hídrico implica problemas ambientales, sociales y económicos por la limitada producción agrícola origina una reducción en los ingresos de las familias, otra de las consecuencias es la mayor frecuencia de desastres naturales como inundaciones y deslizamientos causa daños y pérdidas materiales y humanas (Tayupanta & Jorge, 1993).

***Figura 4.*** *Causas, impactos y consecuencias de la erosión*



La conservación del suelo promueve y ayuda a la infiltración de agua y la fertilidad del suelo que contribuye a la preservación de ecosistemas, dado que es fundamental la implementación de estrategias de conservación y manejo sostenible de las cuencas hidrográficas (Tayupanta & Jorge, 1993). Para mantener una restauración natural de la cobertura vegetal se recomienda realizar prácticas de manejo sostenible, uso y conservación de suelo para el mantenimiento de la capacidad de los sistemas productivos agrícolas, al permitir la mejora de la calidad de los recursos naturales y evitar la sedimentación y la contaminación del suelo (Carranza-Patiño et al., 2024).

La implementación de estrategias de conservación y manejo sostenible del recurso edáfico es fundamental para mitigar los efectos negativos de la erosión hídrica y lograr garantizar la productividad agrícola a largo plazo. Estas técnicas de conservación integran varias acciones agrícolas, físicas, ecológicas y sociales que buscan proteger los ecosistemas por medio de algunas técnicas (Tabla 2). Según el estudio realizado en la cuenca del río Mira en los Andes de Ecuador, el uso de modelos como RUSLE permite estimar la erosión y así identificar las áreas más vulnerables, lo que facilita la planificación de prácticas de conservación adecuadas para reducir la pérdida de suelo y proteger los recursos hídricos. (Arias-Muñoz et al., 2023)

***Tabla 2.*** *Técnicas para evitar la erosión*

| Técnica | Descripción |
|---|---|
| **Rotación de cultivos y uso de abonos orgánicos** | Aporta al mejoramiento de la calidad y fertilidad del suelo y reduce emisiones de gases de efecto invernadero, contribuye a la mitigación del cambio climático. |
| **Construcción de terrazas y siembra en contorno** | Controlan la escorrentía en terrenos inclinados, reduce la velocidad del agua y evita la pérdida de suelo. |
| **Forestación y plantación de árboles en márgenes de cuerpos de agua** | Actúan como barreras naturales que fijan el suelo y disminuyen el arrastre de sedimentos, protege la calidad del agua. |
| **Mantener una cobertura vegetal superior al 70%** | Protege el suelo de la erosión pluvial al evitar la exposición directa a la lluvia y reducir el desprendimiento de partículas del suelo. |
| **Educación y participación comunitaria** | Fundamental para el éxito de las estrategias de conservación y para fomentar prácticas sostenibles en el manejo del suelo |

***Fuente:*** *Arias-Muñoz et al. (2023), Suárez et al. (2024), Sergieieva (2025)*

## 2.2 Marco legal

El artículo 411 de la Constitución de la República del Ecuador asegura la protección y conservación de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos, para la permanencia de las futuras generaciones. Este artículo de la constitución resalta la

importancia de estrategias sostenibles para preservar la calidad y cantidad del agua. Dentro del contexto en el que se encuentra la cuenca del río Apuela, la erosión hídrica representa un desafío significativo, que afecta la estabilidad del suelo y la disponibilidad del recurso hídrico (Asamblea Nacional del Ecuador, 2008).

Dentro de los acuerdos internacionales relacionados con la conservación de los recursos naturales y el desarrollo sostenible se encuentra la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CLD), adoptada en 1994 y ratificada por Ecuador en 1996. Esta convención promueve la Neutralidad de la Degradación de la Tierra (NDT), cuyo objetivo es evitar la pérdida neta de tierras productivas mediante la recuperación y restauración de áreas degradadas donde busca mantener o incrementar la capacidad productiva de los suelos y garantizar su sostenibilidad a largo plazo (United Nations, 2020).

Otro instrumento relevante es la Convención sobre la Diversidad Biológica (CDB) de 1992 y ratificada por Ecuador en 1993. Esta convención reconoce que la biodiversidad constituye un patrimonio de importancia mundial y establece tres objetivos fundamentales: la conservación de la diversidad biológica, el uso sostenible de sus recursos y la distribución justa y equitativa de los beneficios derivados de los recursos genéticos. Su aplicación contribuye a la protección de los ecosistemas y al aprovechamiento responsable de los recursos naturales (United Nations, 2020)

Asimismo, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 establecen metas orientadas a la protección ambiental y al bienestar humano. Entre ellas destacan la disponibilidad, la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos, también la gestión sostenible de los bosques, la restauración de tierras degradadas, la lucha contra la desertificación y la conservación de la biodiversidad. Estas metas buscan promover el desarrollo que permita satisfacer las necesidades contemporáneas sin comprometer los recursos de las generaciones futuras (Gobierno de Ecuador, 2021).

El Artículo 14 del Código Orgánico del Ambiente establece el derecho de la población a vivir en armonía con el medio ambiente, esto destaca la importancia de la conservación de los ecosistemas y la recuperación de áreas degradadas. Refiriéndonos a la erosión hídrica, este artículo sustenta que al aplicar estrategias de mitigación que protejan los suelos donde garantizan la calidad del agua en la cuenca del río Apuela. Por su parte, el Artículo 73 establece que el Estado debe tomar medidas de precaución y restricción frente a actividades que puedan

dañar los ecosistemas o alterar ciclos naturales, refuerza así la obligación de implementar acciones preventivas contra la erosión del suelo, evita su impacto en la estabilidad hídrica y el equilibrio ambiental de la región (Asamblea Nacional del Ecuador, 2018).

La Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (LORHUyA) establece principios fundamentales para la gestión sostenible del agua en Ecuador, reconociéndose como un patrimonio nacional estratégico en su Artículo 12, lo que refuerza la necesidad de garantizar su conservación frente a amenazas como la erosión hídrica. El Artículo 64 habla sobre la importancia de la planificación y gestión de los recursos hídricos, incluye medidas de restauración de cuencas hidrográficas, que permite abordar los impactos de la degradación del suelo en la calidad del agua (Gobierno de Ecuador, 2014)

Asimismo, el Artículo 138 obliga al Estado a implementar estrategias de sostenibilidad ambiental en el manejo del agua, asegura la protección de ecosistemas frágiles como la cuenca del río Apuela. En este sentido, el Artículo 313 refuerza el control estatal sobre los recursos hídricos, asegura que la actividad relacionada con su uso tenga medidas de protección para evitar procesos de erosión. Finalmente, el Artículo 318 prioriza el consumo humano y el caudal ecológico, lo que respalda la necesidad de minimizar la pérdida de suelo y garantizar la estabilidad hídrica de los sistemas acuáticos en la región.

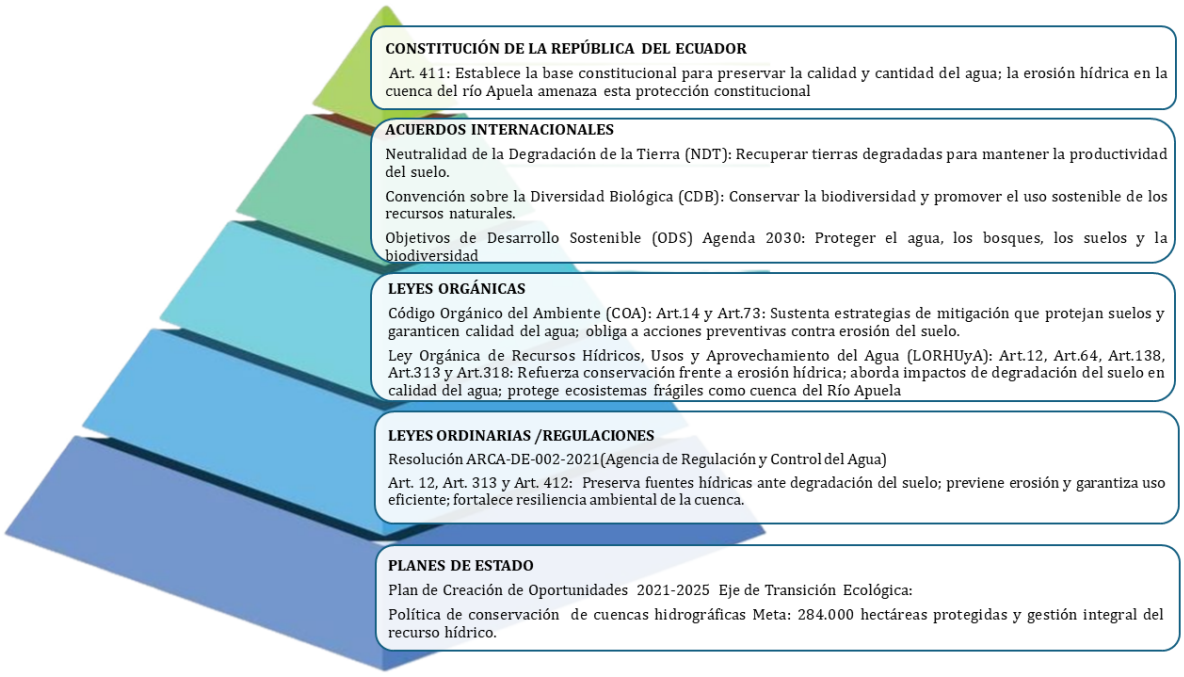
La Resolución **A**RCA-DE-002-2021 emitida por la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), establece lineamientos fundamentales para su gestión; en el Artículo 12 reconoce el agua como un derecho humano fundamental, refuerza la necesidad de preservar las fuentes hídricas ante la degradación del suelo. Asimismo, el Artículo 313 resalta el control estatal sobre los recursos hídricos, al poder promover medidas de conservación que garanticen su uso eficiente. Por su parte, el Artículo 412 regula la planificación y el control del agua, donde establece estrategias para la protección de cuencas hidrográficas. En este sentido, la aplicación de esta normativa es clave para fortalecer la resiliencia ambiental de la cuenca del río Apuela y garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos (Gobierno de Ecuador, 2021).

El Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025, dentro de su Eje de Transición Ecológica, establece políticas enfocadas en la gestión sostenible del agua y la conservación de cuencas hidrográficas. Lo que resulta fundamental e importante para la evaluación de riesgo de Erosivo de la cuenca hídrica del río Apuela. La política de conservación de cuencas hidrográficas garantiza la restauración de ecosistemas degradados y la protección de fuentes

hídricas e impulsa estrategias que minimicen la pérdida de suelo y reduzcan la sedimentación en cuerpos de agua (Gobierno de Ecuador, 2021).

Asimismo, la meta de incremento del territorio bajo protección hídrica, que proyecta y refuerza la necesidad de implementar medidas que estabilice las áreas propensas a la erosión. La gestión integral del recurso hídrico impulsa un uso sostenible del agua que fomenta la conservación de los ciclos hidrológicos, dado que es la clave para la mitigación de procesos erosivos en la cuenca. En este sentido, el marco legal vigente respalda la importancia de evaluar la erosión hídrica como un factor que incide directamente en la calidad y cantidad del agua disponible, asegura la resiliencia de los ecosistemas y el bienestar de las comunidades locales (Figura 5).

***Figura 5***. *Pirámide de Kelsen del marco legal*



# CAPÍTULO III

# METODOLOGÍA

Se realizó un estudio que enmarca un diseño de investigación descriptivo transversal, con el propósito de caracterizar la magnitud y distribución de la erosión hídrica en la cuenca del río Apuela a través de la aplicación del modelo RUSLE. Por medio de este enfoque se describe las condiciones actuales del suelo y los diferentes factores que inciden en la perdida de cobertura vegetal. La naturaleza transversal del diseño se obtiene mediante la toma de muestras de agua y suelo. Se realiza análisis de agua y suelo en laboratorio para determinar sus propiedades y determinar el nivel de erodabilidad de la cuenca. De esta manera, este estudio ofrece un diagnóstico que constituye una base sólida para formular estrategias de conservación y manejo sostenible de la cuenca.

## 3.1 Descripción del área de estudio

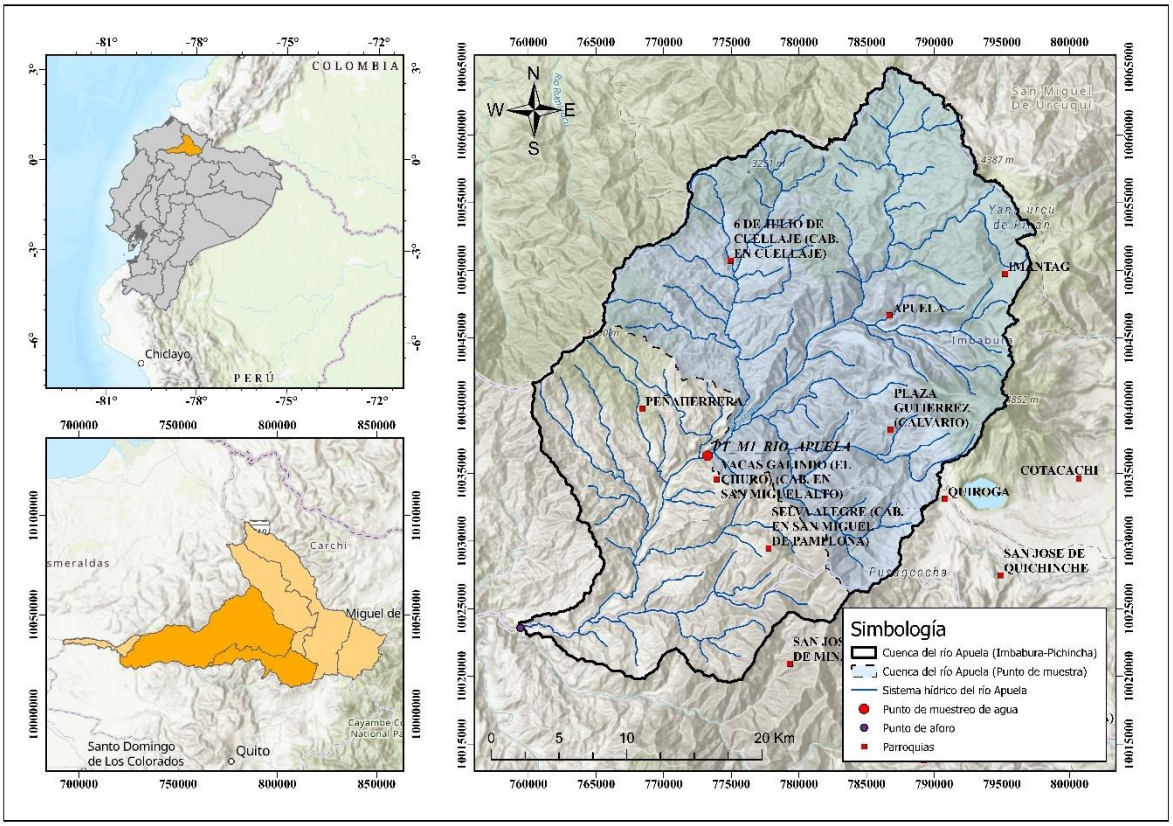
La cuenca hidrográfica del río Apuela posee 104409.79 ha dentro del sistema hidrográfico del río Esmeraldas categorizado dentro de la vertiente del océano Pacifico. Geográficamente se encuentra localizada al noroccidente de Ecuador y al sur occidente de Colombia. La cuenca se encuentra en su mayoría en la provincia de Imbabura en el cantón Cotacachi, abarca las parroquias de Peñaherrera, García Moreno, Selva Alegra, Vacas Galindo, Apuela y una pequeña parte se encuentra en la zona norte de Pichincha. Se ubica en el sector subtropical de la zona de Intag, donde el río Apuela junto con el río Toabunche forman al occidente el río grande Intag o río Apuela (Conagopare Imbabura, 2023).

Su población es de aproximadamente 17.000 habitantes, distribuidos en comunidades rurales dedicadas en gran parte a actividades agrícolas (Molina et al., 2022; Corporación Toisán, 2024). La zona se caracteriza por su relieve montañoso con bosques nublados que poseen gran riqueza natural. También posee una importante red hídrica de ríos y quebradas que abastecen a toda la región. Además, Intag es conocido por su alta diversidad biológica y valor ecológico. Por otra parte, el trabajo comunitario se enfoca en defensa del territorio frente a actividades extractivas mineras. Todo esto hace que sea un valioso territorio tanto por su naturaleza como por su organización social.

El río Apuela y sus afluentes presentan una clasificación de cuenca hidrográfica, al presentar una superficie de 1044.09 $km^2$, con una longitud de 49.09 km, un perímetro de

163.01 km$^2$ y una anchura de 21.27 km (Figura 6). Se tiene en cuenta que al norte posee una altitud de 3403 msnm, al sur 1654 msnm, al este 4236 msnm y al oeste 3014 msnm la cuenca hidrográfica bordea una altitud máxima de 4927 msnm y una altitud mínima de 815 msnm. Se ha registrado una temperatura de 10 a 20 °C clasificándolos en tres tipos de clima: tropical megatérmico húmedo, ecuatorial mesotérmico semi húmedo y ecuatorial de alta montaña (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural de Apuela, 2015).

***Figura 6.*** *Delimitación de la cuenca hidrográfica del río Apuela*




## 3.2 Morfometría de la cuenca hidrográfica del río Apuela

En los parámetros morfométricos de la cuenca se detalla las características físicas que rigen el comportamiento de un sistema hídrico, a través del estudio del relieve, la forma y el drenaje. Los parámetros morfométricos de la cuenca del río Apuela se encuentran en la Tabla 3.

***Tabla 3.*** *Características físicas de la cuenca hidrográfica del río Apuela*

| PARÁMETROS DE FORMA | | |
|---|---|---|
| **Parámetros** | **Cálculo** | **Interpretación** |

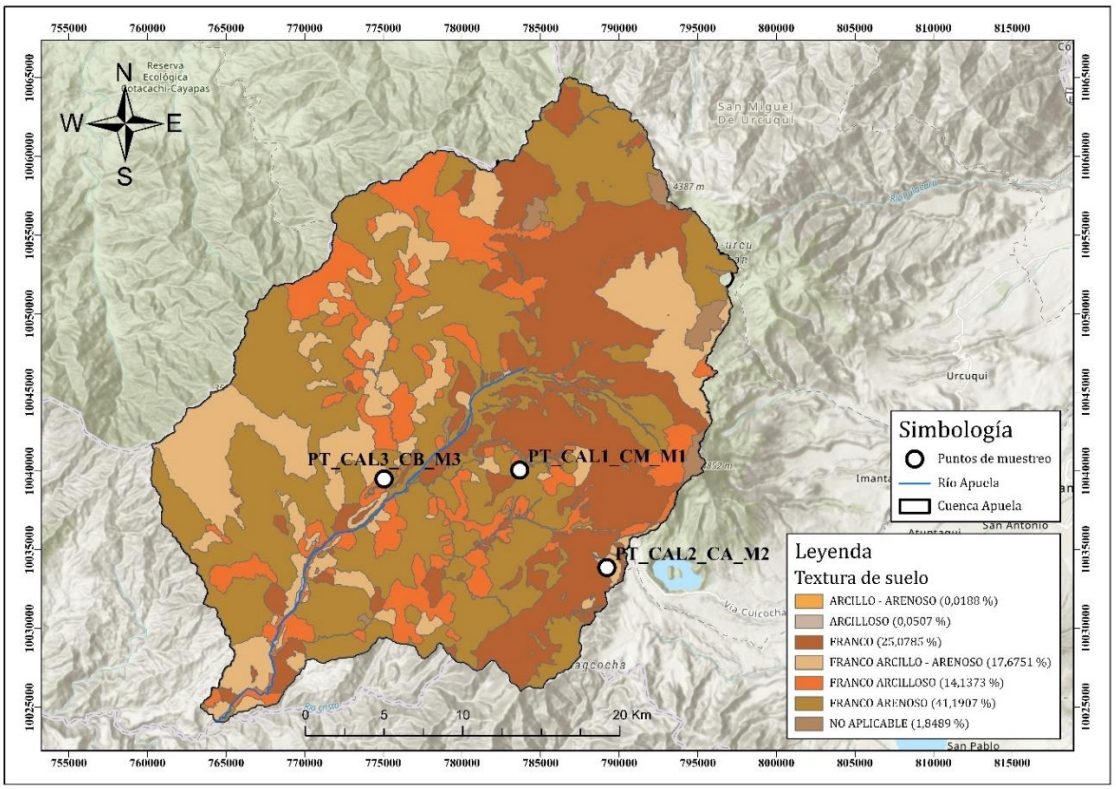
| | | |
|---|---|---|
| **Área** | A= 104409.79 ha | De acuerdo con el área calculada se clasifica como: **Cuenca** |
| **Perímetro** | P= 163.01km | Conforme con el perímetro calculado se clasifica como: **Cuenca grande** |
| **Longitud Axial** | La= 49.09km | Longitud axial: Es la distancia máxima medida desde el punto de salida hacia la parte más distante de la cuenca que sigue la dirección del río principal. |
| **Ancho promedio** | Ap= 21.27 km | Ancho promedio: Es la distancia medida en sentido perpendicular a la longitud axial. La longitud axial y el ancho promedio forman el rectángulo equivalente de la cuenca. |
| **Altitud mínima** | Hmín= 815 | La cota mínima se encuentra en el punto de salida de la cuenca |
| **Altitud máxima** | Hmáx= 4927 | La cota máxima se encuentra en la parte más alta de la cuenca |
| **Coeficiente de compacidad** | Kc= 1.41 | El coeficiente de capacidad es la medida utilizada para comparar la forma de la cuenca con la de un círculo. Según el cálculo, la cuenca se clasifica como: **Oval redonda a oval-oblonga.** |
| **Factor forma** | Ff= 0.43 | Intenta medir cuan cuadrada (alargada) puede ser la cuenca. Una cuenca con un factor de forma bajo, esta menos sujeta a crecientes que una de la misma área y mayor factor de forma.<br>Según el cálculo, la cuenca tiene un factor de forma**: La cuenca tiende a ser alargada, baja susceptibilidad a las avenidas.** |
| **PARÁMETROS DE RELIEVE** | | |
| **Altitud media** | Hmed=2565.09m | La altitud media corresponde a una cuenca de montaña. |
| **Desnivel** | De= 4102 msnm | El desnivel de la cuenca o variación de altitud es de: **4112 msnm** |
| **Pendiente media** | Pmed = 43.46% | De acuerdo con el valor calculado es una cuenca con un **relieve muy montañoso**. |
| **PARÁMETROS HIDROLÓGICOS** | | |
| **Longitud del cauce principal** | Lcp = 39.85km<br>Lcp = 39853.92m | El cauce principal tiene una longitud: **Media**. |

| | | |
|---|---|---|
| **Pendiente del cauce principal** | Pcp= 0.10% | La pendiente media del cauce principal es de ríos de montaña. |
| **Tiempo de concentración** | Tc= 176.65 h | El tiempo de concentración de la cuenca, es el tiempo que tarda en llegar la escorrentía superficial desde el punto más alejado del río hasta la salida de la cuenca. |
| **Densidad de drenaje** | 0.50 km2 | De acuerdo con la densidad de drenaje la cuenca es de tipo Dendrítico, donde los cursos de agua confluyen hacia el río principal que forma una red de drenaje. |
| **Numero de orden de ríos** | Orden 4 | La cuenca pertenece hidrológicamente al Orden 4, lo que implica un alto potencial erosivo. |

### 3.2.1 Edafología

Al realizar el análisis granulométrico por densimetría con hidrómetro de Bouyoucos, determinó que la clase textural de la cuenca hidrológica es franco-arenosa (LABONORT Laboratorios Norte, 2026). En la Figura 7 se presenta los lugares de muestreo de suelo que fueron desarrollados con el fin de validar la textura de suelo en el territorio.

***Figura 7.*** *Edafología de la cuenca hidrográfica del río Apuela*

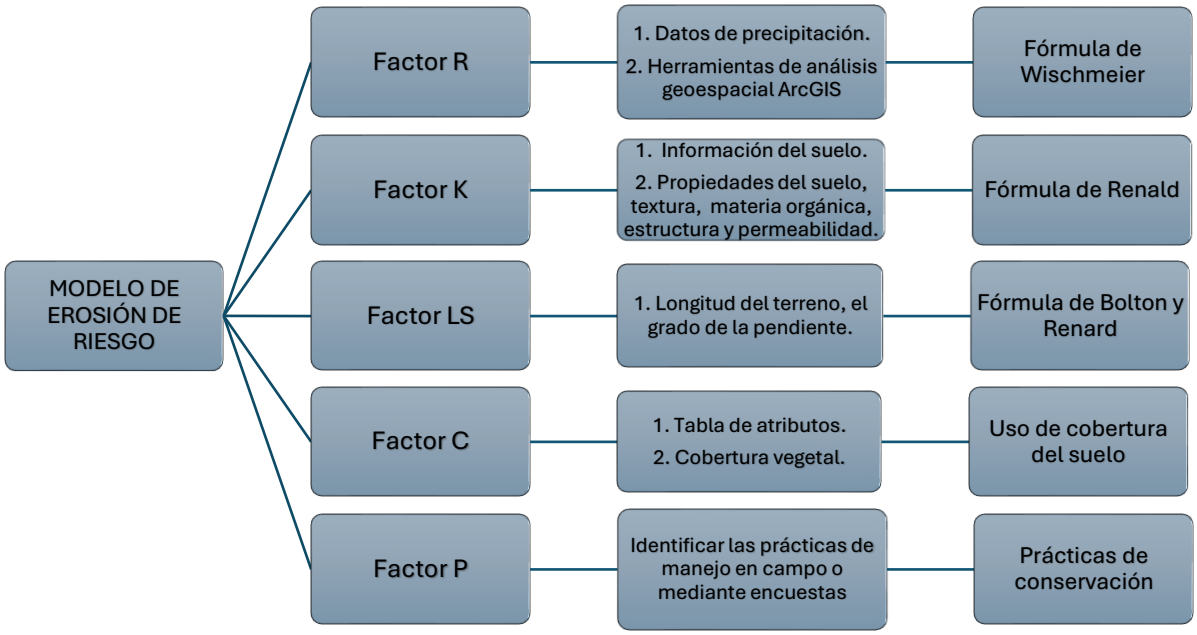


Los suelos de textura franco-arenosa se caracterizan por tener alta permeabilidad, debido a la mayor proporción de partículas de arena, que favorece la infiltración de agua y reduce el volumen de escorrentía superficial para arrastrar partículas de suelo (Gómez, 2017). Dentro de la cuenca se encuentra en mayor cantidad el tipo de textura Franco arenoso que ocupa el 41.19% con una superficie de 38095.15 ha, seguido por la textura Franco con el 25.07% con una extensión de superficie 23193.77 ha, finaliza con la textura Franco arcillo-arenoso 17.67% tiene una superficie de 16346.75 ha.

### 3.3 Métodos

Los métodos para aplicar en el proceso de integración curricular que se explicaran dentro de la metodología empleada, se incluyeron las técnicas y procedimientos relacionados con la erosión del suelo. Este fenómeno está estrechamente condicionado por la erosividad de las lluvias, dado que precipitaciones más intensas provocan un mayor deterioro en la superficie terrestre. Para estimar con precisión este proceso, se aplicó el modelo RUSLE (Wischmeier & Smith, 1978), cuyo planteamiento metodológico se representa en la Figura 8. Esta herramienta permite cuantificar la erosión hídrica del suelo, donde estableció una conexión directa entre la fuerza de la lluvia y el nivel de impacto erosivo.

***Figura 8.*** *Esquema metodológico de la ecuación RUSLE*



### 3.3.1 Modelo matemático RUSLE

Se cuantificó la erosión hídrica del suelo mediante la Ecuación Revisada de Pérdida de Suelo Universal o también llamada RUSLE (Ecuación 1):

*Ecuación 1*

$$\boldsymbol{A} = R * K * LS * C * P$$

Donde:

**A:** tasas de erosión en t/ha/año;

**R:** erosividad de la lluvia en MJ mm/ha/año;

**K:** erodabilidad del suelo en t h ha/ ha MJ mm;

**LS:** combinación de factores de longitud y pendiente (adimensional);

**C:** uso y cobertura del suelo (adimensional);

**P:** prácticas de apoyo agrícola (adimensional).

Para el cálculo de la erosión hídrica se presentan los componentes, métodos, ecuaciones y herramientas que se emplean para generar los factores mencionados anteriormente.

### 3.3.2 Factor de Erosividad de la precipitación (R)

El factor R mide el efecto erosivo de la intensidad de la lluvia con un promedio de 20 y 25 años como recomendación. El cálculo del factor R se ejecutó a través de la aplicación de la Ecuación 2, propuesta por Wischmeier y Smith (1978) posteriormente modificado por Arnoldus (1980):

*Ecuación 2*

$$\boldsymbol{Factor\ R} = \sum_{I=1}^{12} 1.735 * 10^{(1.5log10\left(\frac{pi^2}{p}\right)-0.08188)}$$

Donde R (x, y) es el factor R (MJ mm ha−1 h−1 yr−1) en el tamaño de celda (x, y), $pi$= precipitación mensual (mm) y p= precipitación anual (mm).

El factor R destaca al ser esencial para la estimación de erosión del suelo, debido a que la pérdida de tierras fértiles y productivas se encuentra vinculada a la intensidad y a la energía de la precipitación.

### 3.3.3 Factor de Erodabilidad del suelo (K)

Para el cálculo del Factor K se aplicó la metodología de Williams (1995) y Neitsh et al. (2000). Los valores de este factor se determinan con información de las propiedades edáficas del suelo se tuvo en cuenta la textura del suelo, el contenido de materia orgánicas, la estructura del suelo y su permeabilidad. A partir de la información cartográfica de tipos de suelo se aplicó la Ecuación 3.

*Ecuación 3*

$$\boldsymbol{K_{USLE}} = f_{sand} * f_{cl-si} * f_{orgc} * f_{hsisand}$$

Dónde:
**KUSLE:** erodabilidad del suelo modelo USLE;
**fsand:** factor de contenido de arena;
**fcl-si:** factor de contenido de arcilla y limo;
**forgc:** factor de contenido de carbono orgánico;
**fhisand:** factor de altos contenidos de arena.

Para adaptar la ecuación original del Factor K al modelo RUSLE, empleó un factor de conversión de 0.1317 (Ecuación 4).

*Ecuación 4*

$$\boldsymbol{K_{RUSLE}} = K * 0.1317$$

Donde K RUSLE equivale a la erodabilidad del suelo en ton/MJ mm, compatible con el modelo RUSLE y K corresponde a la erodabilidad del suelo del modelo USLE.

Las Ecuaciones 5, 6, 7, 8 para estimar los factores en base a las propiedades físicas y químicas del suelo se detallan a continuación:

*Ecuación 5*

$$f_{csand} = \left\{0.2 + 0.3 * exp\left[-0.256 * m_s * (1 - \frac{m_{silt}}{100})\right]\right\}$$

*Ecuación 6*

$$f_{cl-si} = (\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}})^{0.3}$$

*Ecuación 7*

$$f_{orgc} = \left\{1 - \frac{0.25 * orgC}{orgC + \exp\,(3.75 - 2.95 * orgC)}\right\}$$

*Ecuación 8*

$$f_{hisand} = \left\{1 - \frac{0.7 * (1 - \frac{m_s}{100})}{\left(1 - \frac{m_s}{100}\right) + exp\left[-5.51 + 22.9 * (1 - \frac{m_s}{100})\right]}\right\}$$

Donde:

**ms:** porcentaje de arena;

**msilt:** porcentaje de limo;

**mc:** porcentaje de arcilla y;

**orgC:** porcentaje de SOC.

Este método de interpolación se basa en la correlación espacial de los valores adyacentes, el cual permitió inferir estimaciones para los píxeles que no poseen datos, y se completan con valores asignados que varían según las características de los demás píxeles. Este enfoque evita sesgos y garantiza la continuidad y precisión en la modelización de las propiedades del suelo, se advierte que la imputación arbitraria podría comprometer los resultados finales del estudio. (Andrade-Carreño et al., 2025)

### 3.3.4 Factor Topográfico (LS)

El factor LS representa el efecto combinado de la inclinación de la pendiente (S) y la longitud de la pendiente (L) en la pérdida del suelo. El aumento de la inclinación y la longitud de la pendiente incrementa la erosión hídrica. Este factor junto con las características del terreno de longitud de la pendiente (L) y su inclinación (S) influyen en los procesos de erosión.

El factor topográfico es un factor activo en el proceso de erosión hídrica, al direccionar la circulación del agua sobre el suelo (Ecuación 9, 10, 11, 12, 13). El factor LS tiene un rango de 0 a 152 son adimensionales (GAR 2022, 2021).

*Ecuación 9*

$$\boldsymbol{\lambda} = (\frac{A_{acum.tif}}{3.1416})^{0.5}$$

Donde:

**λ:** Longitud de la pendiente

**Área acumulada:** Ráster del flujo de acumulación de la cuenca

**π:** Constante pi, adimensional

*Ecuación 10*

$$\boldsymbol{F} = \frac{\frac{sen\beta}{0.0896}}{3 * (sen\beta)^{0.8} + 0.56}$$

Donde:

**F:** Factor F o factor de corrección, adimensional

**Slope_grados:** Pendiente de la cuenca en grados

$\frac{\boldsymbol{\pi}}{\mathbf{180}}$**:** Conversión de grados a radianes

**Sin( ):** Función seno

*Ecuación 11*

$$\boldsymbol{m} = \frac{F}{1 + F}$$

Donde:

**m:** Exponente de la longitud, adimensional

**F:** Factor F calculado anteriormente

*Ecuación 12*

$$\boldsymbol{S} = 10.8 * sin\Theta + 0.3; para\ S < 9\%$$

$$\boldsymbol{S} = 16.8 * sin\Theta + 0.5; para\ S \geq 9\%$$

Donde:

**S:** Factor de la pendiente

**β:** Ángulo de la pendiente en grados

$\boldsymbol{Sin(\beta \times \frac{\pi}{180})}$**:** Seno del ángulo en radianes

*Ecuación 13*

$$\boldsymbol{LS} = (\frac{\lambda}{22.13})^{m} * S$$

Donde:

**LS:** Factor topográfico de longitud y pendiente

**λ:** Longitud de la pendiente

**22.13:** Longitud de referencia

**m:** Exponente m calculado en la Ecuación 12

**S:** Factor de pendiente calculado en la Ecuación 13

### 3.3.5 Factor Cobertura del Suelo (C)

El factor C evalúa la relación entre la pérdida de suelo y los diferentes tipos de cobertura vegetal terrestre (Arias-Muñoz et al., 2023). Por lo tanto, se utilizó una imagen satelital multiespectral para el año 2024 capturada por el Landsat-9 (Path 10 / Row 60) con fecha del 30 de agosto del 2024. Se georreferenciaron puntos de los tipos de cobertura en el área de estudio, se empleó el sistema de referencia WGS 1984, proyección UTM, zona 17 Sur y con un tamaño de píxel de 30 metros (Arias-Muñoz et al., 2024). Se realizó una clasificación supervisada del año 2024 con puntos recopilados en Google Earth y validados con la imagen Landsat se obtuvo 5353 puntos de los distintos tipos de cobertura. Así se empleó el 70% de datos referenciales para crear el modelo cartográfico y el 30% para la validación fue 4015 y 1338 puntos respectivamente. De este modo se obtuvieron 8 tipos de cobertura terrestre: bosque, matorral, páramo, pastos, cultivos, suelo desnudo, agua y zona urbana.

La validación se realizó mediante la matriz de confusión que calcula la exactitud global, la precisión por clase y la omisión o comisión de errores (Vanetti, 2007). Donde el índice Kappa mide cuánto acuerdo existe entre la clase cartografiada y la clase de referencia que corrige el acuerdo que podría darse solo por azar. De forma general, se interpreta así: menor a 0.20 es pobre; 0.21 a 0.40 es justo; 0.41 a 0.60 es moderado; 0.61 a 0.80 es bueno; y 0.81 a 1.00 es muy bueno (Sánchez, 2016). Aunque el índice Kappa sea alto puede existir errores en clases específicas, zonas mixtas o categorías poco representadas. Por lo tanto, necesariamente se corrigió pixeles para mejorar la exactitud espacial de los tipos de cobertura terrestre (Tabla 4).

***Tabla 4.*** *Valores del factor C según cobertura terrestre*

| Cobertura terrestre | Factor C |
|---|---|
| **Bosque** | 0.01 |
| **Matorral** | 0.035 |
| **Páramo** | 0.040 |
| **Pastos** | 0.037 |
| **Cultivos** | 0.35 |
| **Suelos desnudos** | 0.43 |
| **Agua y Zona urbana** | 0 |

***Fuente:*** *Investigación propia basada en Arias-Muñoz et al. (2023)*

### 3.3.6 Factor Prácticas de Conservación (P)

El Factor P es adimensional y representa las prácticas de conservación y uso sostenible del suelo, fue cada una específica por las condiciones donde el flujo de la pendiente es más significativo y aumenta la erosión. Donde los valores se representan desde 1 donde su significado es que no hay prácticas de conservación que reduzcan la erosión, mientras que 0 significa que se han implementado las medidas que ayudan a la conservación para impedir la erosión (Gómez, 2017). Cuanto más bajo sea el número, mejora la eficiencia de la práctica para detener la erosión. El Factor P se calcula a partir de la combinación del tipo de práctica de conservación con el porcentaje de inclinación de la pendiente de un terreno.

### 3.3.7 Calibración del Modelo RUSLE: Análisis comparativo en la producción de sedimentos

La validación de los resultados de pérdida de suelo obtenidos mediante el modelo RUSLE frente a los datos observados de sólidos suspendidos (CSS) en el río Apuela, presenta limitaciones metodológicas intrínsecas. El modelo RUSLE únicamente determina la pérdida promedio anual de suelo y no calcula la deposición final de sedimentos (Thomas et al., 2018). Si bien la sedimentación es la acumulación de suelo removido por la erosión hídrica, no todo el suelo removido es trasladado aguas abajo y llega al cauce del río. La producción total de sedimentos (SY) a partir de la pérdida anual de suelo (A), multiplicándola por la cantidad estimada de suelo erosionado que llega al cauce el río (SDR) (Arias-Muñoz, 2024).

La conexión que se establece entre la producción de sedimentos o sediment yield (SY) y la dinámica de transporte en cuencas hidrográficas, señala que el SY demuestra la fracción de la erosión bruta que llega al cauce principal. La estimación del SY precisa combinar el cálculo de la erosión potencial por medio del modelo RUSLE, para lo cual se aplica el Sediment Delivery Ratio (SDR) con este permite ajustar la proporción de sedimentos transportados (Padala Raja Shekar & Mathew, 2024). El modelo RUSLE estima la tasa de erosión hídrica superficial, mientras que los sedimentos del río representan la fracción de sólidos suspendidos movilizados por el flujo hídrico. Esto explica porque los valores de erosión calculados suelen ser mayores que los observados en muestras de agua (Rabelo et al., 2026).

Para mitigar esta brecha, se utilizó el coeficiente de entrega de sedimentos (SDR), que actúa como un factor de escala que vincula el material erosionado en la ladera con el que alcanza la red de drenaje. No obstante, es imperativo señalar las siguientes limitaciones en esta aproximación: A) Los sólidos suspendidos (CSS) representan la fracción mayoritaria del rendimiento total de sedimentos. Se establecen que, en la mayoría de los ríos del mundo, la carga suspendida constituye habitualmente entre el 80% y el 90% (o más) del transporte total de sedimentos hacia las zonas de deposición. Se sustenta que sea la métrica principal para las validaciones a escala de cuenca (Walling & Collins, 2008; Tamrakar & Karki, 2019; Tiruwa et al., 2021; Yigez et al., 2021).

En esta investigación se llevó a cabo la validación del modelo hidrológico RUSLE (Figura 9), se utilizó la fórmula propuesta por Ebrahimzadeh et al. (2018). Dicha ecuación,

identificada como la Ecuación 14, permite calcular la cantidad de sedimentos generados, los cuales tienden a concentrarse en la parte baja de la pendiente o en los puntos de salida de las cuencas hidrográficas.

*Ecuación 14*

$$\boldsymbol{SY} = A * SDR$$

Donde:

**SY:** producción de sedimentos, expresada en mm

**A:** pérdida anual del suelo, expresada en mm

**SDR:** cantidad estimada de suelo erosionado, expresado en mm

La estimación de la Producción de Sedimento (SY) se realizará mediante la Ecuación 14, herramienta clave para calcular la pérdida de suelo en relación con la longitud de la pendiente, se continua el enfoque propuesto por Tsegaye y Bharti (2021). El estudio se fundamentó al combinar los datos reales recolectados en campo con los resultados generados por el modelo RUSLE. Se evaluó el valor de SY donde se usa la concentración de sólidos suspendidos y analiza su relación con el caudal promedio de 10 años. Para validar el proceso dichos datos se compararon con los valores del modelo para medir la erosión del suelo donde se considera la longitud de la pendiente (Ecuación 15).

*Ecuación 15*

$$\boldsymbol{SDR} = 0.5656 * S^{-0,11}$$

Donde:

**0,5656:** constante

**S:** superficie de la cuenca

**-0,11:** el exponente expresa la relación inversa entre el tamaño de la cuenca y el SDR

Se contrasta el valor de la Producción de Sedimento (SY) estimado con los datos históricos del INAMHI (2019). Para este análisis, se utilizó el indicador PBIAS conforme a lo planteado en la Ecuación 16 y Ecuación 17, lo cual permitió identificar posibles desviaciones en el comportamiento del modelo. Según los criterios de Moriasi y colaboradores (2007), el PBIAS sirve para ver si el modelo tiene tendencia a cometer errores:

- Si el valor es positivo, el modelo subestima (da valores más bajos que los reales)
- Si el valor es negativo, el modelo sobrestima (da valores más altos que los reales)

Para considerarse que el modelo tiene un buen ajuste en la estimación de sedimentos en una microcuenca, el PBIAS debe estar entre -25% y +25% (rango de ±25%).

*Ecuación 16*

$$PBias = \frac{\sum(SY_{ob} - SY_{sim})(100)}{\sum SY_{ob}}$$

Donde:

$\boldsymbol{SY_{ob}}$**:** sedimentos observados

$\boldsymbol{SY_{sim}}$**:** sedimentos simulados

*Ecuación 17*

$$\boldsymbol{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum(SY_{sf} - SY_{rg})^2}{n}}$$

Donde:

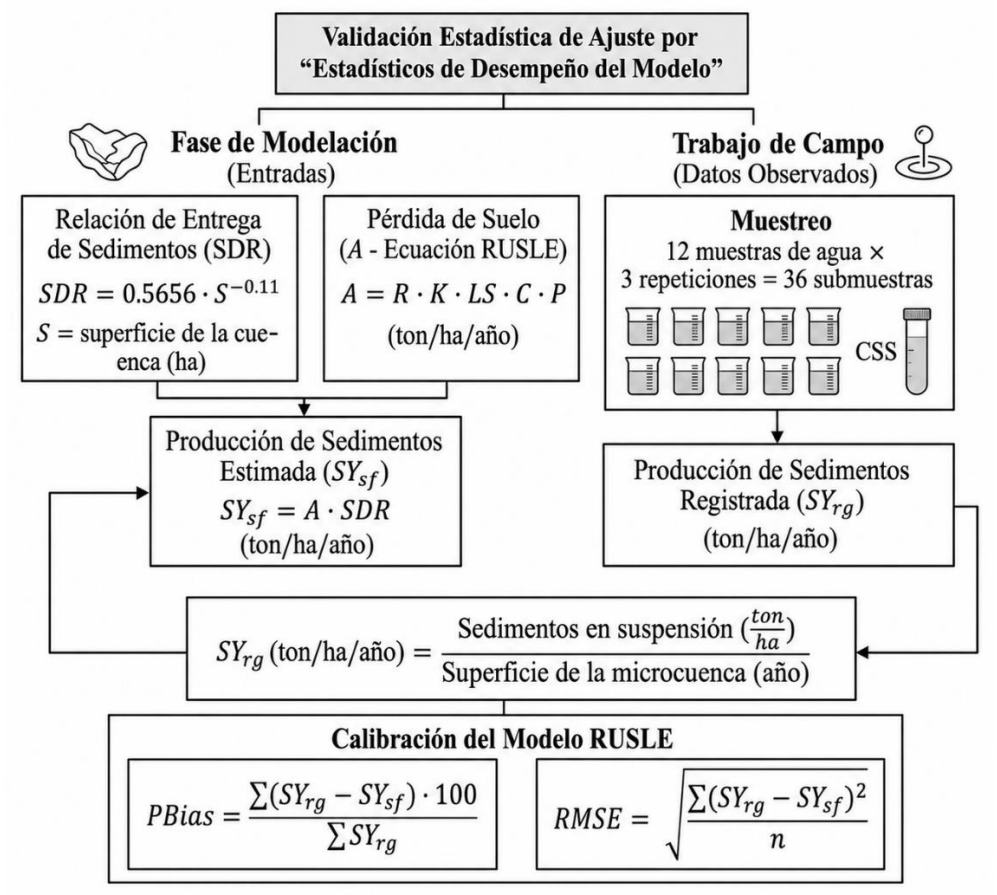
$\boldsymbol{SY_{sf}}$**:** sedimentos calculados por el modelo

$\boldsymbol{SY_{rg}}$**:** sedimentos observados a registrados

**n:** número total de observaciones utilizadas en comparación

$(\boldsymbol{SY_{sf} - SY_{rg}})$**:** suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores calculados y observados.

***Figura 9.*** *Esquema metodológico de la validación del modelo RUSLE*

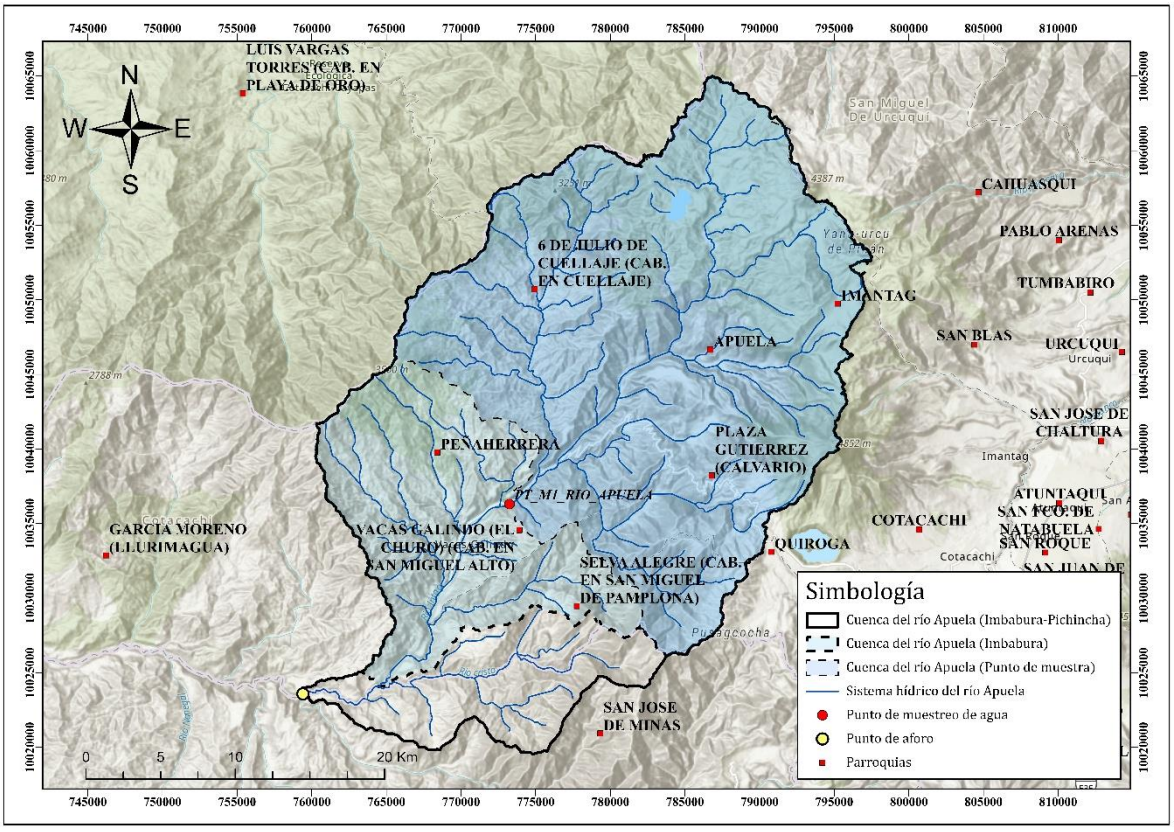


Para realizar el análisis comparativo de los sedimentos simulados mediante el modelo RUSLE con los sedimentos observados en campo, fue necesario seguir los siguientes pasos metodológicos: A) Muestreo de sedimentos de agua y B) Análisis de sedimentos en laboratorio.

### 3.3.8 Muestreo de agua y análisis en laboratorio

Según el protocolo para el muestreo de agua se llevaron a cabo 12 muestras de agua en un punto específico en el cauce del río Apuela, las coordenadas utilizadas encuentran proyectadas en WGS 1984 UTM Zona 17S dado que la Longitud 773250 y Latitud 10036298 (Figura 10 y 11). Se priorizó el análisis de agua en época lluviosa porque la dinámica del transporte de sedimentos y partículas, además de la carga aluvial, genera una dependencia directa de la variación del caudal. De cada muestra de agua se realizan 3 repeticiones de la concentración de sólidos, que se expresa generalmente en mg/L.

***Figura 10.*** *Punto de muestreo de agua*




En el laboratorio se obtuvo mediante análisis la concentración de sólidos suspendidos (CSS) (Ecuación 18). Donde se obtiene la masa de los sólidos por gravimetría, lo cual permite conocer la concentración del sólido al determinar la cantidad exacta de partículas sólidas que no se han sedimentado y permanecen suspendidas en el agua de la cuenca del río Apuela

(Caiza, 2018). Con el propósito de analizar los niveles de sólidos disueltos totales (TDS) y de sólidos en suspensión (TSS) (Ecuaciones 19 y 20). La elección de estos indicadores responde tanto a su importancia en la evaluación de la calidad del agua como a su vínculo directo con los procesos erosivos que afectan la cuenca del río Apuela.

*Ecuación 18*

$$\boldsymbol{CSS} = \frac{W_s - W_f}{V}$$

Donde:

$\boldsymbol{W_s}$**:** peso del filtro con sedimentos secos (mg)

$\boldsymbol{W_f}$**:** peso del filtro vacío (mg)

**V:** volumen de agua filtrada (L)

Posteriormente se multiplicó con el caudal ($m^3/s$) para obtener el valor de los sedimentos en suspensión (kg/s) (Ecuación 19).

*Ecuación 19*

$$\boldsymbol{Sedimentos\ en\ suspensión}\left(\frac{\boldsymbol{kg}}{\boldsymbol{s}}\right) = CSS * Qx$$

Donde:

**CSS:** concentración de sólidos suspendidos (mg/L)

**Qx:** caudal de la cuenca ($m^3/s$)

El valor obtenido se transforma en ton/año y se multiplica por la superficie de la cuenca para obtener el valor en ton/ha/año (Ecuación 20).

*Ecuación 20*

$$\boldsymbol{SS} = \frac{SS\left(\frac{kg}{s}\right) * 3600 * 24 * 365}{1000}$$

Donde:

**SS:** sedimentos en suspensión

***Figura 11.*** *Toma de muestra de agua por la investigadora.*



**4. Estimación de la pérdida de suelo**

La estimación de la pérdida de suelo mediante el modelo RUSLE se expresa en unidades de masa por unidad de área y tiempo (ton/ha/año). Sin embargo, para interpretar este valor en términos físicos, como el espesor de suelo perdido, es necesario convertir las dos variables (Ecuación 21).

*Ecuación 21*

$$\mathbf{V} = \frac{mss}{Da}$$

Donde:

**V:** Volumen de suelo perdido (cm)

**mss:** Pérdida de suelo estimada mediante el modelo RUSLE, expresada como raster de masa por unidad de área (g/cm²)

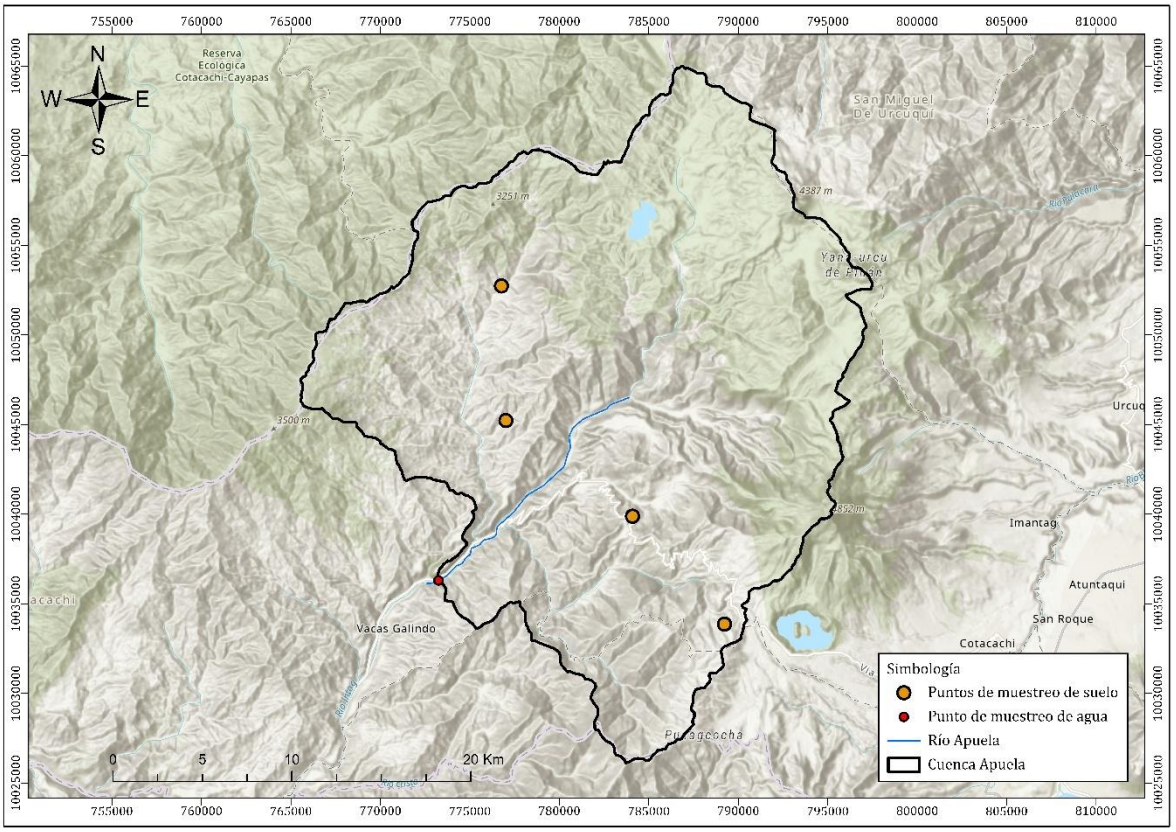
**Da:** Densidad aparente del suelo, representada como ráster espacial (g/ cm³)

**5. Cálculo de la densidad aparente**

La densidad aparente del suelo se define como la masa de suelo seco por unidad de volumen edáfico (sólidos + poros), y su valor se relaciona con la proporción de poros en dicho volumen de suelo (Agostini et al., 2014). La determinación de la densidad aparente se realiza

normalmente al considerar el estado de consistencia del suelo, ya que la densidad es una variable que depende del contenido de humedad (Hossne & Cedeño, 2012). Debido a la superficie de la cuenca hidrográfica, 1044.09 km$^2$, lo que la convierte en cuenca hidrográfica, se determinó la densidad aparente mediante información secundaria geoespacial que fue validada mediante la validación de campo. Para la validación del modelo espacial de densidad aparente (DA), se realizó una campaña de muestreo de campo que consistió en 4 calicatas distribuidas en la cuenca hidrográfica (Figura 12). La selección de estos sitios se realizó mediante un muestreo intencional estratificado con el fin de caracterizar la variabilidad edáfica del territorio.

***Figura 12.*** *Puntos de muestreo del suelo a través de calicatas*

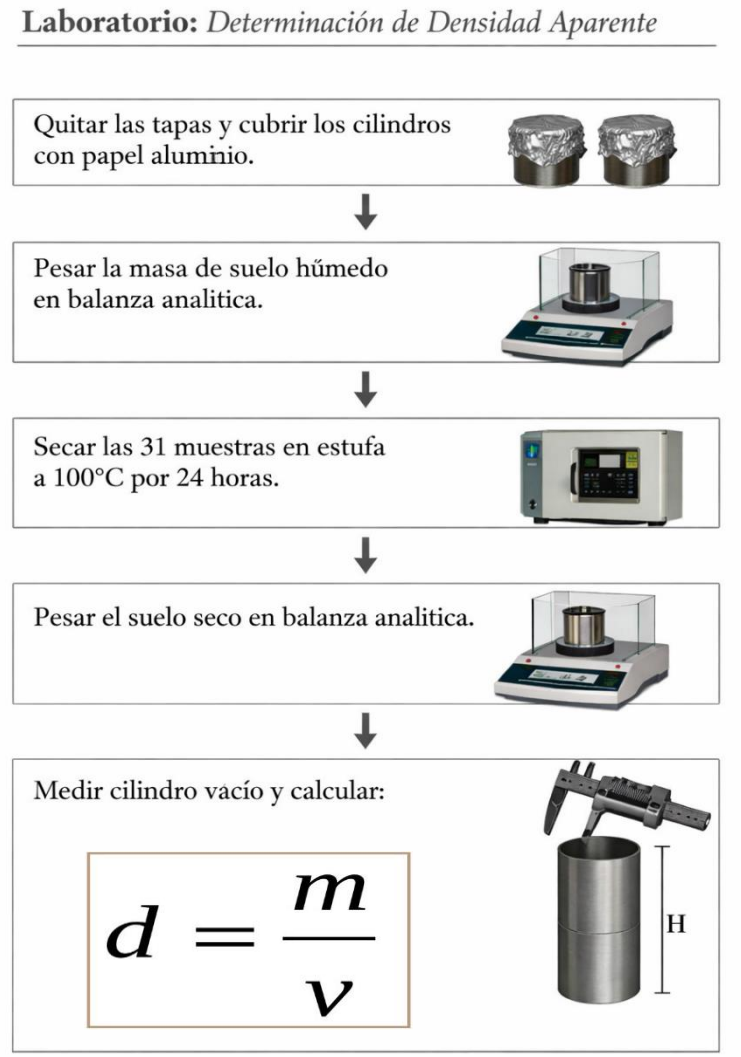



Los datos de la densidad aparente para este estudio se derivaron del portal web ISRIC-World Soil Information (SoilGrids) versión 2.0, al generar mapas de las propiedades del suelo para todo el globo con resolución espacial media de 250 metros. Poggio et al. (2021) indican que SoilGrids 2.0 proporciona información global de propiedades del suelo, incluida la densidad aparente, a partir de modelos de aprendizaje automático y covariables ambientales, lo que permite estimaciones coherentes a escala mundial para distintas profundidades del

suelo. Los valores de densidad aparente en el ráster de SoilGrids suelen presentarse en unidades de gramos por centímetro cúbico ($g/cm^3$), lo que facilita su interpretación directa en estudios de suelos y comparación con mediciones de campo.

El muestro intencional estratificado de calicatas se desarrolló siguiendo las siguientes características: a) cada calicata presentó 50 cm de profundidad, con lados de 50 x 50 cm; b) el muestro de suelo fue cada 10 cm de profundidad con un cilindro de 5 cm de diámetro y 5 cm de altura; c) por cada calicata se tomaron 4 muestras para llevarlas al laboratorio (Villazón-Gómez et al., 2024). En la Figura 13 se detalla el proceso que se llevó a cabo con las 31 muestras tomadas en campo.

***Figura 13.*** *Metodología aplicada en laboratorio para análisis de suelo.*



La densidad aparente por calicata se calculó aplicando la Ecuación 22 (Villazón-Gómez et al., 2019); donde la densidad aparente se determina comparando la masa del suelo seco y con el volumen del cilindro.

*Ecuación 22*

$$\mathbf{Da} = \frac{mss}{V}$$

Donde:

**Da:** Densidad aparente (g/cm³)

**mss:** Masa del suelo seco (g)

**V:** Volumen del cilindro (cm³)

Con la obtención de los valores de densidad aparente registrados en las calicatas levantadas en campo, se constituyó la base de referencia real del suelo. Para luego seguir los siguientes pasos: A) Se utilizó Extract Multivalues to Points en ArcGIS PRO para para extraer, por cada punto de muestreo, el valor de densidad aparente que el ráster de SoilGrids le asigna a cada ubicación específica. B) Se comparó los valores observados con los simulados. C) Se calibró la confiabilidad de la densidad aparente de SoilGrids mediante el método estadístico PBIAS, el mismo método estadístico utilizado en la validación del modelo hidrográfico RUSLE (Moriasi et al., 2007).

Con la densidad aparente ya validada, se procedió a transformar las unidades del ráster de pérdida de suelo obtenido mediante el modelo RUSLE, el cual se expresa en toneladas por hectárea por año (ton/ha/año) a gramos por centímetro cúbico (g/cm³) (Ecuación 23), de modo que sus unidades sean compatibles y puedan combinarse matemáticamente. Finalmente, determinó el volumen de suelo perdido a través de la densidad aparente, donde se despeja la variable del volumen en la Ecuación 21.

*Ecuación 23*

$$\frac{1\ ton}{ha} \times \frac{1000\ kg}{1\ ton} \times \frac{1000\ g}{1\ kg} \times \frac{1\ ha}{10000\ m^2} \times \frac{1\ m^2}{10000\ cm^2} = \frac{1\ g}{100\ cm^2}$$

Sin embargo, el modelo se encuentra dentro del umbral “muy bueno” conforme con la clasificación de valores PBIAS (Moriasi et al., 2007) en la Tabla 5. Se obtuvo una tabla

comparativa entre la densidad aparente calculada mediante los análisis de laboratorio y la densidad aparente extraída del portal web. Con un valor de -9.38% en el indicador estadístico PBIAS que determinó un sesgo negativo sobreestimado, es decir se obtuvieron valores más altos de los reales (Tabla 6).

***Tabla 5.*** *Clasificación de los valores PBIAS*

| Clasificación | Rangos (%) |
|---|---|
| Muy bueno | 0 – 10 |
| Bueno | 10 – 15 |
| Satisfecho | 15 – 25 |
| Insatisfecho | >25 |

***Nota.*** *Clasificación según Moriasi y sus colaboradores (2007)*

***Tabla 6.*** *Densidad aparente del suelo (g/cm³)*

| Muestra de suelo | Da ob (g/cm³) | Da sim (g/cm³) |
|---|---|---|
| CAL1CAM1 | 1.065 | 1.220 |
| CAL2CAM2 | 1.153 | 1.250 |
| CAL1CMM1 | 1.029 | 1.70 |
| CAL2CMM2 | 1.102 | 1.220 |
| CAL3CMM3 | 1.095 | 1.095 |

### 3.3.9 Evaluación del Riesgo de Erosión

Para realizar el proceso de evaluación del riesgo de erosión, son esenciales los procesos y el suelo previos a la erosión. Dentro de los procesos se encuentran factores que influyen en la determinación de la erosión, como la susceptibilidad del suelo a ser erosionado, la capacidad erosiva de las lluvias, la longitud e inclinación de la pendiente, las prácticas de conservación y la protección proporcionada a las coberturas vegetales (Tabla 7). Se estimaron las pérdidas potenciales de suelo con el modelo de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (RUSLE) junto con el uso de tecnologías como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) que posibilitó el análisis y modelamiento del proceso erosivo (Ramos-Arboleda & Sánchez-Pullas, 2023).

Los insumos que se incluyeron para esta evaluación del riesgo de erosión fueron los datos hidrológicos, en especial los registros medios mensuales de los caudales, que permitieron estimar la capacidad erosiva, y las características del suelo, como la textura, la

materia orgánica y la profundidad del primer horizonte. Se precisó información topográfica que incluye la longitud y el gradiente de la pendiente, además de datos sobre la cobertura vegetal y las prácticas de manejo del suelo. Los mapas de tipos de tipos ce suelo y otros datos fueron fundamentales para la aplicación de la metodología en SIG, que facilito un análisis detallado que ayudo a ser más precisos con el riesgo de erosión (Ayma-Villagra, 2023).

***Tabla 7.*** *Categorías de erosión y sus principales características*

| **Tasa de erosión (ton/ha/año)** | **Categorías** | **Característica** |
|---|---|---|
| **0** | Nula | Zonas no susceptibles al proceso erosivo como zonas urbanas, embalses, entre otros. |
| **0 – 15** | Muy baja | Zonas con niveles erosión muy bajos y pérdidas de suelo tolerables. |
| **15 – 25** | Baja | Zonas con niveles de erosión bajos y pérdidas de suelo que pueden ser toreables. |
| **25 – 50** | Moderada | Zonas con procesos erosivos leves, existe erosión, aunque no es apreciable a simple vista. |
| **> 50** | Alta | Zonas con pérdida de suelo poco tolerables |

*Fuente: El Jazouli et al. (2017)*

### 3.4 Propuesta de estrategias de conservación del suelo para mitigar los efectos de erosión hídrica

El método Presión-Estado-Respuesta (PER) fue utilizado como técnica para definir las estrategias de conservación de suelo para disminuir los efectos de erosión hídrica. La finalidad del PER radica en la evaluación de la gestión de la cuenca, al analizar la relación entre las actividades humanas y sus impactos junto con el estado actual del medio ambiente para lograr establecer mecanismos que reduzcan los impactos negativos (Salas, 2018). Facilita la comprensión de las presiones al evaluar el estado y diseño de las respuestas para prevenir impactos negativos y conservar los recursos naturales (Gonzaga, 2024).

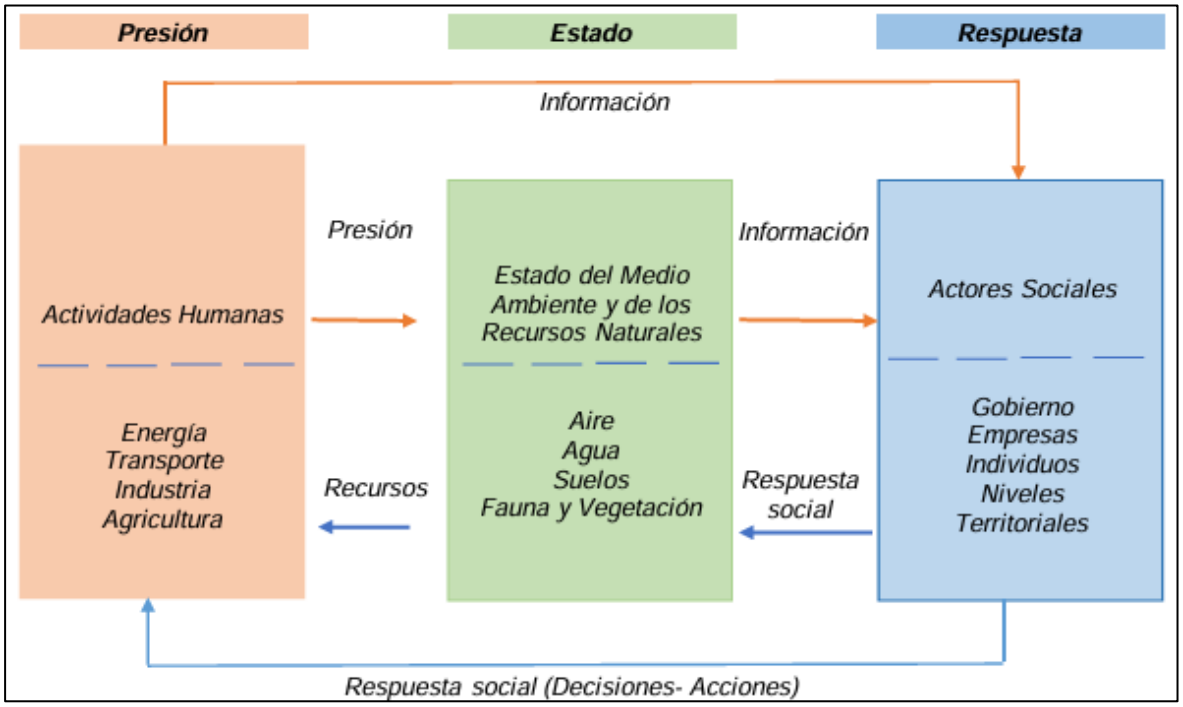
El propósito del método PER es entender las causas y efectos de los problemas ambientales para identificar acciones necesarias para abordarlos (Villamil, 2022). Por lo que se fundamenta en tres componentes en la Figura 14.

**A) Presión:** Actividades humanas que ejercen presión sobre el sistema hídrico, como la agricultura intensiva, la deforestación y la expansión urbana.

**B) Estado:** Evaluación el estado actual del medio ambiente y sus recursos, que incluye a la pérdida de suelo como salud del ecosistema.

**C) Respuesta:** Son medidas planteadas para mitigar la presión y restaurar el estado de los recursos.

***Figura 14.*** *Esquema del método Presión-Estado-Respuesta*




*Fuente: Adaptado de Pandia (2016).*

### 3.4.1 Indicadores de Presión: Caracterización de las clases agrológicas, el uso potencial y los conflictos de uso

Para definir estrategias de conservación del suelo, es necesario comprender en profundidad cómo se organiza y funciona el territorio, porque no todos los suelos poseen la misma capacidad de uso ni responden de la misma manera ante las actividades humanas o presiones. Por lo tanto, el análisis integral de las clases agrológicas, el uso potencial y los conflictos de uso del área de estudio permite identificar las presiones ejercidas sobre la capacidad real del suelo, para reconocer si está utilizado de forma adecuada o si existieran zonas vulnerables. En este sentido, la identificación de clases agrológicas es conveniente para determinar el grado de utilización y explotación forestal, ganadera y agrícola en un territorio. Se presentan los criterios de clasificación de las clases agrológicas basados en la “Guía para

la descripción de perfiles de suelo" de la FAO (1990), permite una estandarización las propiedades edáficas y su relación con la aptitud del suelo (Tabla 8).

***Tabla 8.*** *Capacidad de uso de suelo*

| **Clases Agrológicas** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Clase I** | **Clase II** | **Clase III** | **Clase IV** | **Clase V** | **Clase VI** | **Clase VII** | **Clase VIII** |
| **Pendiente (%) Clases FAO, 1990** | Hasta suavemente inclinado. (≤ 6) Clases 1 y 2 | Hasta inclinado (≤ 13) Clase 3 | Hasta moderada. (≤ 25) Clase 3 | Hasta suave (≤ 6) Clase 3 | Hasta escarpado (≤ 55) Clase 5 | Hasta muy escarpado (≤ 80) Clase 6 | Hasta muy escarpado (> 80) Clase 6 | Hasta muy escarpado (> 80) Clase 6 |
| **Profundidad útil (cm)** | Profundo (≥ 90) | Hasta moderado (≥ 60) | Hasta limitado (≥ 40) | Hasta escaso (≥ 20) | Cualquiera | Cualquiera | Cualquiera | Cualquiera |
| **Pedregosidad (%)** | Hasta pedregoso. (≤ 30) | Hasta muy pedregoso. (≤ 15) | Hasta muy pedregoso. (≤ 15) | Hasta excesivo (≤ 15) | Abundantes típico | Hasta excesivo (≤ 90) | Hasta excesivo (≤ 90) | Cualquiera (> 90) |
| **Drenaje Clases FAO, 1990** | Bueno o moderado Clases 0,1 y 2 | Algo excesivo Clase 3 | Imperfecto o excesivo Clase 3 | Escaso o muy escaso Clase 3 | Muy escaso Clase 4 | Cualquiera Clase 4 | Cualquiera Clase 4 | Cualquiera Clase 4 |
| **Textura** | Equilibrada (fr, fr li) | Algo desequilibrada: fr, arc, fr are, li, arc are, fr arc | Hasta desequilibrada: are, are fr | Hasta desequilibrada: are, arc li | Hasta escasa (< 0,5) | Cualquiera | Cualquiera | Cualquiera |
| **Materia Orgánica %** | Hasta abundante (≥3) | Hasta moderada (2-1) | Hasta poca (>0,5) | Hasta escasa (< 0,5) | Cualquiera | Cualquiera | Cualquiera | Cualquiera |
| **pH** | Favorable (6,5-7,5) | Hasta desfavorable (5,6-6,5 y 7,6-8,1) | Hasta muy desfavorable. (5,0-5,5 y 8,2-8,3) | Hasta muy desfavorable. (4,5-4,9 y 8,4-8,6) | Cualquiera | Cualquiera | Cualquiera | Cualquiera |
| **Grado de saturación en bases (%)** | Saturado (>75) | Saturado (> 50) | Desaturado (>15) | Cualquiera | Cualquiera | Cualquiera | Cualquiera | (Sin dato) |
| **Salinidad (dSm-1)** | Nula/ligera (≤3) | Hasta débil (≤ 5) | Hasta moderada (≤ 8) | Hasta severa (≤ 16) | Cualquiera | Cualquiera | Cualquiera | Cualquiera |
| **Meses secos** | Hasta pocos (≤3) | Hasta moderados (≤ 5) | Hasta abundantes (≤ 7) | Hasta muy abundante (≤ 9) | Árido típico | Cualquiera | Cualquiera | Cualquiera |
| **Erosión** | Nula ligera (≤ 10) | Hasta moderados (≤ 20) | Hasta alta (≤ 80) | Hasta muy alta (≤ 160) | Hasta ligera (≤ 10) | Cualquiera | Cualquiera | Cualquiera |

*Fuente: Molina et al. (2022)*

Posteriormente, el uso potencial se establece de acuerdo con cada categoría de las clases agrológicas, donde se identificó las potencialidades y limitaciones que tiene el suelo para desarrollar actividades agropecuarias, forestales, pecuarias y de conservación (Molina et al., 2022). En la Tabla 9 se define cada clase agrológica con el uso potencial del suelo

respectivamente, ya que a través de las clases se determina su vocación natural y establece el tipo de aprovechamiento más adecuado según sus características.

***Tabla 9.*** *Uso potencial del suelo*

| Categoría agrológica | Uso potencial del suelo |
|---|---|
| I | Cultivo sin limitaciones de uso |
| II | Cultivos con ligeras limitaciones de uso |
| III | Cultivos con moderadas limitaciones de uso |
| IV | Cultivos con serias limitaciones de uso |
| V | Pastoreo y/o forestación sin limitaciones |
| VI | Pastoreo y forestación susceptibles a erosiones |
| VII | Forestación |
| VIII | Vegetación arbustiva y/o arbórea con fines de protección |

*Fuente: Molina et al. (2022)*

La determinación de conflictos de uso de suelo cumple un papel fundamental para la toma de decisiones para conducir efectivamente una recuperación, conservación y protección de la disponibilidad de los recursos (Molina et al., 2022). Se describen a continuación las categorías de conflictos:

- **Uso adecuado o sin conflicto.** Se determinan tierras que son utilizadas de forma correcta, significa que el uso actual es igual a su uso potencial.
- **Conflicto por sobreutilización. E**l uso actual es mayor al uso potencial, quiere decir que el suelo está degradado por mal uso del mismo. Se identifican tres niveles de sobreutilización: Alta, media y baja.
- **Conflicto por subutilización.** Manifiesta que el uso actual es menor al uso potencial, es decir, que no existe una compatibilidad.

### 3.4.2 Indicadores de Estado: Cualificación del estado de la pérdida de suelo por erosión hídrica

El indicador de estado muestra la situación o calidad en la que se encuentra un componente ambiental en un momento determinado, no es necesario explicar sus causas ni las acciones para remediarlo (Pandia, 2016). Para el estudio se analizó el valor de la pérdida de suelo generada por erosión hídrica en la cuenca, con el fin de evaluar el nivel de degradación del recurso edáfico ante la acción del agua por escorrentía generada por acciones

climáticas. Además, logró determinar las zonas de la cuenca donde la remoción de partículas del suelo es más significativa, y presenta alta susceptibilidad a erosión hídrica.

### 3.4.3 Indicadores Respuesta: Implementación de la matriz de Fortalezas, Amenazas, Oportunidades y Debilidades

Por último, para poder formular la respuesta del modelo PER se parte del análisis FODA, mediante el que posible reconocer las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del territorio. Las fortalezas y oportunidades parten desde el diagnóstico del área de estudio y son aquellas condiciones que favorecen a la conservación como una cobertura vegetal idónea, pendientes bajas en ciertas zonas o prácticas tradicionales de buen manejo de suelo. Mientras que las debilidades y amenazas son problemáticas o que a futuro podrían afectar el área de estudio, relacionadas a la erosión, pérdida de materia orgánica, sobreutilización, expansión agrícola inadecuada, incendios, entre otras (Análisis FODA, 2023). La matriz FODA para la formulación de estrategias se combina entre sí para generar estrategias concretas de acción (Tabla 10).

***Tabla 10.*** *Combinación de la matriz FODA*

| | **Fortalezas**<br>**F** | **Debilidades**<br>**D** |
|---|---|---|
| **Oportunidades**<br>**O** | **Estrategias FO**<br>(Ofensivas)<br>Se utilizan las fortalezas para aprovechar y potenciar las oportunidades | **Estrategias DO**<br>Se aplican para superar las debilidades y aprovechando las oportunidades |
| **Amenazas**<br>**A** | **Estrategias FA**<br>Se usan las fortalezas para minimizar o evitar el impacto de amenazas externas | **Estrategias DA**<br>(Defensivas)<br>Se evitan amenazas que puedan impactar las debilidades |

*Fuente. Extraído de León (2021).*

## 3.5 Limitaciones metodológicas

Es importante mencionar que una limitación del presente estudio es la variabilidad temporal, ya que, si bien el modelo RUSLE permite estimar anualmente la pérdida de suelo, el enfoque no fue multitemporal. Además, la base de datos nacional proporcionada por el INAMHI posee información muy limitada e incompleta de caudales, que no brinda confiabilidad al momento de generar investigaciones (Erazo et al., 2018; Delgado et al., 2022). Debido a limitaciones como la accesibilidad en el extenso territorio, no fue posible tomar varias muestras de agua en distintos puntos del río que permitieran calibrar de mejor manera el modelo.

# CAPÍTULO IV

# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 4.1 Determinación de la pérdida de suelo por erosión hídrica empleando el modelo RUSLE.

Se los analizó cada factor por separado para identificar la influencia de cada uno en la erosión hídrica del suelo de la cuenca. Mediante el análisis del Factor R o erosividad de la lluvia en la Figura 15A se identificó la incidencia de las precipitaciones en el suroeste de la cuenca hidrográfica donde se localizan las parroquias de Peñaherrera, Vacas Galindo, Selva Alegre y García Moreno con 1553 MJ mm/ha*h*año, refiriéndose a la mayor erosividad de la lluvia, mientras que un valor menor se registró en Imantag, Plaza Gutiérrez, San Antonio de Pucará y en el páramo de Piñán con 572 MJ mm/ha*h*año. Esto indica que la erosividad de la lluvia conforme se acerca al noreste se debilita su intensidad de erosión al suelo.

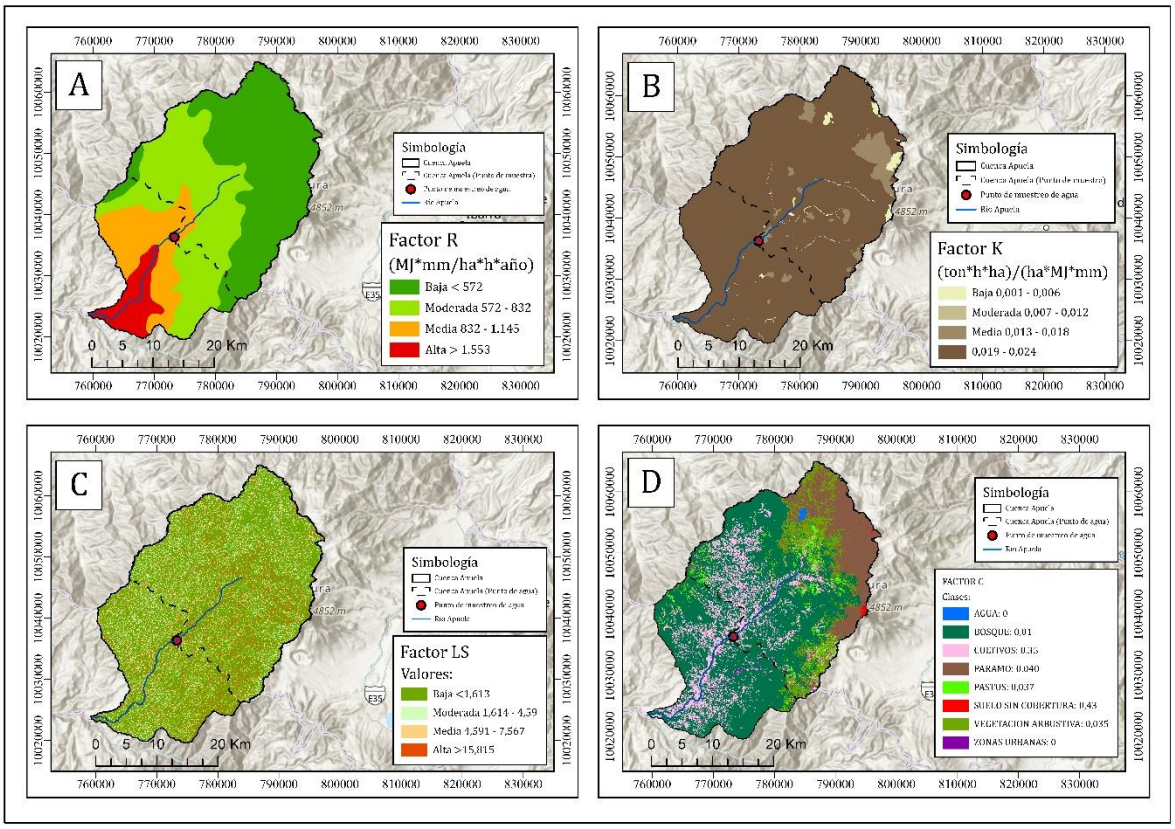
El Figura 15B representa la distribución espacial del Factor K o erodabilidad del suelo, se observó que su rango varió de 0 a 0.024 ton*h*ha/ha*MJ*mm. La cuenca presenta una composición de propiedades físicas y químicas del suelo que resulta en suelo de tipo franco arenoso, con arena como compuesto principal con un porcentaje de 45.7 %, seguida del limo con 25.2%, la arcilla de 23.5% y el carbono orgánico del suelo (SOC) con 3.67%. El valor más alto, de 0.024 ton*h*ha/ha*MJ*mm, se localiza principalmente en las parroquias Selva Alegre, Vacas Galindo, Peñaherrera, 6 de Julio de Cuellaje y Apuela. Mientras que los valores menores se encuentran en Imantag y Plaza Gutiérrez.

Se realizó el análisis de la Figura 15C que representa la distribución del Factor LS o factor de longitud y pendiente del terreno, sabiendo que los valores son adimensionales, con el valor más bajo de 1.613 que se encuentra en la mayoría de la cuenca. El valor más alto se registró en 15.815 en las zonas altas de la cuenca hidrográfica del río Apuela. El valor más alto coincide con las pendientes escarpadas de las divisorias de agua de la cuenca, mientras se observa en las zonas más planas de las partes bajas de la cuenca.

La Figura 15D representa el Factor C de uso y cobertura del suelo, donde los valores más bajos representan mejores condiciones de protección frente a la erosión hídrica, mientras que los más altos representan mayor vulnerabilidad ante el evento. En la cuenca hidrográfica predominan los valores de cultivos 0.35 y suelo sin cobertura 0.43 en la cuenca baja, mientras

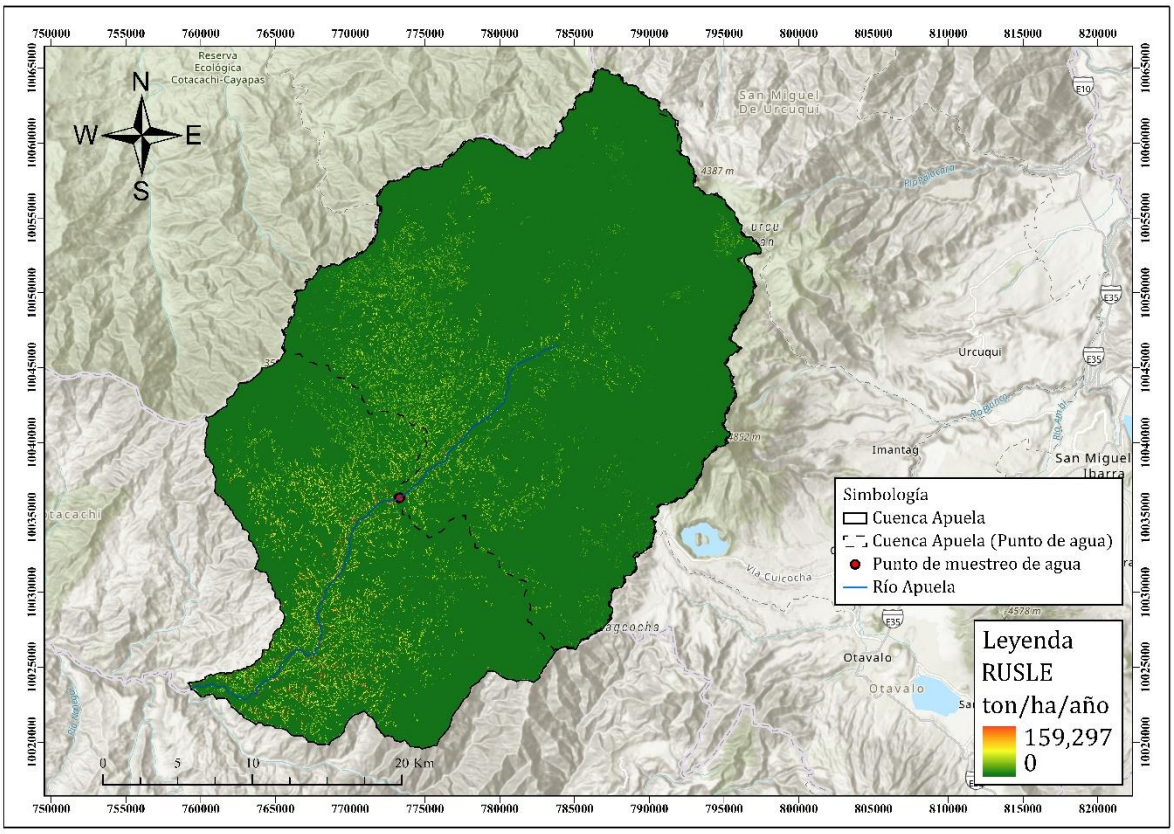
que los de bosque 0.01, vegetación arbustiva 0.035 y pastos 0.037 se ubican en la cuenca media, y en la cuenca alta se representan por los valores de páramo 0.040 y agua 0.

***Figura 15.*** *Factores del modelo RUSLE*




En la Figura 16 presenta el mapa generado con el modelo RUSLE donde se observa la tasa de erosión hídrica superficial expresada en (ton/ha/año). El rango de los valores va de 0 a 159.29 ton/ha/año. El gradiente de color (verde a naranja) simboliza el incremento de la erosión: el verde corresponde a zonas con mínima perdida del suelo y el naranja refleja una mayor susceptibilidad. Esto facilita identificar las áreas críticas para la conservación del suelo y la gestión de la cuenca.

***Figura 16.*** *Erosión hídrica en la cuenca del río Apuela*




## 4.2 Calibración del modelo RUSLE

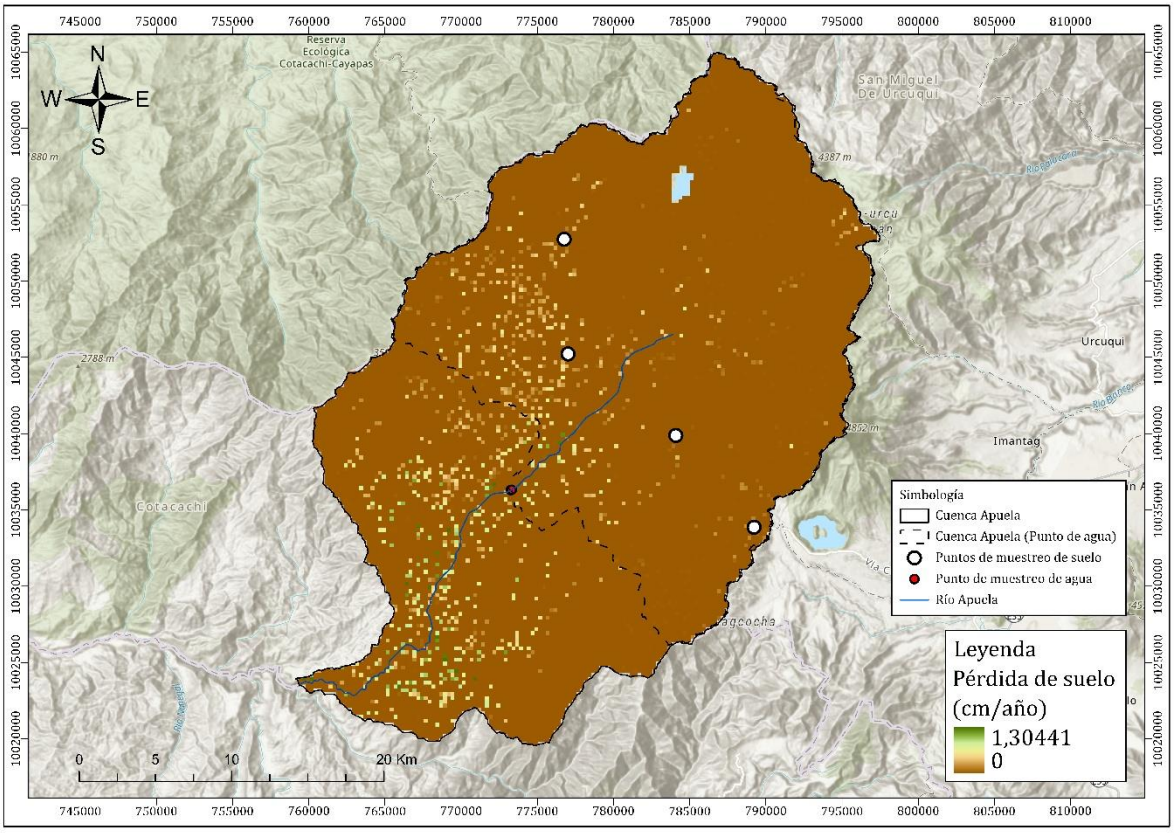
La validación del modelo dentro del área de estudio de la cuenca hidrográfica determinó una Relación de Entrega de Sedimentos (SDR) de 0.16, lo que determina que el 16% del material erosionado se transporta hacia el punto de aforo. Bajo esta condición, el valor promedio RUSLE es de 1.26 ton/ha/año, equivalente a 0.61 cm/año, la modelación predictiva consideró una producción de sedimentos (SY) de 0.21 ton/ha/año. Mientras que el caudal calculado de la cuenca fue de 15.10 m³/s, mediante el promedio de los valores de caudal que han sido reportados en la base de datos INAMHI.

De la superficie total de la cuenca de 104409.79 ha, se definió una superficie de 68415.57 ha desde el punto de toma de muestra de agua para el estudio. Con estos resultados se confirmó la carga sedimentaria conseguida en campo y se calculó la integración de la concentración de sólidos suspendidos con el caudal calculado. El indicador estadístico PBIAS determinó un sesgo bajo sobreestimado moderado del -12.71%, lo que determina que el modelo se encuentra dentro del umbral “aceptable” en la categoría de “bueno” conforme con la clasificación de Moriasi et al. (2007).

## 4.3 Cuantificación de la pérdida de suelo: un análisis de la profundidad efectiva de pérdida

Se determinó que en la mayoría de la cuenca hidrográfica del río Apuela no existe pérdida de suelo al tener un valor de 0 cm/año, mientras que en zonas de la cuenca baja el valor aumenta a 1.30 cm/año de suelo perdido (Figura 17). Sin embargo, si la cuenca presentara suelos compactados, su densidad aparente sería elevada si supera aproximadamente el 1.6 g/cm³ (Brady & Weil, 2016)., típica de suelos degradados o sometidos a sobrepastoreo, y la tasa de pérdida de suelo sería un valor mayor, reflejaría una menor capacidad de infiltración y mayor riesgo erosivo a futuro (Aparicio y Costa, 2014). De esta manera, la densidad aparente actúa como un puente entre el resultado numérico del modelo RUSLE y su interpretación física real del suelo.

***Figura 17.*** *Pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río Apuela.*

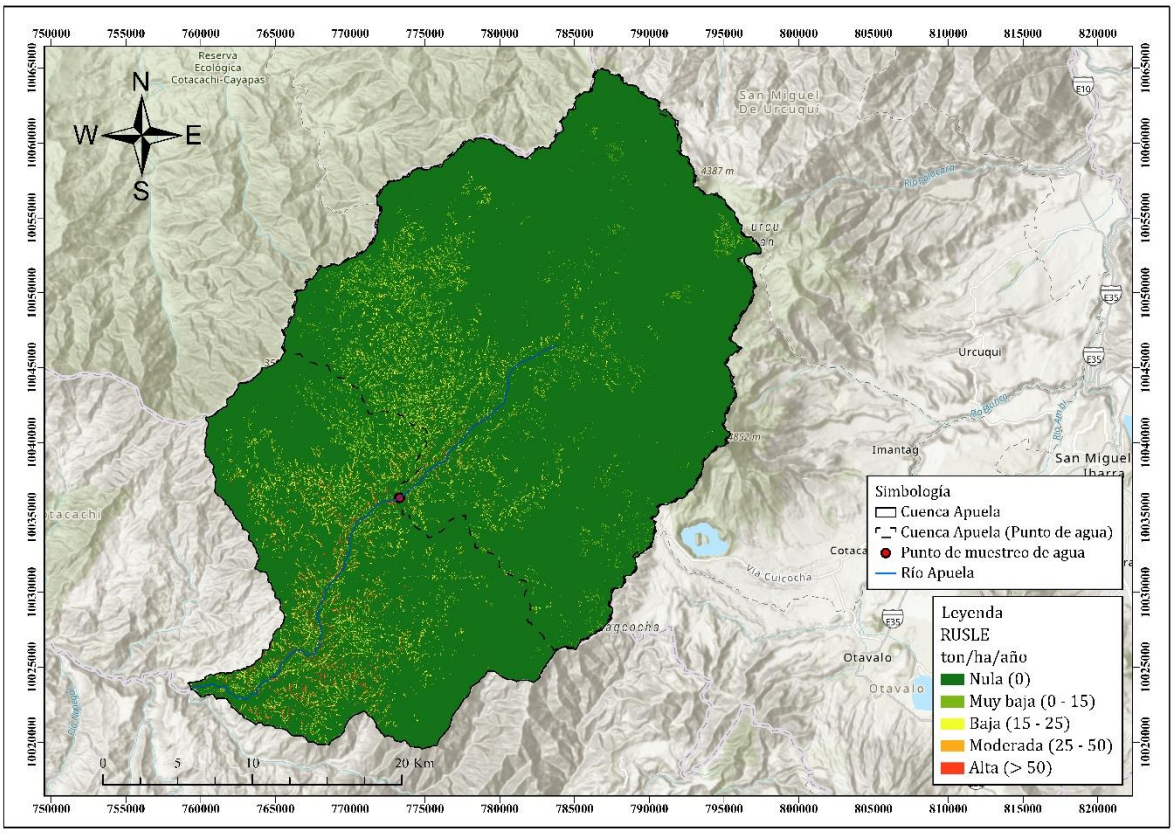



## 4.4 Zonificación del riesgo de erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río Apuela.

La cuenca hidrográfica del río Apuela presentó cinco categorías de erosión: nula, muy baja, baja, moderada y alta que provienen de metodologías oficiales de evaluación ambiental e hidrológica (ATUK Consultoría Estratégica, 2022). Los valores del modelo RUSLE

determinan que las áreas de bajo riesgo de erosión se representan por rangos de 25–50 ton/ha/año y > 50 ton/ha/año, dado que son zonas críticas de pérdida de suelo (Figura 18). En los sitios de riesgo crítico la combinación de pendientes pronunciadas y cobertura vegetal escasa acelera el transporte de partículas y sedimentos. Dichas zonas pueden sufrir impactos severos si no se implementan medidas de mitigación efectivas.

***Figura 18.*** *Zonificación de la erosión hídrica en la cuenca del río Apuela*



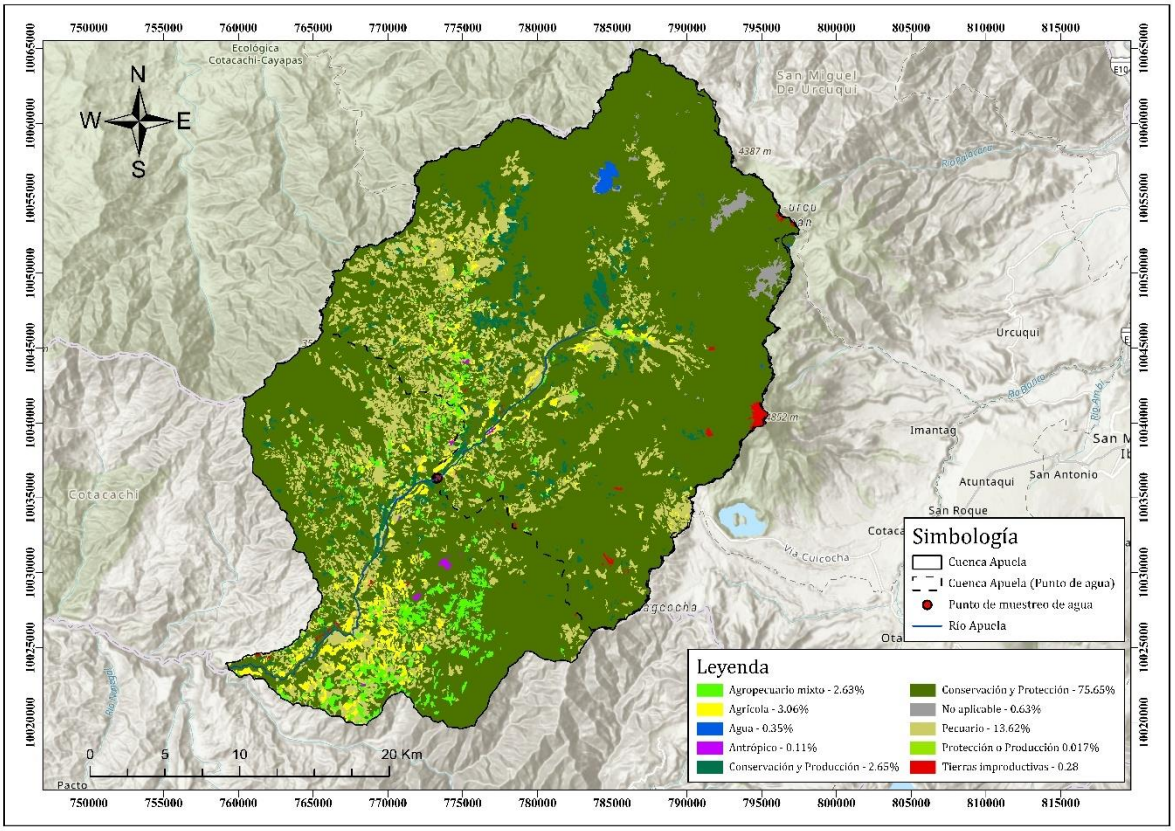

## 4.5 Modelo Presión-Estado-Respuesta aplicado para la cuenca hidrográfica del río Apuela

La propuesta planteada mediante el modelo PER está basada en la gestión sistemática de paisajes degradados, que parte del diagnóstico de los factores hidrológicos y edafológicos de la cuenca hidrográfica del río Apuela. La intervención tiene como objetivo analizar los indicadores de presión a través de las clases agrológicas, uso potencial y conflictos de uso de suelo.

### 4.5.1 Indicadores de presión

Según el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Cotacachi (2015) el uso potencial del suelo es estrictamente para conservación y protección de la riqueza hídrica y paisajística. Por lo tanto, en la Figura 19 se describe los 10 usos que tiene el suelo de la cuenca del río Apuela, los tres usos potenciales más predominantes son el área de conservación y protección con un 75.6% del territorio, seguido por el uso pecuario con un 13.6% del territorio, el uso agrícola dentro del 3.1% del territorio. Mientras que los usos potenciales con menor porcentaje son el de conservación y producción con un 2.6% del territorio y el uso agropecuario mixto con un 2.6% del territorio.

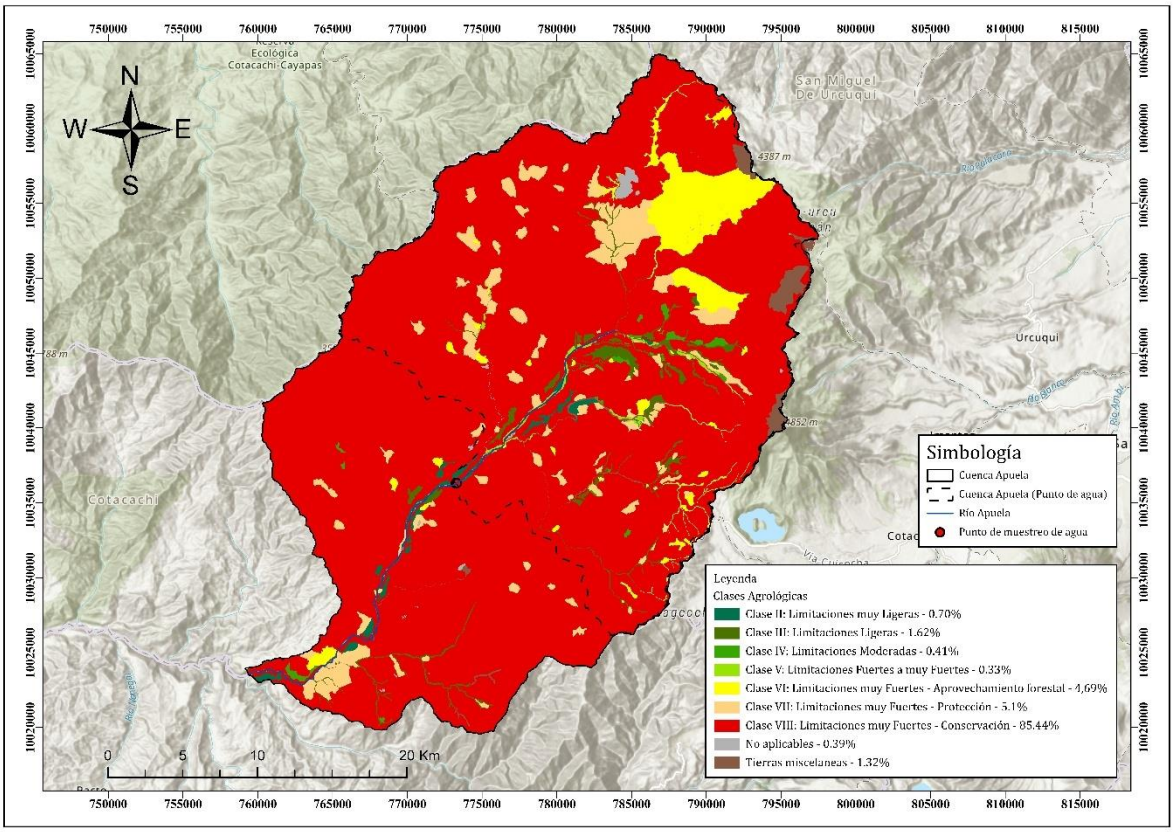
***Figura 19.*** *Uso potencial del suelo de la cuenca del río Apuela*




Las clases agrológicas de la cuenca del río Apuela de la Figura 20 se extienden desde la Clase II hasta la Clase VIII, la cual añade las categorías de no aplicables y tierras misceláneas con un pequeño porcentaje. Aunque las clases más predominantes de la cuenca se encuentran determinadas por limitaciones muy fuertes que restringen severamente las opciones de uso de suelo e inicia con la Clase VIII que representa un territorio de 85.4% destinado a la conservación donde ninguna actividad antrópica es compatible. También la

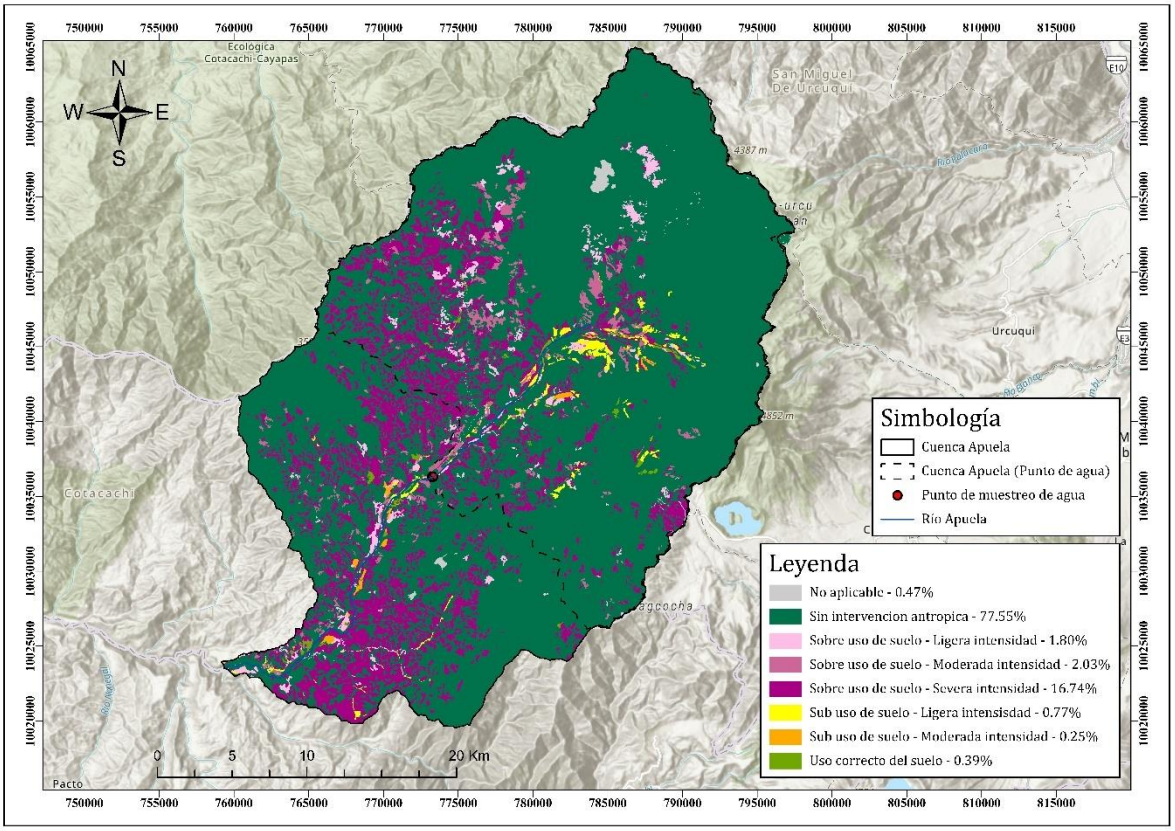
Clase VII se encuentra bajo dichas limitaciones dado que 5.1% del territorio es destinado a la protección y seguido por 4.7% de la Clase VI destinada al aprovechamiento forestal.

***Figura 20.*** *Clases agrológicas de la cuenca del río Apuela*




En la Figura 21 se observan los conflictos de uso de suelo de la cuenca del río Apuela tanto de subuso como de sobreuso de suelo junto con su intensidad definida, donde se añaden las categorías de uso correcto del suelo, sin intervención antrópica y no aplicable. En la mayor parte del territorio de la cuenca se determina que no existe intervención antrópica, que es el 77.6%, seguido del sobre uso del suelo con severa intensidad y moderada intensidad, con 16.7% y el 2.0% respectivamente. En las áreas con dichas intensidades severa y moderada se interpreta que el uso actual en las zonas con sobreuso de la tierra se supera tres o más niveles de la aptitud de uso recomendado para el suelo, degradándolo más rápido.

***Figura 21.*** *Conflictos de uso de suelo de la cuenca del río Apuela*




A través de los mapas anteriormente presentados se determina que la cuenca hidrográfica del río Apuela mantiene grandes áreas de zona y uso potencial destinados a la conservación, en su mayoría en la cuenca alta, mientras que en la cuenca media y baja existen conflictos por el uso del suelo debido a las actividades antrópicas. Dentro de Vacas Galindo, Peñaherrera, Cuellaje, Selva Alegre y García Moreno se presenta un mayor conflicto por la sobreutilización del suelo. La población en general se dedica a la agricultura y la ganadería, lo cual representa un problema para el suelo, al ser intensivas, provocan la degradación acelerada y la erosión de laderas empinadas en los relieves de la zona.

### 4.5.2 Indicador de estado

Una vez identificadas y analizadas las presiones ejercidas sobre la cuenca, se presenta el indicador central del estado del área que corresponde a la pérdida de suelo por erosión hídrica. El valor obtenido mediante la aplicación del modelo RUSLE, equivale a 2.08 ton/ha/año que representa una reducción del espesor edáfico de 1.30 cm/año. Este valor presenta una condición de estabilidad buena en cuanto a pérdida de suelo, es decir, el desprendimiento de suelo ocurre a un ritmo menor al de regeneración natural. Aunque puede haber zonas específicas dentro de la cuenca como en laderas de alta pendiente, donde la tasa

de erosión hídrica es mayor al promedio. Este indicador refleja la condición actual del recurso suelo como consecuencia directa de las presiones. Se traduce de forma cuantitativa el efecto acumulado de las presiones antrópicas sobre la estabilidad del suelo, al permitir identificar zonas críticas de vulnerabilidad dentro de la cuenca y establecer una línea base objetiva.

### 4.5.3 Respuesta

A partir de la información generada sobre las presiones identificadas y el estado actual del recurso, se construyó la matriz combinada FODA, para identificar estrategias de manejo y conservación de suelo. La gestión ambiental eficaz en la cuenca del río Apuela se estructura en base a la definición de estrategias viables orientadas a la conservación y al manejo sostenible del territorio (Tabla 12).

***Tabla 12.*** *Matriz FODA de la cuenca del río Apuela*

| Fortalezas | Oportunidades |
|---|---|
| F1: El 85.4% de la Clase VIII, presenta limitaciones muy fuertes y es orientado exclusivamente a la conservación del territorio, se considera que la mayor parte de la cuenca alta del río Apuela está dentro del Parque Nacional Cotacachi Cayapas. | O1: El 2.6% del uso potencial orientado a la conservación junto con el destinado a preservación (75.6%) representa la oportunidad de ampliar corredores biológicos conectados con el Parque Nacional Cotacachi Cayapas. |
| F2: Presencia de uso adecuado de suelo para preservación (75.6%), para mantener condiciones ecológicas favorables para la conservación de servicios ambientales. | O2: La mayor parte del territorio se encuentra dentro de la clase agrológica VII que posee limitaciones muy fuertes destinadas a la protección (5.0%), que junto con el uso potencial adecuado para conservar (2.6%), se lograría justificar e implementar un turismo sostenible de bajo impacto. |
| F3: La mayor parte de la cuenca no posee intervención antrópica (77.6%), donde se garantiza la regeneración natural del ecosistema. | O3: El valor de PBIAS de -12.71 obtenido en la validación del modelo RUSLE es aceptable con tendencia a sobreestimar, lo que significa que la erosión modelada es confiable y técnicamente sólida, constituye una oportunidad para que esta herramienta validada se convierta en la base científica de futuras investigaciones y decisiones de gestión territorial dentro de la cuenca, |

| | |
|---|---|
| | especialmente se considera que las clases agrológicas, uso potencial y los conflictos determinan que las zonas de conservación y protección ocupan la mayor parte del territorio. |
| F4: Los conflictos más graves de sobreuso severo afectan sólo el 16.7% del territorio, mientras que el subuso y sobreuso de menor intensidad son porcentajes más bajos, lo que sugiere que las intervenciones correctivas sean focalizadas territorialmente. | O4: El 0.39% del territorio presenta que no existe conflicto de uso, por lo que es viable la implementación de prácticas sostenibles como terrazas, agroforestería, barreras vivas y rotación de cultivos, para recuperar la estructura y fertilidad del suelo. |

| **Debilidades** | **Amenazas** |
|---|---|
| D1: En el territorio, el 16.7% representa una explotación del suelo por encima de su capacidad natural en actividades económicas que presionan y fuerzan la producción. | A1: El 13.6% de uso potencial pecuario ejerce un sobreuso ligero del 1.8% sobre suelos de Clase VI con aptitud forestal, evidencia que la ganadería avanza sobre territorios en los que no están permitidas las actividades al ser parte del Parque Nacional Cotacachi Cayapas. La amenaza radica en que esta presión ganadera incipiente, de no regularse oportunamente, escalará inevitablemente hacia un sobreuso severo. |
| D2: Las prácticas agrícolas sobre suelos con pendientes pronunciadas, propias de las Clases III y IV con limitaciones ligeras (1.62 %) y moderadas (0.41%), debilitan progresivamente la estructura del suelo al eliminar la cobertura, aumentando la degradación del suelo junto con la erosión acelerada. | A2: El avance de la frontera agrícola y pecuaria hacia zonas con Clase VIII (85.4% del territorio) representa una amenaza latente y progresiva, puede desencadenar procesos erosivos irreversibles. |
| D3: La Clase VI con apenas 4.6% de la superficie destinada a aprovechamiento forestal representa una proporción muy reducida para generar actividades | A3: La Clase VIII representa el 85.4% del territorio con limitaciones muy fuertes para conservación, lo que significa que cualquier incremento en la presión antrópica sobre |

| | |
|---|---|
| productivas sostenibles dentro de la cuenca, limita las opciones económicas de la población local. | estos suelos podría desencadenar procesos erosivos de difícil reversión, dado que sus características edáficas y topográficas no permiten recuperación natural ante perturbaciones severas. |
| D4: El Factor LS con valores altos (hasta 15.8) corresponde a sectores de pendientes pronunciadas que sugiere que la topografía representa una limitación estructural que el modelo puede no capturar completamente a la escala de análisis utilizada. | A4: Los fenómenos de precipitación extrema tienden a intensificarse con el cambio climático y representan una amenaza directa sobre los sectores con valores altos del factor LS, donde el flujo concentrado puede generar degradación del suelo en cárcavas y deslizamientos. |

Mediante el análisis de la cuenca hidrográfica del río Apuela, se considera tanto los factores ambientales y sociales como las inconsistencias en el manejo de los recursos. En respuesta a la problemática que existe dentro del territorio, se han establecido cuatro estrategias vinculadas con la zonificación de la vulnerabilidad erosiva y las actividades realizadas. La planificación presentada se fundamenta en la aplicación del análisis de la matriz combinada FODA, donde en base a la matriz planteada se diagnostica de manera precisa la situación del territorio, para orientarse al manejo sostenible y la gestión integral de la cuenca hidrográfica (Tabla 13).

***Tabla 13.*** *Matriz de estrategias FA, FO, DO, DA de la cuenca del río Apuela*

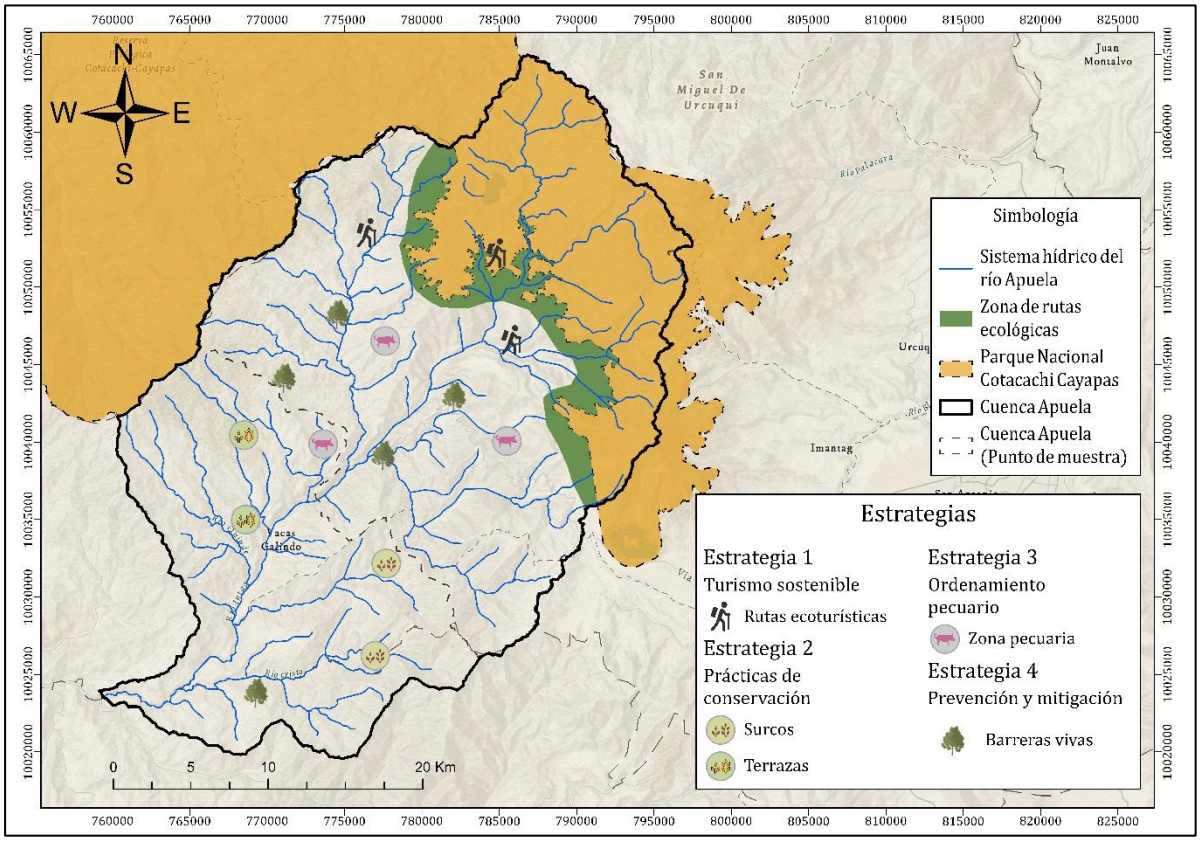
| Tipo | Combinación | Estrategia derivada |
|---|---|---|
| FO | F3+O1 | Potenciación del 75.6% del territorio que no posee intervención antrópica y en su mayoría es destinado a la conservación y preservación, mediante la incorporación de modelos de corredores biológicos conectados con el Parque Nacional Cotacachi Cayapas, a través de reforestación en zonas aptas. |
| FO | F1+O2 | Desarrollar el turismo sostenible como valoración y conservación en la zona periférica de protección del Parque Nacional Cotacachi Cayapas, con diseños de rutas ecoturísticas. |
| FA | F3+A1 | Fortalecer e implementar efectivamente los Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) como instrumentos vinculantes de planificación territorial que delimiten con precisión cartográfica las |

| Tipo | Combinación | Estrategia derivada |
|---|---|---|
| | | zonas de producción agrícola, pecuaria y de conservación, que establezcan restricciones normativas claras que impidan el avance de la frontera agrícola. |
| FA | F4+A2 | Implementar programas de socialización comunitaria que generen conciencia sobre los límites territoriales del uso productivo y ofrezcan alternativas económicas sostenibles a las familias. |
| DO | D1+O4 | Implementar prácticas de conservación de suelo mediante la construcción de terrazas de formación lenta, zanjas de infiltración, barreras vivas con especies nativas y coberturas vegetales permanentes que intercepten el flujo superficial del agua antes de que arrastre las partículas de suelo pendiente abajo, reduce significativamente la tasa de erosión en las zonas de mayor vulnerabilidad. |
| DO | D4+O3 | Establecer un sistema de monitoreo ambiental participativo e integral en la cuenca que combine la recopilación de datos técnicos sobre calidad del suelo, erosión, cobertura vegetal y calidad hídrica con el conocimiento local y tradicional de las comunidades, donde se involucra activamente a los pobladores como actores claves. |
| DA | D2+A1 | Implementar un programa de ordenamiento ganadero que delimite territorialmente las zonas con aptitud real para esta actividad según las clases agrológicas identificadas, donde se busca establecer cercas de exclusión en áreas de protección y conservación para impedir el avance del ganado sobre suelos frágiles y riberas del río. |
| DA | D4+A4 | Implementar un programa integral de prevención y mitigación de deslizamientos en zonas críticas de susceptibilidad a movimientos en masa. |

***Nota:*** *Las combinaciones FA, FO, DO y DA corresponden a las combinaciones de Fortalezas, Debilidades, Oportunidades y Amenazas identificadas en la matriz FODA de la cuenca del río Apuela.*

A continuación, se presentan cuatro estrategias de manejo y conservación de suelo, que presentan acciones concretan que contribuyan a mitigar la pérdida de suelo por erosión hídrica y fortalecer la gestión sostenible de la cuenca. La Figura 25 presenta la distribución de las estrategias propuestas para la cuenca hidrográfica del río Apuela.

***Figura 22.*** *Estrategias de conservación propuestas en la cuenca hidrográfica del río Apuela*




**Estrategia 1: Desarrollar turismo sostenible en la zona periférica de protección del Parque Nacional Cotacachi Cayapas**

**Ubicación:** Zona de amortiguamiento del Parque Nacional Cotacachi Cayapas

**Justificación:** Reconocimiento del valor ecológico, hídrico y paisajístico de la zona de amortiguamiento como espacio territorial estratégico e imprescindible para garantizar la integridad del Parque Nacional Cotacachi Cayapas, el cual funcionara una como franja de transición que regula las presiones antrópicas externas.

**Objetivos:** Conservar la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Cotacachi Cayapas a través de turismo sostenible.

**Meta:** Determinar 3 rutas ecoturísticas interpretativas en la zona de amortiguamiento, con la participación de 3 comunidades locales capacitadas en guianza, manejo ambiental y atención al turista, se logrará reducir un 20% de la presión antrópica, durante un período de 3 años (Tabla 14).

***Tabla 14.*** *Matriz Operativa Estrategia 1*

| Actividades | Indicadores | Medios de verificación | Alcance | Responsables |
|---|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Diseño de rutas ecoturísticas | - Número de rutas diseñadas en los primeros 6 meses. | - Mapas y rutas georreferenciadas | Identificar los criterios de fragilidad ecológica, capacidad de carga y conectividad con atractivos naturales. | GAD de Cotacachi |
| Formación comunitaria en guianza y manejo ambiental | - Número de participantes capacitados | - Actas de asistencia<br>- Acreditaciones de formación | Destacarf a jóvenes y mujeres como actores estratégicos, formándolos en guianza e interpretación ambiental. | Ministerio de Turismo |
| Implementación de infraestructura turística de bajo impacto | - Número de infraestructuras instalados en 1 año | - Actas de entrega del proyecto | Comprende la instalación de señalética interpretativa, miradores con materiales locales y sostenibles y puntos de información sobre la biodiversidad y los ecosistemas | Gobierno Autónomo Descentralizado de Cotacachi<br>Ministerio de Ambiente y Energía |
| Monitoreo de capacidad de carga turística | - Número de turistas mensuales | - Reportes de visitantes | Índice de impacto ≤ 15% | Gobierno Autónomo Descentralizado de Cotacachi<br>Ministerio de Ambiente y Energía |

**Estrategia 2: Aplicar prácticas de conservación de suelo en riberas y laderas pronunciadas con mayor riesgo de erosión**

**Ubicación:** Laderas y riberas del río Apuela

**Justificación:** La conservación del suelo en laderas garantiza el mantenimiento de la capacidad de infiltración hídrica, permite que el agua de lluvia se incorpore al subsuelo, dado que se recargan los acuíferos y manantiales en lugar de escurrir superficialmente donde se arrastran las partículas.

**Objetivos:** Establecer prácticas de conservación de suelo en las zonas de mayor vulnerabilidad en las laderas y pendientes de la cuenca del río Apuela.

**Meta:** Implementar prácticas de conservación de suelo mediante la construcción de terrazas de formación lenta, barreras vivas con especies nativas y coberturas vegetales permanentes en el 30% de la cuenca dentro del primer año de ejecución de las estrategias (Tabla 15).

***Tabla 15.*** *Matriz Operativa Estrategia 2*

| Actividades | Indicadores | Medios de verificación | Alcance | Responsables |
|---|---|---|---|---|
| Determinación de zonas con mayor riesgo de erosión. | - Número de hectáreas afectadas.<br>- Porcentaje de terreno identificado con riesgo bajo, medio y alto. | - Mapas de vulnerabilidad ante la erosión.<br>- Informes técnicos en campo. | Identificar y delimitar las áreas vulnerables a procesos erosivos. | Personal capacitado |
| Planificación de las prácticas de conservación | - Número de prácticas adecuadas al tipo de pendiente, suelo y cobertura. | - Constancias de socialización<br>- Matriz de recomendación por tipo de terreno. | Definir prácticas correspondientes a las diferentes condiciones del terreno, como terrazas y barreras vivas. | GAD de Cotacachi |
| Producción en vivero de especies nativas. | - Número de especies de plantas | - Actas de entrega de plantas | Producir material vegetal nativo para restauración. | Propietarios de terrenos |
| Instalación de cada tipo de práctica | - Metros de barreras establecidas | - Fichas de monitoreo. | Disminuir la degradación del suelo y la erosión excesiva. | Técnicos de apoyo |

**Estrategia 3: Elaborar un programa de ordenamiento pecuario que delimite territorialmente las zonas con aptitud real para esta actividad**

**Ubicación:** Zonas de aptitud pecuaria

**Justificación:** La actividad pecuaria representa una de las principales causas de degradación del suelo, al expandirse de manera desordenada y sin criterio técnico sobre territorios que no tienen aptitud natural para soportarla.

**Objetivos:** Implementar un programa de ordenamiento pecuario en zonas aptas para su desarrollo sin expandir la frontera pecuaria hacia zonas destinadas a la conservación.

**Meta:** Establecer 5 sistemas silvopastoriles y la capacitación de 10 familias ganaderas en técnicas de manejos sostenible de potreros, para reducir un 30% de conflictos de sobreuso (Tabla 16).

***Tabla 16.*** *Matriz Operativa Estrategia 3*

| Actividades | Indicadores | Medios de verificación | Alcance | Responsables |
|---|---|---|---|---|
| Determinación de zonas aptas para actividad pecuaria. | - Porcentaje identificada en la zona | - Mapas de aptitud pecuaria<br>- Informes técnicos de diagnóstico en campo. | Identificar y demarcar las áreas aptas para el manejo de los potreros. | Asesores ambientales |
| Diagnóstico socioeconómico de familias ganaderas en las zonas de sobreuso. | - Número de familias afectadas en los primeros 4 meses. | - Constancias de socialización | Definir qué práctica usan las familias en los potreros | Gobierno Autónomo Descentralizado de Cotacachi |
| Implementación de sistemas silvopastoriles | - Número de sistemas implementados en 2 años | - Informes técnicos<br>- Registros fotográficos | Establecimiento de sistemas productivos que integran árboles, arbustos forrajeros y pastos mejorados. | Técnicos de apoyo<br>Propietarios de terrenos |
| Capacitación en manejo sostenible | - Familias capacitadas en 1 año | - Fichas de registro de participantes | Formación técnica de las familias ganaderas | Técnicos de apoyo |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | identificadas en el diagnóstico | |

**Estrategia 4: Detallar un programa integral de prevención y mitigación de deslizamientos**

**Ubicación:** Zonas susceptibles a deslizamientos

**Justificación:** La ejecución de acciones de revegetación con especies nativas de raíz profunda que anclen el suelo aumentan la capacidad de absorción hídrica, estas permiten reducir el flujo superficial que desencadena los deslizamientos, complementado con la construcción de drenajes, zanjas y muros de contención en sectores de mayor riesgo.

**Objetivos:** Implementar un programa integral de prevención y mitigación de deslizamientos en la cuenca del Río Apuela.

**Meta:** Reducir en un 40% la superficie con alta susceptibilidad a deslizamientos dentro de la cuenca del Río Apuela mediante la revegetación de al menos 500 hectáreas de laderas degradadas (Tabla 17).

***Tabla 17.*** *Matriz Operativa Estrategia 4*

| Actividades | Indicadores | Medios de verificación | Alcance | Responsables |
|---|---|---|---|---|
| Zonificación de áreas con alta susceptibilidad a deslizamientos | - Número de hectáreas diagnosticadas.<br>- Porcentaje del área total identificada. | - Mapas de susceptibilidad a deslizamientos<br>- Informes técnicos de diagnóstico en campo.<br>- Base de datos cartográficos. | Identificar y delimitar las áreas con mayor susceptibilidad a movimientos en masa | Técnicos ambientales |
| Revegetación de laderas degradadas con especies nativas | - Número de hectáreas reforestadas en 1 año | - Registros del monitoreo<br>- Registros fotográficos | Restauración de la cobertura vegetal en las laderas con mayor grado de degradación y susceptibilidad erosiva identificadas | Gobierno Autónomo Descentralizado de Cotacachi<br>Ministerio de Ambientes y Energía |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Implementación de prácticas de conservación de suelo en pendientes y laderas | - Número de hectáreas conservadas a los 3 años | - Informes técnicos<br>- Registros fotográficos | Aumento de infiltración hídrica y disminución de la pérdida de suelo por erosión hídrica en pendientes pronunciadas con alta pluviosidad dentro de la cuenca. | Técnicos de apoyo<br>Propietarios de terrenos |
| Sistema de monitoreo hidrometeorológico | - Número de estaciones operativas | - Informes de instalación<br>- Registro de datos de la estación | Instalación y operación de estaciones hidrometeorológicas y sensores de movimiento de suelo en los sectores de mayor riesgo de la cuenca | Técnicos de apoyo |

## 4.6 Discusión

### 4.6.1 Comparación de resultados con estudios previos

Rosales- Enríquez (2020) aplicó el modelo RUSLE para la evaluación de la erosión hídrica en la cuenca del río Chota, determina que las cuencas de Ecuador presentan problemas erosivos debido al mal manejo del recurso suelo. La superficie desde el punto de muestra de agua es de 68415.57 ha, esta presenta condiciones geográficas y climáticas propias de los Andes ecuatorianos, convirtiéndola en un territorio con alta susceptibilidad a procesos de erosión hídrica. En la aplicación de la fórmula del modelo RUSLE, permitió obtener una tasa media de pérdida de suelo de 2.08 ton/ha/año para el área de estudio. Este valor, debe interpretarse según el contexto de la heterogeneidad espacial de los factores que lo componen (Arias-Muñoz et al., 2023)

El Factor R calculado en la cuenca del río Apuela se clasificó con las siguientes categorías: baja < 572 MJ mm/ha/h/año, moderados entre 572 y 832 MJ mm/ha/h/año, valores medios entre 832 y 1145 MJ mm/ha/h/año, que alcanzan niveles altos > 1553 MJ mm/ha/h/año. En la cuenca del río Mira, la erosividad pluvial promedio fue de 550.47 MJ mm/h/ha/año, con variaciones ligadas principalmente a la diferencia altitudinal; el potencial erosivo de las lluvias resultó mayor en la sección baja y menor en la sección alta de la cuenca

(Arias-Muñoz et al., 2023). Esto es comparable a lo observado en Apuela, donde los sectores de menor altitud registran mayor energía erosiva. En otras cuencas andinas de Ecuador, las tasas de erosividad pueden alcanzar rangos entre 2.550 y 18.842 MJ mm/ha/h/año al sur del país (Rosales Enríquez et al., 2020).

La cuenca del río Apuela no es un sistema independiente, sus sedimentos y materiales erosionados se transportan hacia el río Esmeraldas convirtiéndose en la cuenca contenedora. Por lo tanto, los resultados obtenidos para el Factor K o erodabilidad en ambas cuencas determinan que la arena es el compuesto principal en la composición del suelo, que alcanza el 35% de su composición total, seguido del limo, que disminuye al 32%, y de la arcilla, al 26%. Con respecto al SOC, un alto porcentaje representa condiciones más favorables para el suelo, que se traduce en valores del Factor K más bajos, al tener mayor resistencia a la erosión del suelo (Fernández Párraga et al., 2023). En la cuenca del río Apuela, un porcentaje de arena es del 45.6%, del limo con 25.22% y de arcilla con 23.5%, lo que representa que este hallazgo coincide con lo reportado en la investigación de Fernández Párraga et al. (2023), donde el compuesto arena se identifica como el factor más relevante en la erodabilidad del suelo en la cuenca del río Esmeraldas.

El factor LS es la combinación de la longitud e inclinación de la pendiente. Dentro de la cuenca de Apuela se obtuvieron valores bajos < 1.6, moderados 1.6–4.5, medios 4.5–7.6 y altos hasta 15.8 resultado aceptable de una cuenca de montaña con fuertes variaciones de relieve. La microcuenca del río Palacara presentó valores desde 0 en sectores planos hasta 58.5 en lugares con pendientes superiores a la media, distribuyéndose las zonas de erosión alta principalmente en los lugares con valores elevados de este factor (Posso Guevara & Imbaquingo Acero, 2025). Se acepta que la erosión aumenta con el incremento de la longitud de la pendiente, lo que consiste con la distribución observada en cuencas andinas. Los sectores con este factor alto en Apuela corresponden a las vertientes más pronunciadas, donde el flujo superficial incrementa la capacidad de transporte de sedimentos.

El Factor C es uno de los determinantes más importantes de la erosión en cuencas andinas, al considerarse como indicador de nula o elevada protección de suelo. Por lo tanto, evidencia la presencia de procesos erosivos que aumentan en los sectores más elevados de la cuenca, justamente donde la presencia de vegetación rala y de baja intensidad (Pacheco et al., 2013). Los valores asignados al factor son cercanos a 1 si existe poca cobertura vegetal, mientras que cuando existe áreas con mayor densidad de cobertura los valores tienden a ser

cercanos a 0 (Jaya-Santillán, 2023). En la cuenca del río Apuela las tres coberturas más predominantes en la cuenca son: bosque 0.01 y páramo 0.040 y actúan como coberturas protectoras, para reducir significativamente la erosión laminar gracias a su capacidad de infiltración y la intercepción de la precipitación. Mientras que los cultivos 0.35 es una cobertura que riesgo erosivo que genera en la cuenca.

### 4.6.2 Calibración del modelo mediante PBIAS

El valor de PBIAS obtenido fue de -12.7%. esto nos indica que hay una ligera tendencia de un sesgo bajo del modelo a sobreestimar los sedimentos simulados respecto a los observados. Según los criterios de evaluación de modelos hidrológicos, un PBIAS entre ±10% y ±15%, pertenece a la categoría "bueno", que denota su aceptabilidad para simulaciones en cuencas de montaña con variabilidad hidrológica alta (Moriasi et al., 2007). Al ser bueno el valor obtenido mediante PBIAS, valida la aplicación del modelo para las condiciones de la cuenca hidrográfica del río Apuela.

En estudios similares aplicados en cuencas andinas ecuatorianas, los datos de estaciones meteorológicas y datos modelados fueron considerados aceptables para la validación del factor de erosividad (Arias-Muñoz et al. 2023). En la microcuenca del río Palacara el modelo sobreestima un –4.6% entre los valores simulados y observados, lo que señala al modelo como muy bueno, lo que sugiere una alta precisión al encontrarse dentro de los rangos aceptables (Posso Guevara & Imbaquingo Acero, 2025). El PBIAS de -12.7% representa la complejidad hidrológica de la cuenca, donde indica que la heterogeneidad del relieve, la variabilidad de la cobertura vegetal y la estacionalidad de las lluvias generan incertidumbre en la calibración, pero sin invalidar los resultados del modelo.

### 4.6.3 Clases agrologicas, uso potencial del suelo y conflictos de uso

Los resultados de las clases agrologicas en la cuenca del río Apuela revelan que la superficie de la Clase VIII (limitaciones muy fuertes para conservación), 85.4%, la superficie de la Clase VII (protección) 5.1% y la Clase VI (aprovechamiento forestal) 4.6%. Estos datos nos indican que la mayoría del territorio tiene vocación natural de conservación y no de uso agropecuario intensivo. En los Andes ecuatorianos es muy común que la expansión agrícola se produzca en áreas con pendiente inclinada, esto incrementa la erosión del suelo y la formación de suelos degradados (Rosales Enríquez et al., 2020). El mapa de uso potencial presenta lo siguiente la realidad del territorio tiene aptitud de preservación un 80.3%, el uso

pecuario 12.2% y apenas el uso agrícola con 1.6%. La discrepancia entre el uso actual y el potencial explica en parte los conflictos de uso identificados y la presión erosiva localizada en ciertos sectores de la cuenca.

Esta situación se confirma en el mapa de conflictos de uso de la cuenca que presenta el sobre uso severo 12.1% y el sobre uso moderado con el 2.3%, mientras sin intervención antrópica es del 81.6%. En el cantón Cotacachi de acuerdo con los resultados del uso potencial y conflictos de uso, la expansión agrícola es el principal causante del impacto al suelo, al no ser utilizado adecuadamente de acuerdo con su uso potencial, como consecuencia disminuyó la cobertura del bosque nativo (Molina & Villalva, 2022) En los conflictos de uso de la cuenca del río Apuela existe el sobre uso, estos, aunque en proporción minoritaria, representa una amenaza real sobre suelos con vocación conservacionista.

### 4.6.4 Estrategias de conservación

Las estrategias propuestas evidencian un enfoque integral hacia la sostenibilidad y la gestión ambiental en el Parque Nacional Cotacachi Cayapas. La primera estrategia se centra en el turismo sostenibles con rutas ecológicas, busca equilibrar el desarrollo económico social con la conservación, fomenta prácticas responsables que reducen la presión sobre los ecosistemas (Ceballos-Lascuráin, 1996). La segunda, se relaciona con la conservación en laderas y riberas mediante terrazas y surcos, garantiza la necesidad de mitigar la erosión y preservar la calidad del suelo, este aspecto es clave en las zonas de alta fragilidad ecológica (FAO, 2017).

La tercera estrategia, habla sobre el ordenamiento pecuario en áreas de aptitud real, aporta a disminuir la presión sobre ecosistemas no aptos y a optimizar la productividad bajo criterios de sostenibilidad (INEC, 2020). La cuarta estrategia, propone el programa integral de prevención y mitigación de deslizamientos por medio de la zonificación, se alinea con la gestión de riesgos que garantiza la seguridad para las comunidades y resiliencia frente a los fenómenos naturales (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2019). En términos generales, estas estrategias unen la conservación, desarrollo y prevención, para generar un modelo de gestión territorial que fortalece la relación entre naturaleza y sociedad en un área protegida de alta importancia ecológica.

# CAPÍTULO V

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 5.1 Conclusiones

El presente estudio demostró que el modelo RUSLE simula de forma adecuada la erosión hídrica y la producción de sedimentos en la cuenca hidrográfica, al demostrar una concordancia entre los valores de sedimentos simulados por el modelo RUSLE y los sedimentos observados en el río Apuela. El modelo fue capaz de representar de manera adecuada el comportamiento real del transporte de sedimentos, respaldado por el indicador estadístico PBIAS con -12.71%. Tuvo un sesgo positivo que subestima y refuerza la confiabilidad de todas las conclusiones anteriores relacionadas con la pérdida de suelo, zonificación del riesgo y la necesidad de las estrategias de conservación propuestas, ya que se sustentan en un modelo cuya capacidad predictiva ha sido confirmada mediante la comparación directa con datos reales de campo.

La cuenca hidrográfica del río Apuela presentó la tasa media de pérdida de suelo de 2.08 ton/ha/año, lo que corresponde a 1.30 cm/año. No obstante, al realizar el análisis desde el punto que se tomó la muestra de agua, el valor disminuyó considerablemente a 1.26 ton/ha/año que equivale a 0.61 cm/año, con una menor tasa de erosión en la cuenca alta. Estos valores corroboran que la erosión representa un riesgo bajo de pérdida de suelo, que manifiesta que la cuenca se encuentra en buen estado de conservación, reflejado en la fertilidad del suelo, calidad de agua adecuada y condiciones favorables para la seguridad de las comunidades ribereñas. Esta condición favorable puede atribuirse a la cobertura vegetal existente al ser 80.83% del territorio y contribuye a reducir la exposición del suelo a los agentes erosivos.

En la cuenca hidrográfica el 80% de su territorio presenta un bajo nivel de erosión actual, en gran medida, es el producto de un equilibrio multidimensional, entre la cobertura vegetal predominante en la zona y la pendiente media que es de 43.46%. No obstante, puede alterarse a mediano o largo plazo por factores como la deforestación, la expansión de la frontera agrícola, el cambio de uso del suelo o los efectos del cambio climático sobre los patrones de precipitación.

Las estrategias de conservación de suelo y mitigación de erosión hídrica identificadas en la cuenca hidrográfica son a) el desarrollo de turismo sostenible en la zona periférica de protección del Parque Nacional Cotacachi Cayapas b) aplicación de prácticas de conservación de suelo en riberas y laderas pronunciadas con mayor riesgo de erosión c) elaboración de un programa de ordenamiento pecuario que delimite territorialmente las zonas con aptitud real para esta actividad y d) descripción de un programa integral de prevención y mitigación de deslizamientos. Cada una fue planteada para promover el manejo sostenible del suelo en la cuenca hidrográfica del río Apuela, y poder reducir los procesos de erosión y degradación, con el fin de conservar su productividad y garantizar la calidad ambiental a largo plazo.

Todos estos factores limitan la capacidad erosiva del agua para obtener niveles mínimos de sedimentación. El nivel de riesgo de erosión del río Apuela refleja una condición favorable para el ambiente, la sociedad y la economía. La zonificación del análisis permite entender que no debe interpretarse como una garantía permanente, si no como una oportunidad para tomar medidas anticipadas. La identificación de las zonas con menor grado de protección natural resulta un aporte determinante para prever posibles puntos de vulnerabilidad ante cambios futuros en el uso del suelo o en las condiciones naturales. Si no se actúa de manera coordinada, la erosión hídrica puede agudizarse y comprometer la estabilidad ecológica y social del territorio. Resulta fundamental que para garantizar la sostenibilidad de la cuenca la gestión integral combine la conservación ecológica, participación comunitaria y planificación territorial.

## 5.2 Recomendaciones

El ordenamiento territorial es una recomendación estratégica que debe ser aplicada por los Gobiernos Autónomos Descentralizados de Imbabura. Los resultados muestran que gran parte de la cuenca está predestinada a la conservación, también existen áreas con sobreuso severo y moderado que requieren regulación inmediata. Se propone precisar normativas claras que limiten la expansión agrícola en zonas frágiles y que promuevan el aprovechamiento forestal controlado, proyectos de ecoturismo o actividades pecuarias de baja intensidad. Esta recomendación reviste gran importancia porque reduce la presión sobre el suelo y respalda que la actividad humana se desarrolle en armonía con la capacidad de uso del territorio para evitar que se agraven los procesos erosivos.

Los resultados obtenidos con el modelo RUSLE y la validación con PBIAS deben ser utilizados como insumo técnico en la formulación de políticas públicas y proyectos de gestión ambiental. La información sobre tasas de erosión, factores condicionantes y conflictos de uso del suelo debe incorporarse en los planes de desarrollo regional y en las estrategias de adaptación al cambio climático. Esta recomendación es importante ya que asegura que los datos científicos se traduzcan en acciones concretas de conservación y restauración, este permite orientar la inversión hacia proyectos que reduzcan la erosión y la sedimentación, que fortalezcan la resiliencia de las comunidades locales frente a fenómenos climáticos extremos.

Finalmente, se propone potenciar la educación ambiental y la participación comunitaria en la gestión de la cuenca. La sostenibilidad de las medidas técnicas depende de que la población local comprenda la trascendencia de proteger el suelo y adopte prácticas de manejo sostenible, programas de capacitación y proyectos participativos que puedan generar un cambio hacia la protección del territorio. Aunque esta recomendación es de apoyo, resulta esencial asegurar que las acciones de conservación tengan continuidad y se integren en la vida cotidiana de las comunidades, donde se garantice la sostenibilidad a largo plazo.

# CAPÍTULO VI

## REFERENCIAS


Agostini, M. de los Á., Monterubbianesi, M. G., Studdert, G. A., & Maurette, S. (2014). *Un método simple y práctico para la determinación de densidad aparente. Ciencia del Suelo*, 32(2), 171-176.

Análisis FODA. (2023). *FODA: Matriz o análisis FODA - Una herramienta fundamental*. https://www.analisisfoda.com

Andrade-Carreño, I., Gutiérrez, D. D., & Vivas, M. G. (2025). *Evaluación de la vulnerabilidad del suelo por erosión hídrica en la provincia de Manabí (Ecuador) mediante la aplicación de un modelo geoespacial.* Investigaciones Geográficas, 83, 109-128. https://doi.org/10.14198/ingeo.27414

Andrade Días, M. Y. (2025). *Evaluación de la calidad ambiental ecosistémica de la subcuenca del río Apuela mediante herramientas de teledetección* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio Digital UTN. https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/16900

Aparicio, V., & Costa, J. L. (2014). *Un método simple y práctico para la determinación de densidad aparente.* Ciencia del Suelo, 32(1). https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672014000200003

Aray Saltos, L. J., Cedeño Hidrovo, F. S., & Delgado, D. (2024). *Evaluación del uso y cobertura del suelo en la provincia de Manabí: aplicación de un modelo geoespacial.* Dominio De Las Ciencias, 10(1), 790–804. https://doi.org/10.23857/dc.v10i1.3742

Arias-Muñoz, P., Saz, M. A., & Escolano, S. (2022). *Estimación de la erosión del suelo mediante el modelo RUSLE. Caso de estudio: cuenca media alta del río Mira en los Andes de Ecuador.* Investigaciones Geográficas, 79, 207. https://doi.org/10.14198/ingeo.22390

Arias-Muñoz, P., Saz, M. A., & Escolano, S. (2024). *Tendencias de cambio de usos y coberturas de suelo en la cuenca hidrográfica media-alta del río Mira en Ecuador.* Investigaciones Geográficas, (81), 155-179. https://doi.org/10.14198/INGEO.25248

Asamblea Nacional del Ecuador. (2018). *Código Orgánico del Ambiente*. Registro Oficial. Recuperado de https://www.ambiente.gob.ec/codigo-organico-del-ambiente/

Asamblea Nacional del Ecuador. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Registro Oficial. Recuperado de https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador_act_ene-2021.pdf

ATUK Consultoría Estratégica. (2022). *Índice de Seguridad Hídrica Nacional del Ecuador*. Quito: ATUK.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). The nature and properties of soils (15th ed.). Pearson.

Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J. A. A., Baartman, J., Ballabio, C., Bezak, N., Biddoccu, M., Cerdà, A., Chalise, D., Chen, S., Chen, W., De Girolamo, A. M., Gessesse, G. D., Deumlich, D., Diodato, N., Efthimiou, N., Erpul, G., Fiener, P., . . . Panagos, P. (2021). *Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis.* The Science Of The Total Environment, 780, 146494. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494

Caiza Guale, M. N. (2018). *Validación del Método Gravimétrico para la determinación de Sólidos Suspendidos Totales en aguas de ríos y de industrias del Distrito Metropolitano de Quito* [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional]. http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19290

Camargo, G., & Andrés, F. (2017). *Análisis de sostenibilidad en la conservación y restauración del suelo a partir de los métodos Rusle y la cartografía social en Suesca, Cundinamarca.* Universidad Distrital Francisco José de Caldas. https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/6977/1/GomezCamargoFabi%c3%a1nAndr%c3%a9s2017.pdf

Carranza-Patiño, M., Aragundi-Sabando, L., Macias-Barrera, K., Paredes-Sarabia, E., & Villegas-Ramírez, A. (2024). *Conservación y Manejo Sostenible del Suelo en la Agricultura: Una Revisión Sistemática de Prácticas Tradicionales y Modernas.* Código Científico Revista de Investigación, 5(E3), 1-28. https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v5/ne3/303

Cherlinka, V. (2022). *Erosión del suelo agrícola: Tipos, efectos, cómo evitarla*. EOS Data Analytics. https://eos.com/es/blog/erosion-del-suelo/

Conagopare Imbabura. (2023). GAD parroquial de Apuela. https://conagopareimbabura.gob.ec/parroquias/detalle/gad-parroquial-de-apuela/

Corporación Toisán. (2024). Intag. https://toisanintag.wordpress.com/intag/

Delgado, D., Sadaoui, M., Ludwig, W., & Méndez, W. (2022). *Spatio-temporal assessment of rainfall erosivity in Ecuador based on RUSLE using satellite-based high frequency GPM-IMERG precipitation data.* CATENA, 219, 106597. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106597

Erazo, B., Bourrel, L., Frappart, F., Chimborazo, O., Labat, D., Dominguez-Granda, L., Matamoros, D., & Mejia, R. (2018). *Validation of Satellite Estimates (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM) for Rainfall Variability over the Pacific Slope and Coast of Ecuador. Water,* 10(2), 213. https://doi.org/10.3390/w10020213

Espinosa, J., Moreno, J., y Bernal, G. (2022). *Erosión del suelo en Ecuador. Suelos del Ecuador: Clasificación, uso y manejo* (pp. 241–321). Instituto Geográfico Militar (IGM).

Fernández Párraga, A. J., Rodríguez Tejena, Á. A., & Delgado Gutiérrez, D. A. (2023). *Análisis de la distribución espacial de la erodabilidad del suelo en la cuenca del Río Esmeraldas-Ecuador*. Polo del Conocimiento, 8(2), 82-95. https://doi.org/10.23857/pc.v8i2

Firoozi, A. A. (2024). Water erosion processes: Mechanisms, impact, and management strategies. *Results in Engineering, 24*, 103237. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103237

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). *Soil erosion: The greatest challenge to sustainable soil management*. FAO. https://www.fao.org

GAR 2022. (2021). Erosión hídrica-RUSLE parte 1 de 5 | Factor topográfico LS* [Video]. YouTube. https://youtu.be/ki2k79Fr6mI

GeografiAndo. (2025). *Principales tipos de erosión. ¿Cuáles son?, características y ejemplos. [Fácil y rápido]* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=OJMN6XYfOLo

Ghimire, S., Singh, U., Panthi, K. K., & Bhattarai, P. K. (2024). Spatial sediment erosion and yield using RUSLE coupled with distributed SDR model. Water, 16(24), Artículo 3549. https://doi.org/10.3390/w16243549

Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Santa Ana de Cotacachi. (2015). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial cantón Cotacachi 2015–2035*.

Gobierno de Ecuador. (2014). *Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (LORHUyA)*. Registro Oficial. Recuperado de https://regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/03/Ley-Org%C3%A1nica-de-Recursos-H%C3%ADdricos-Usos-y-Aprovechamiento-del-Agua.pdf

Gobierno de Ecuador. (2021). *Resolución ARCA-DE-002-2021*. Agencia de Regulación y Control del Agua. Recuperado de https://regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/05/RESOLUCION-GUIA-TE%CC%81CNICA_20MAY2021-signed.pdf

Gobierno de Ecuador. (2021). *Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025*. Secretaría Nacional de Planificación. Recuperado de https://www.planificacion.gob.ec/plan-de-creacion-de-oportunidades-2021-2025/

Gómez Botero, M. (2017). Estimación de la erosión y propuesta de obras para la conservación de los suelos de Florencia y El Llano en Zamorano, Honduras [Proyecto especial de graduación, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano]. *Zamorano Biblioteca Digital.* https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/88c4ee58-c47d-4c27-809c-3d5b8957f215/content

Gonzaga Vallejo, S. L. (2024). *Aplicación del Modelo Presión Estado Respuesta (PER) en la cuenca urbana del río Malacatos como herramienta de gestión.* European Public & Social Innovation Review, *9*, 1–21. https://doi.org/10.31637/epsir-2024-453

Grupo Excala. (2025). *El fenómeno del Niño y sus implicaciones en el sector de la construcción: impactos y estrategias de mitigación*. Grupo Excala. Recuperado el 7 de julio de 2025, de https://grupoexcala.com/blog/el-fenomeno-del-nino-y-sus-implicaciones-en-el-sector-de-la-construccion-impactos-y-estrategias-de-mitigacion/

Hossne García, A. J., y Cedeño Campos, H. J. (2012). *Comparación de tres métodos para determinar densidad aparente y solidez en tres suelos franco arenosos de sabana* [Tres métodos para determinar la densidad y solidez del suelo en tres suelos arenosos de sabana]. UDO Agrícola.

Jahun, B. G. (2015). Review of soil erosion assessment using RUSLE model and GIS. Journal of Biology, Agriculture and Healthcare, 5(9), 36-47. https://doi.org/10.1080/24749508.2024.2437188

LABONORT Laboratorios Norte. (2026). Reporte de análisis de suelo (Informe N.º 12517-18-19). Ibarra, Ecuador.

Lal, R. (2003). Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International, 29*(4), 437-450. https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00192-7

León, C. (2021). Matriz FODA cruzado [Imagen]. Cristo León. https://www.cristoleon.com/wp-content/uploads/2021/04/FODA-CRUZADO.png

Lu, H., Moran, C. J., Prosser, I. P., & Sivapalan, M. (2004). *Complexity and Integrated Resources Management: Transactions of the 2nd Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society* (Vol. 3, pp. 1117–1122). International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs).

Macías, L., Loor, D., Ortiz-Hernández, E., Casanova, G., Delgado, D. (2021). Comparative Analysis of Soil Slope Stability, Using Dynamic and Pseudo-static Methods on the Garrapata - Santa Maria Road, Manabi Province, Ecuador. In: , et al. Proceedings of the 1st International Conference on Water Energy Food and Sustainability (ICoWEFS 2021). ICoWEFS 2021. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75315-3_55

Matarrita Segura, E. A. (2021). *Estimación de la producción de sedimentos por erosión hídrica laminar en la cuenca del río Abangares* [Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. Repositorio Institucional UCR. https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/bitstreams/03251339-bfbe-4d37-b8a4-5857b68c98a1/download

Morgan, R. P. C. (2005). *Soil erosion and conservation* (3rd ed.). Blackwell Publishing.

Molina, A., Vanacker, V., Rosas Barturen, M., Bonnesoeur, V., Román, F., Ochoa-Tocachi, BF, & Buytaert, W. (2021). *Infraestructura natural para la gestión de riesgos de erosión e inundaciones en los Andes: ¿Qué sabemos?* Tendencias forestales. https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2021/06/Infraestructura-natural-para-la-gestion-de-riesgos-de-erosion-e-inundaciones-en-los-Andes.pdf

Molina Portilla, M. S., Villalva Salazar, V. A., & Rosales Enríquez, O. A. (2022). *Determinación de los conflictos de uso del suelo a partir de su aptitud física en el cantón Cotacachi* [Tesis de licenciatura, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio UTN. http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/12629

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE, 50*(3), 885–900. https://doi.org/10.13031/2013.23153

Pacheco, H., Marcano, A., & Cartaya, S. (2013) Calculation of RUSLE C factor in Carache river basin, Trujillo, Venezuela: Satellite images using Miranda VRSS-1. In Proceedings of the XVI Simposio de la Sociedad Latinoamericana en Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial (SELPER).

Padala Raja Shekar, & Mathew, A. (2024). Assessment of soil erosion and sediment yield in the Peddavagu watershed, India, using a revised universal soil loss equation model (RUSLE) and GIS techniques. *Journal of Water and Climate Change, 15*(7), 3138–3157. https://doi.org/10.2166/wcc.2024.010

Palomino, S. E. R., & Ccoa, D. M. C. (2022). *Efectos de la agricultura intensiva y el cambio climático sobre la biodiversidad. Revista de Investigaciones Altoandinas* - Journal Of High Andean Research, 24(1), 53-64. https://doi.org/10.18271/ria.2022.328

Pandia, E. A. (2016). Modelo presión, estado, respuesta (p-e-r), para la clasificación de indicadores ambientales y gestión de la calidad del agua caso: cuenca del río Puyango Tumbes. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográfica*, 19(37), 39-46. https://doi.org/10.15381/iigeo.v19i37.12953

Poggio, L., de Sousa, L. M., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B. M., Kempen, B., Ribeiro, E., & Rossiter, D. (2021). *SoilGrids 2.0: Producción de información sobre suelos para el globo con incertidumbre espacial cuantificada.* 217-240. https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021

Posso Guevara, A. E., & Imbaquingo Acero, M. J. (2025). *Modelamiento de la erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río Palacara, Imbabura* (Trabajo de titulación de pregrado). Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales.

Pourrut, P. (1994). *L'eau en Equateur: principaux acquis en hydroclimatologie*. *ORSTOM éditions*

Rabelo, D. R., Menezes, E. M. L., & Sousa, P. H. G. O. (2026). *Global sediment yield in semiarid environments: Trends and patterns. Geosystems and Geoenvironment,* Artículo 100549. https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2026.100549

Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. A., McCool D. K. & Yoder D. C. (1997) *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE).* Agriculture Handbook No. 703. USDA-ARS, Washington, DC.

Rosales Enríquez, O. A. (2020). *Aplicación del modelo RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión hídrica: Caso de estudio de la cuenca del río Chota, Ecuador [Tesis de maestría, Universidad de Salzburg]. UNIGIS MSc Programme, Departamento de Geomática - Z_GIS.*

Salas Facho, A. J. (2018). Influencia de indicadores de Presión, Estado y Respuesta (PER) en el desarrollo sostenible de la zona de la franja ribereña del río Chillón distrito Los Olivos. [Tesis de pregrado]. Universidad César Vallejo. *Repositorio* https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/21826

Sánchez Muñoz, J. M. (2016). *Análisis de calidad cartográfica mediante el estudio de la matriz de confusión*. Dialnet. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5998855

Sergieieva, K. (2025, 5 marzo). *Erosión hídrica en la agricultura: causas y prevención.* EOS Data Analytics. https://eos.com/es/blog/erosion-hidrica/

Suárez, A. J. C., Bazurto, E. E. F., González, R. R. V., & Camacho, E. J. A. (2024). *Manejo y conservación de suelos en el Ecuador como medida de mitigación al cambio climático.* RECIMUNDO, 8(2), 422-436. https://doi.org/10.26820/recimundo/8.(2).abril.2024.422-436

Tamrakar, N. K., & Karki, B. (2019). *Propiedades geomorfométricas y variabilidad en la relación de entrega de sedimentos y el rendimiento específico de sedimentos entre subcuencas del río Karra, Hetauda, Nepal subHimalaya central.* Journal of Nepal Geological Society, 59, 19–37. https://doi.org/10.3126/jngs.v59i0.24983

Tayupanta, J., & Jorge, R. (1993). *La erosión hídrica: proceso, factores y formas.* Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias. https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/271/4/iniapscbd229.pdf

Thomas, J., Joseph, S., & Thrivikramji, K. P. (2018). *Assessment of soil erosion in a tropical mountain river basin of the southern Western Ghats, India using RUSLE and GIS.* Geoscience Frontiers, 9(3), 893-906. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.05.011

Tiruwa, D. B., Khanal, B. R., Lamichhane, S., & Acharya, B. S. (2021). *Estimación de la erosión del suelo usando el Sistema de Información Geográfica (SIG) y la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo (RUSLE) en las colinas Siwalik de Nawalparasi*, Nepal. Journal of Water and Climate Change, 12(6), 1958–1974.

United Nations (2020). *CONVENCIÓN DE LA NACIONES UNIDAS DE LUCHA CONTRA LA DESERTIFICACIÓN.* Unccd.int. Recuperado el 21 de julio de 2026, de https://www.unccd.int/sites/default/files/2022-02/UNCCD_Convention_text_SPA.pdf

United Nations. (2020). *Convenio sobre la Diversidad Biológica.* United Nations. Recuperado el 21 de julio de 2026, de https://www.un.org/es/observances/biodiversity-day/convention

Vanacker, V., Guns, M., Clapuyt, F., Balthazar, V., Tenorio, G., & Molina, A. (2020). *Distribución espacio-temporal de los deslizamientos y erosión hídrica en una cuenca Andina tropical*. Pirineos, 175, e051. https://doi.org/10.3989/pirineos.2020.175001

Vanetti, M. (2007). Confusion matrix online calculator. https://marcovanetti.com/pages/cfmatrix/?noc=3

Villamil Castillo, H. A. (2022). Sustainable land-use planning management in Latin America: A systematic literature review. *Revista Venezolana de Gerencia*, 27(98), 417-434. https://doi.org/10.52080/rvgluz.27.98.3

Villazón-Gómez, A., Martín-Gutiérrez, G., & Cobo-Vidal, Y. (2019). *Relación entre la humedad gravimétrica y la resistencia a la penetración en un Vertisol Crómico*. Ingeniería Agrícola, 9(1).

Walling, D. E., & Collins, A. L. (2008). *Sediment Budgets*. Wallingford: International Association of Hydrological Sciences. https://books.google.com.ec/books

Walling, D. E. (1983). *El problema de entrega de sedimentos*. Journal of Hydrology, 65(1–3), 209–237.

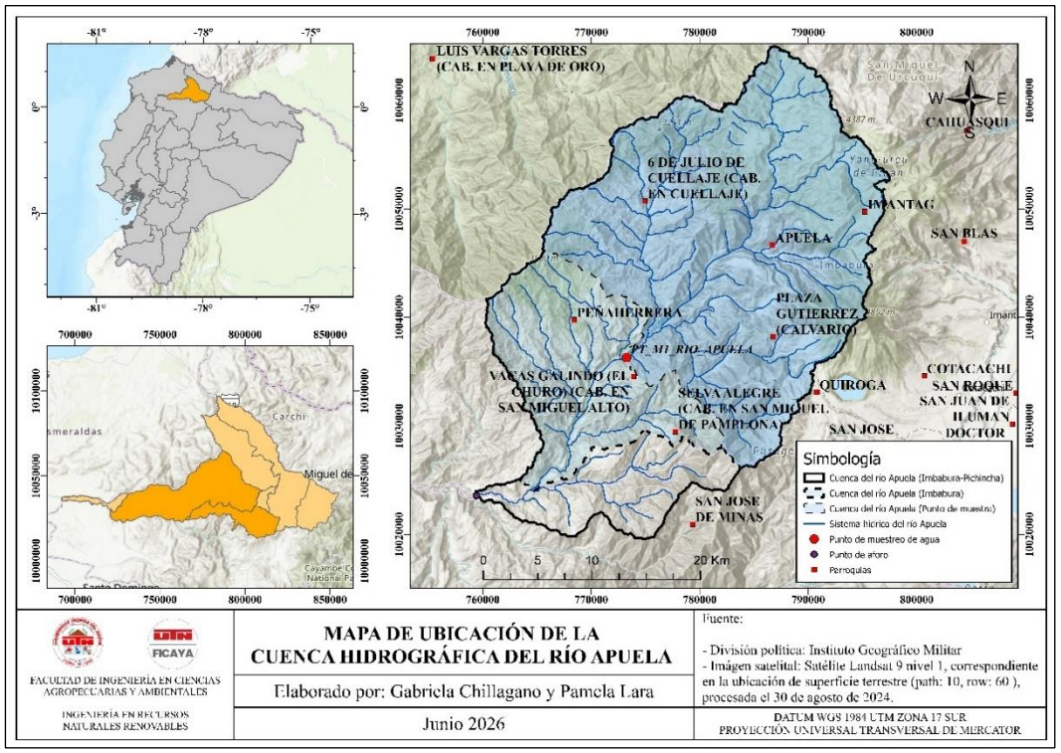
Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning* (Agriculture Handbook No. 537). U.S. Department of Agriculture, Science and Education Administration. https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-A-PURL-gpo31516/pdf/GOVPUB-A-PURL-gpo31516.pdf

Yigez, B., Xiong, D., Zhang, B., Yuan, Y., Baig, M. A., Dahal, N. M., Guadie, A., Zhao, W., & Wu, Y. (2021). *Distribución espacial de la erosión del suelo y el rendimiento de sedimentos en la cuenca del río Koshi, Nepal: Un estudio de caso de la cuenca hidrográfica del Triyuga.* Journal of Soils and Sediments, 21, 3888–3905.

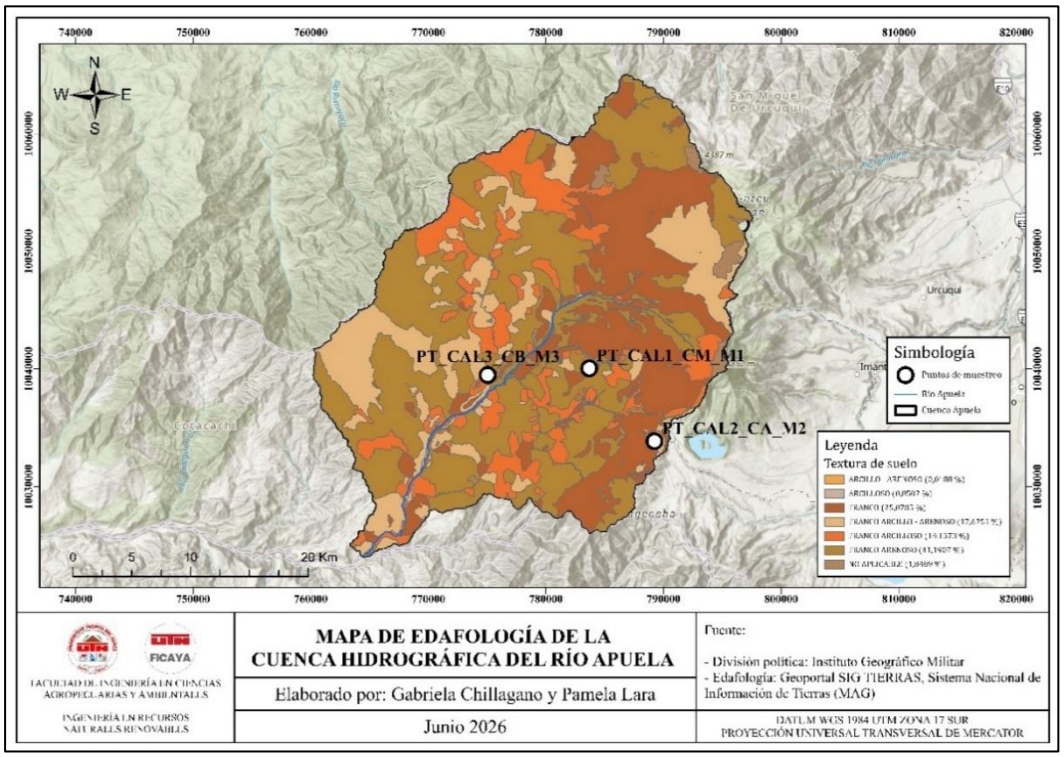
Jaya-Santillán, J. (2023). Altos niveles de erosión hídrica en una microcuenca tropical calculado mediante el modelo USLE. FIGEMPA: Investigación y Desarrollo, 15(1), 26-39. https://doi.org/10.29166/revfig.v15i1.4269

# ANEXOS

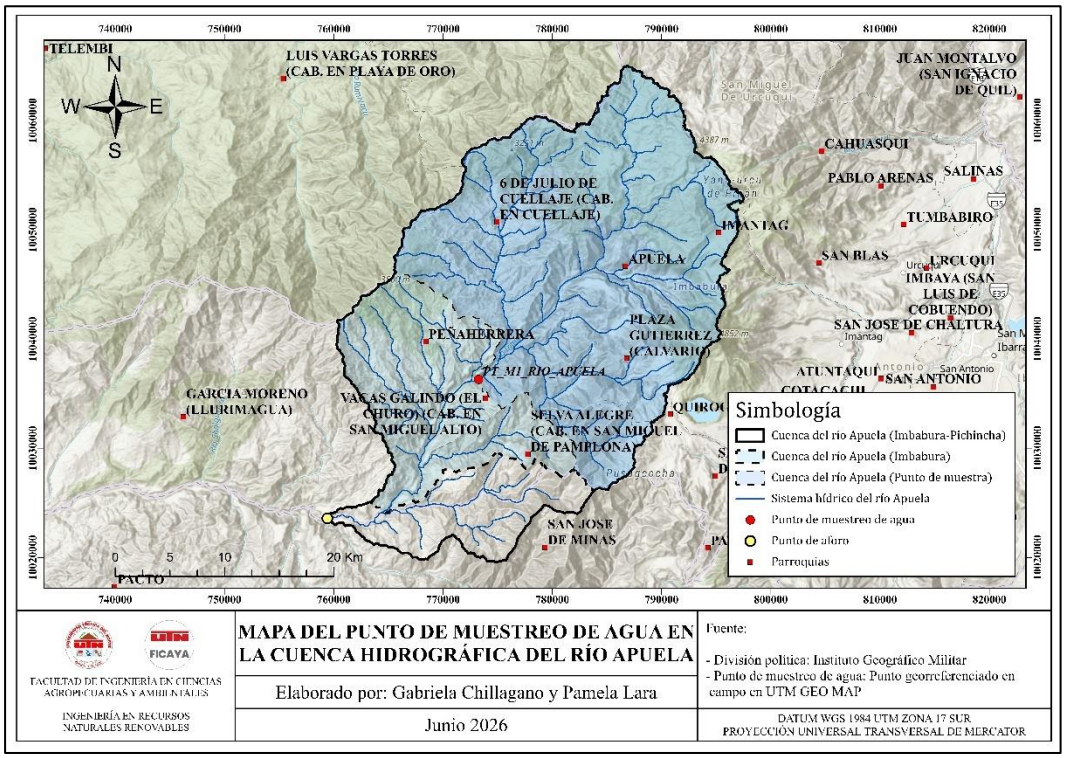
**Anexo 1.** Delimitación de la cuenca hidrográfica del río Apuela



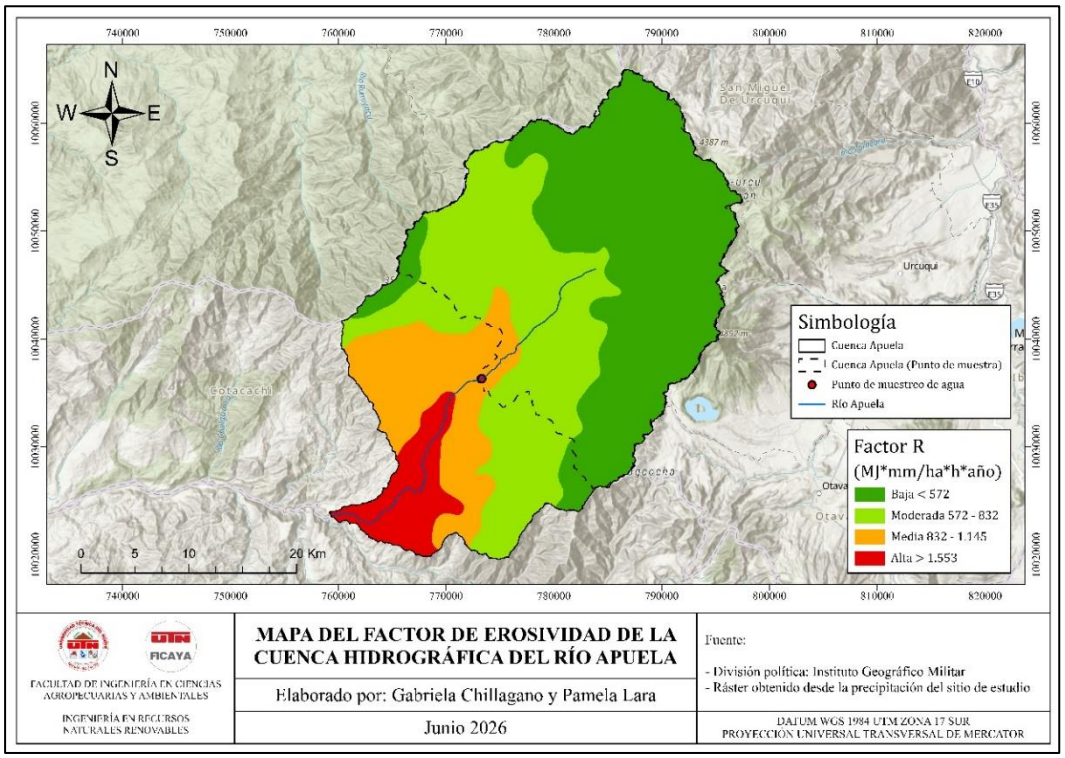

**Anexo 2.** Edafología de la cuenca hidrográfica del río Apuela



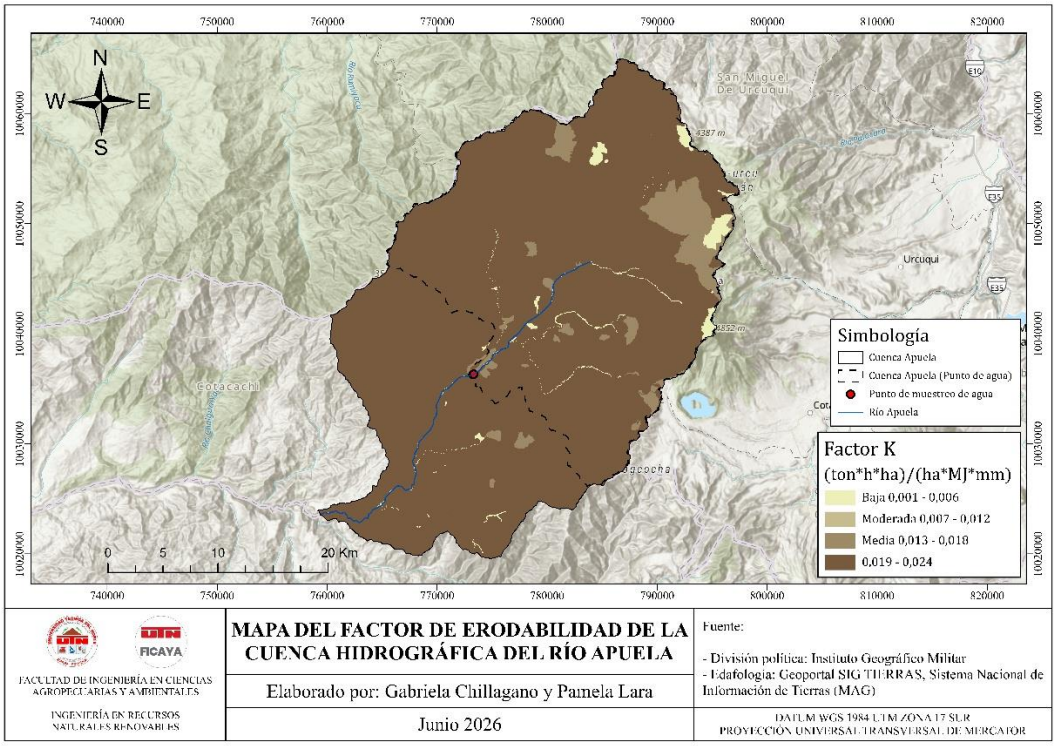
**Anexo 3.** Punto de muestreo de agua



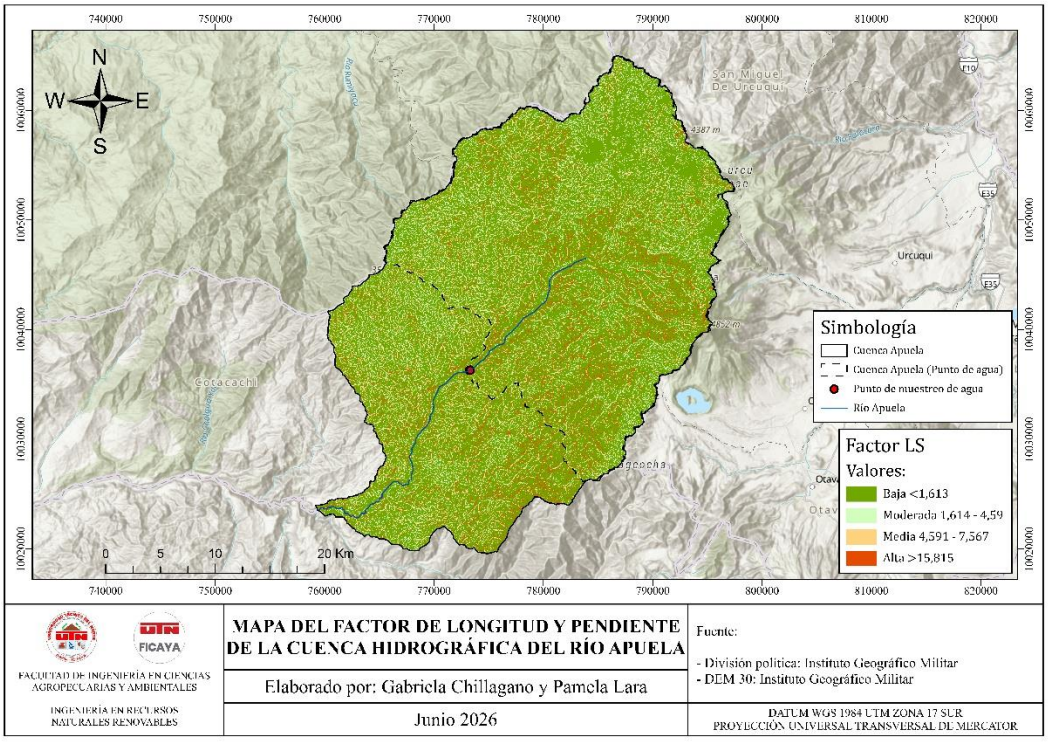

**Anexo 4.** Factor de erosividad de la cuenca hidrográfica del río Apuela



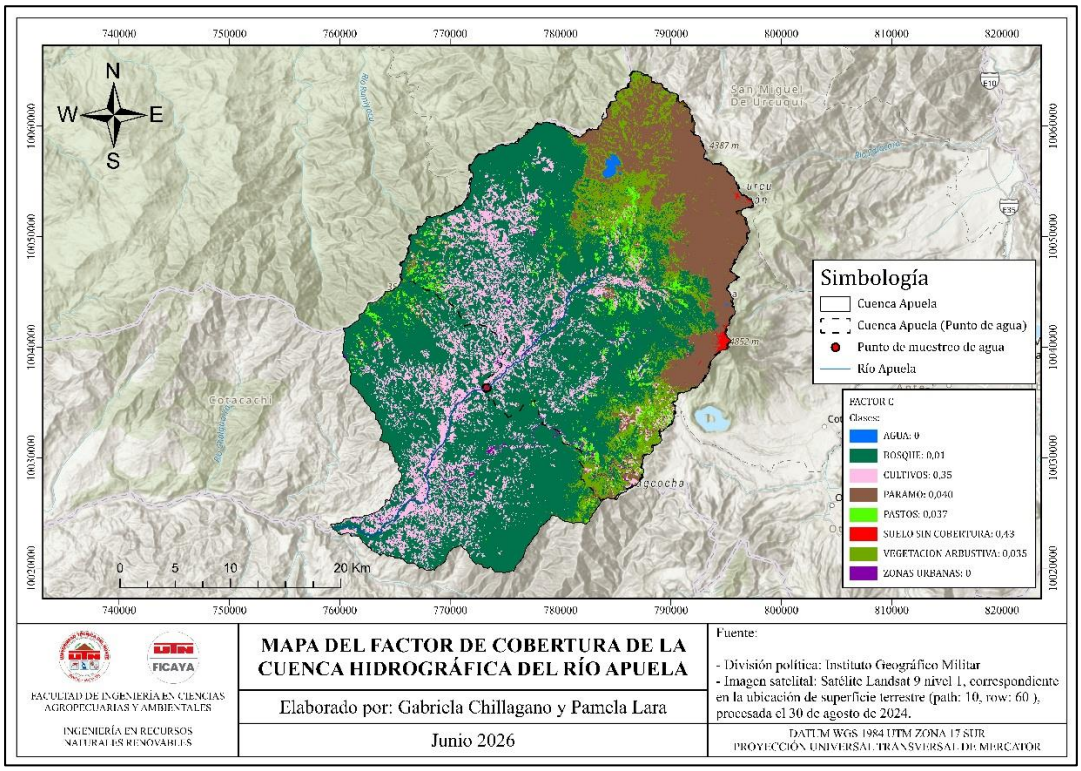
**Anexo 5.** Factor de erodabilidad de la cuenca hidrográfica del río Apuela



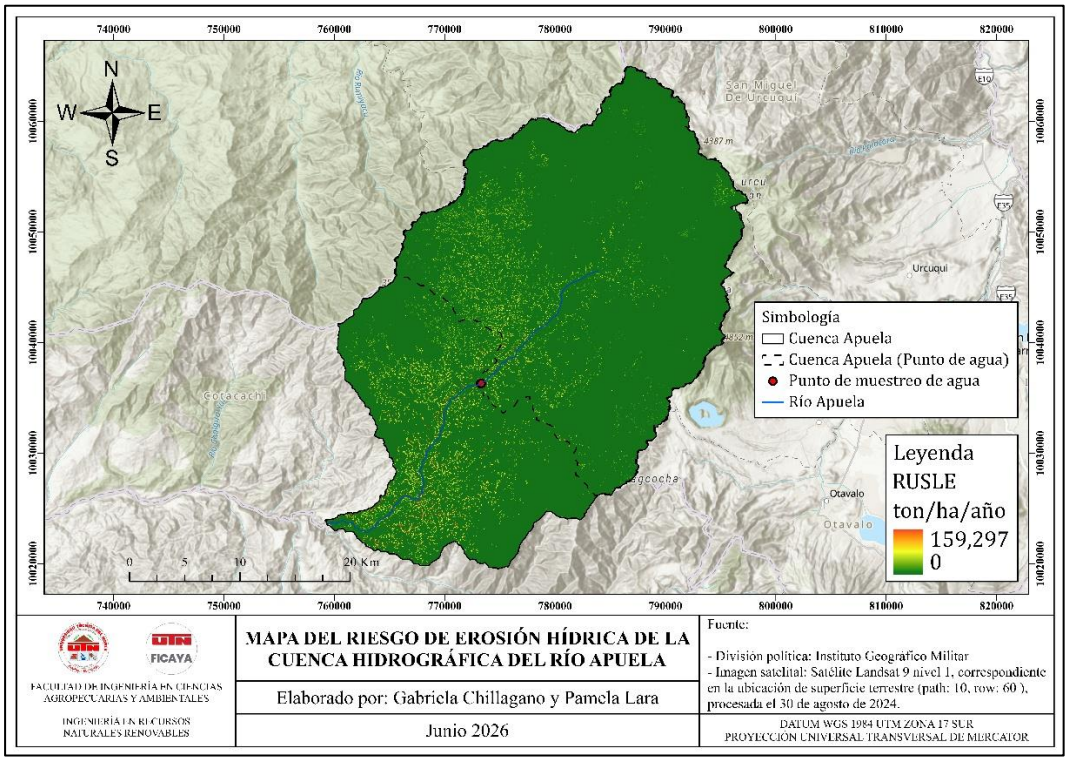

**Anexo 6.** Factor de longitud y pendiente de la cuenca hidrográfica del río Apuela



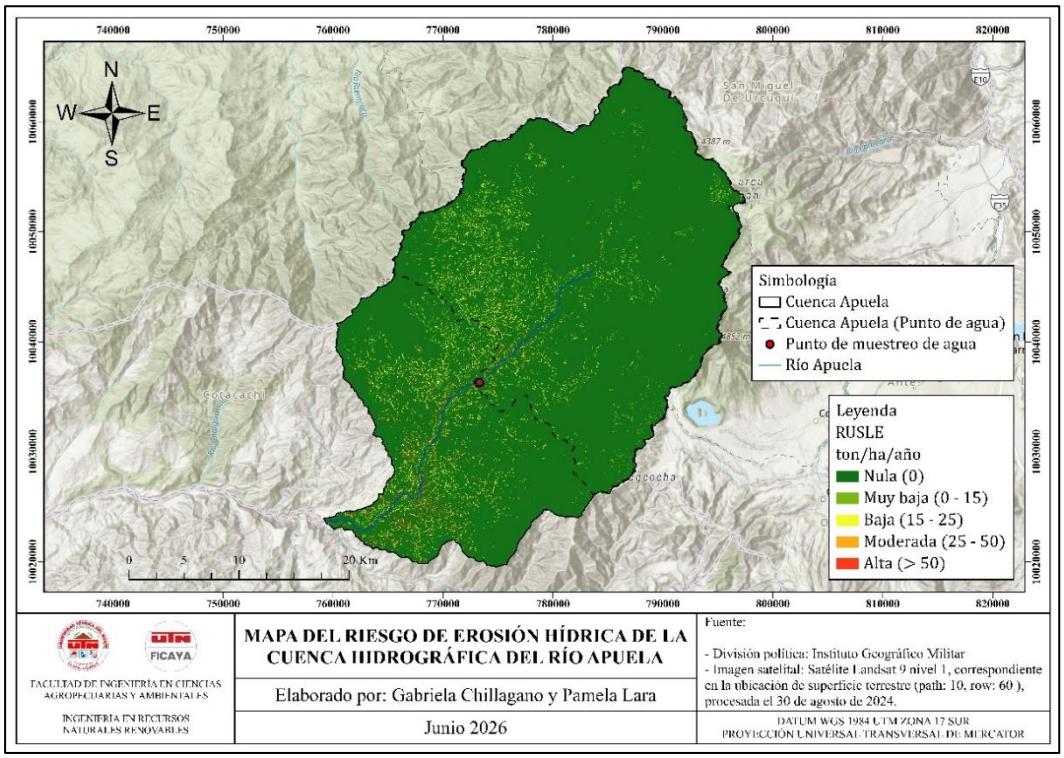
**Anexo 7.** Factor de cobertura de la cuenca hidrográfica del río Apuela



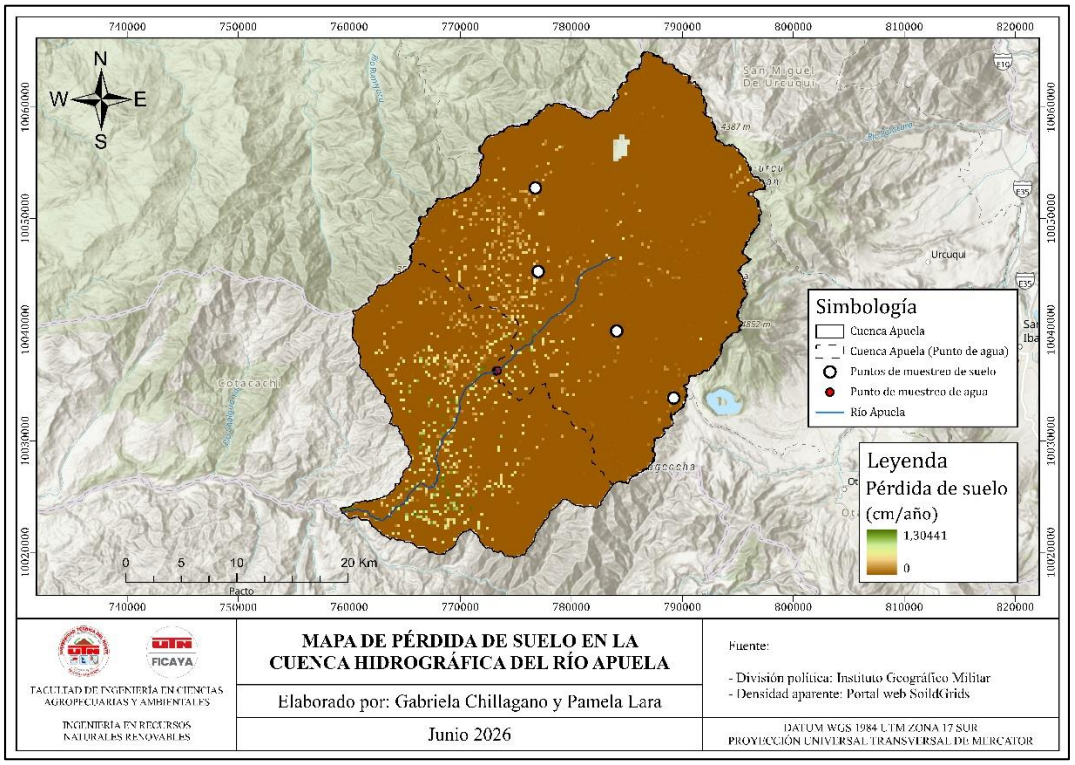

**Anexo 8.** Erosión hídrica en la cuenca del río Apuela



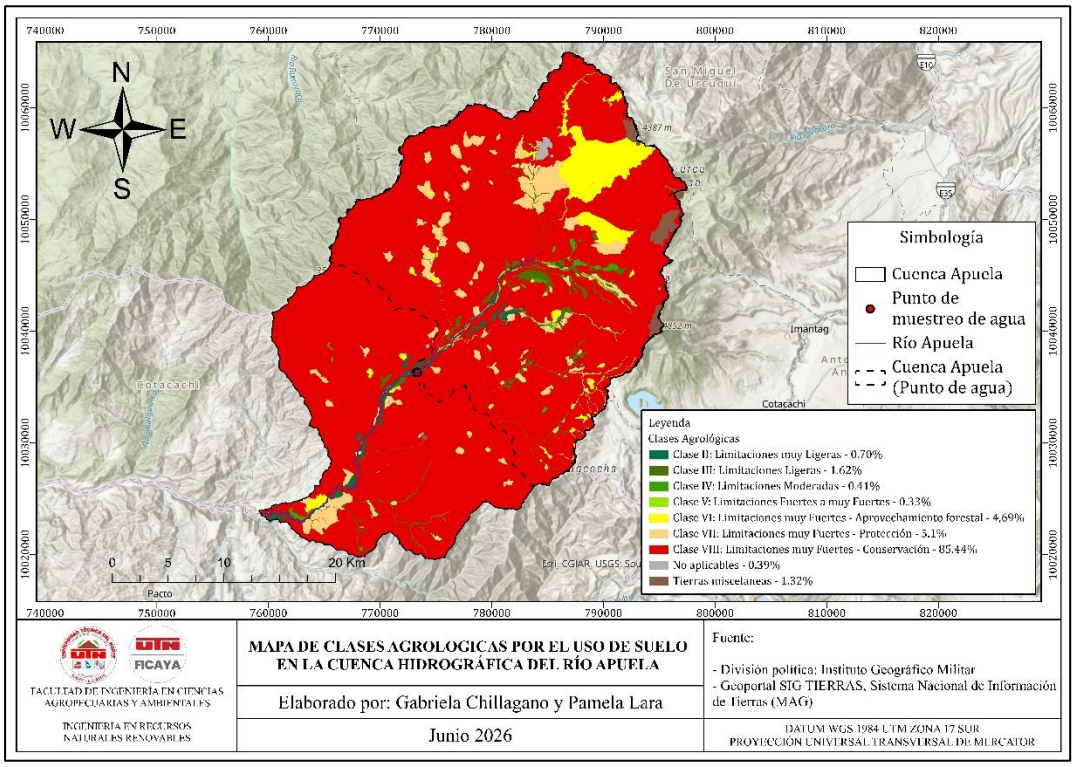
**Anexo 9.** Zonificación de la erosión hídrica en la cuenca del río Apuela



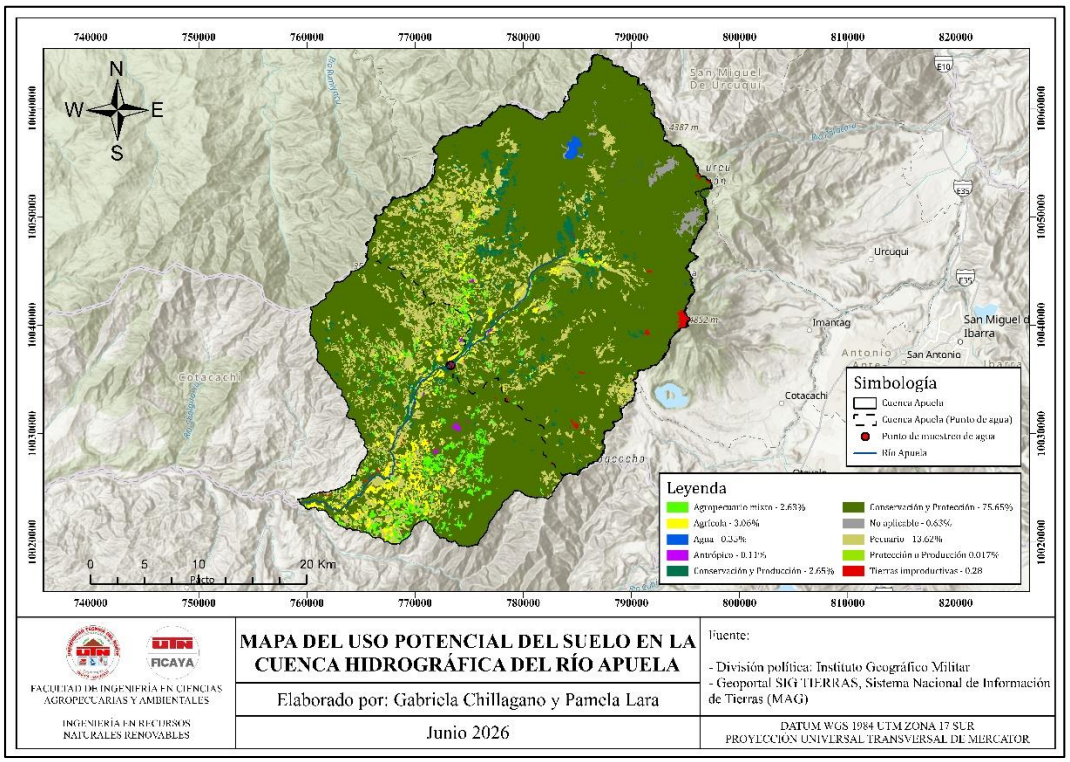

**Anexo 10.** Mapa de pérdida de suelo en la cuenca hidrográfica del río Apuela



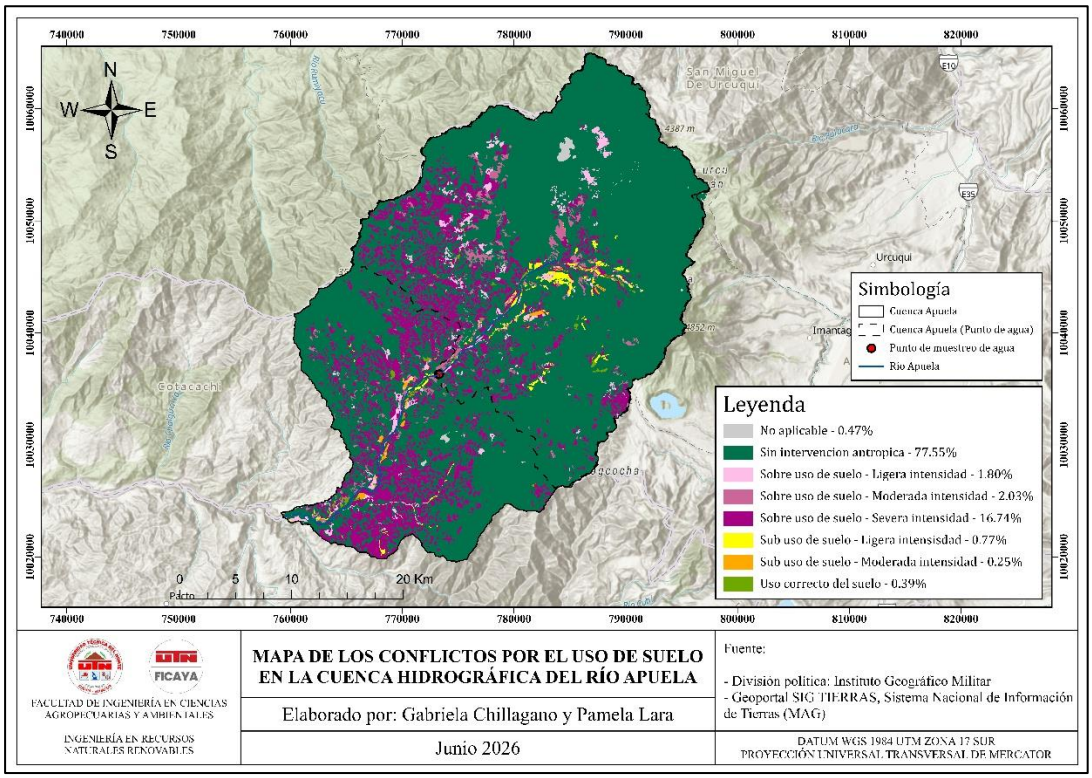
**Anexo 11.** Clases agrológicas de la cuenca del río Apuela



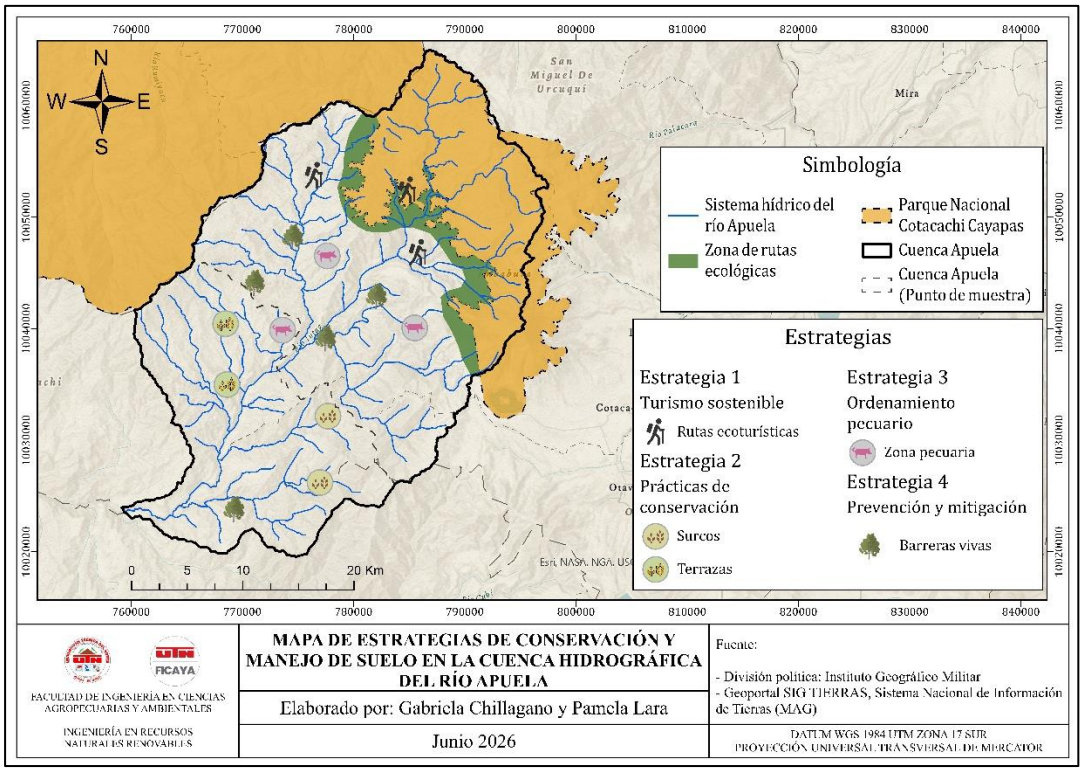

**Anexo 12.** Uso potencial del suelo de la cuenca del río Apuela



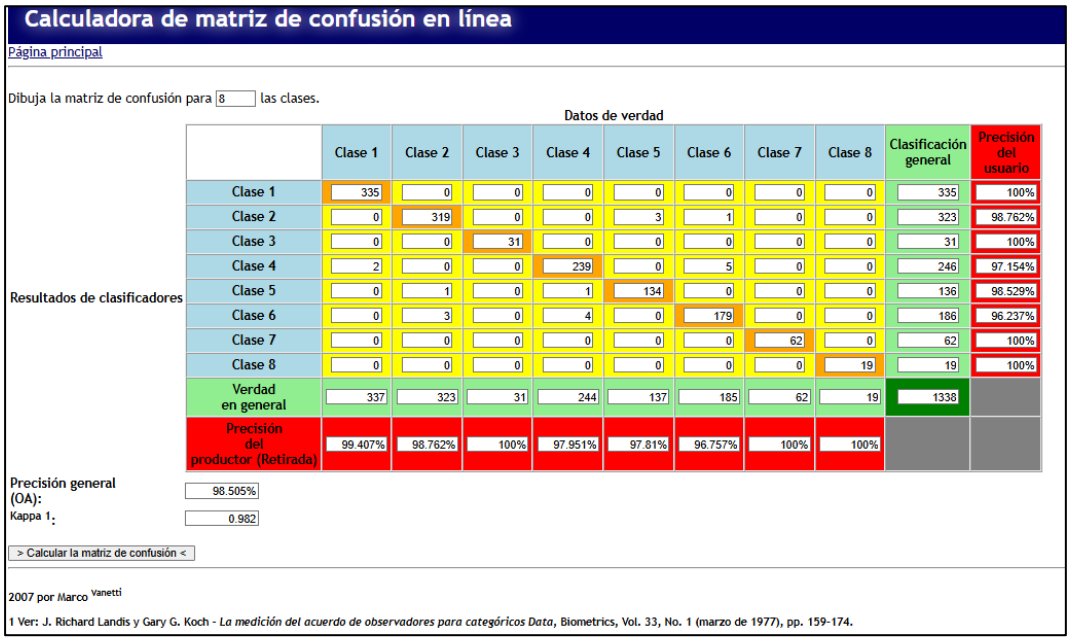
**Anexo 13.** Conflictos de uso de suelo de la cuenca del río Apuela




**Anexo 14.** Estrategias de conservación y manejo del suelo



**Anexo 15.** Matriz de confusión de Marco Vanetti e índice Kappa



Calculadora de matriz de confusión en línea

Página principal

Dibuja la matriz de confusión para 8 las clases.

Datos de verdad

| Resultados de clasificadores | Clase 1 | Clase 2 | Clase 3 | Clase 4 | Clase 5 | Clase 6 | Clase 7 | Clase 8 | Clasificación general | Precisión del usuario |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Clase 1 | 335 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 335 | 100% |
| Clase 2 | 0 | 319 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 | 323 | 98.762% |
| Clase 3 | 0 | 0 | 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 31 | 100% |
| Clase 4 | 2 | 0 | 0 | 239 | 0 | 5 | 0 | 0 | 246 | 97.154% |
| Clase 5 | 0 | 1 | 0 | 1 | 134 | 0 | 0 | 0 | 136 | 98.529% |
| Clase 6 | 0 | 3 | 0 | 4 | 0 | 179 | 0 | 0 | 186 | 96.237% |
| Clase 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 62 | 0 | 62 | 100% |
| Clase 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19 | 19 | 100% |
| Verdad en general | 337 | 323 | 31 | 244 | 137 | 185 | 62 | 19 | 1338 | |
| Precisión del productor (Retirada) | 99.407% | 98.762% | 100% | 97.951% | 97.81% | 96.757% | 100% | 100% | | |

Precisión general (OA): 98.505%

Kappa [1]: 0.982

> Calcular la matriz de confusión <

2007 por Marco Vanetti

1 Ver: J. Richard Landis y Gary G. Koch - *La medición del acuerdo de observadores para categóricos Data*, Biometrics, Vol. 33, No. 1 (marzo de 1977), pp. 159-174.

**Anexo 16.** Cálculo del PBIAS y RMSE para la validación del modelo RUSLE

| N° Muestra | SY Observado | SY Simulado | SY Observado-Sy Simulado | $(Syob-Sysim)^2$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.418 | 0.21 | 0.208 | 0.0433 |
| 2 | 0.232 | 0.21 | 0.022 | 0.0005 |
| 3 | 0.186 | 0.21 | -0.024 | 0.0006 |
| 4 | 0.186 | 0.21 | -0.024 | 0.0006 |
| 5 | 0.097 | 0.21 | -0.112 | 0.0125 |
| 6 | 0.139 | 0.21 | -0.07 | 0.0049 |
| 7 | 0.232 | 0.21 | 0.022 | 0.0005 |
| 8 | 0.186 | 0.21 | -0.024 | 0.0006 |
| 9 | 0.139 | 0.21 | -0.07 | 0.0049 |
| 10 | 0.139 | 0.21 | -0.07 | 0.0049 |
| 11 | 0.139 | 0.21 | -0.07 | 0.0049 |
| 12 | 0.139 | 0.21 | -0.07 | 0.0049 |
| PROMEDIO | 0.186 | 0.210 | -0.024 | |
| DESVEST | 0.080 | | | |
| | | | | |
| Pbias | -0.1271 | | | |
| Pbias (%) | -12.712 | | | |

**Anexo 17.** Cálculo del PBIAS y RMSE para la validación de la densidad aparente

| N° Muestra | Da Observado | Da Simulado | Da Observado-Da Simulado | (Daob-Dasim)$^2$ |
|---|---|---|---|---|
| **1** | 1.065 | 1.22 | -0.155 | 0.0240 |
| **2** | 1.153 | 1.25 | -0.097 | 0.0094 |
| **3** | 1.029 | 1.17 | -0.141 | 0.0199 |
| **4** | 1.102 | 1.22 | -0.118 | 0.0139 |
| **5** | 1.095 | 1.095 | 0 | 0.0000 |
| **SUMATORIA** | 5.444 | 5.955 | -0.511 | 0.067239 |
| **PROMEDIO** | 1.089 | | | |
| **DESVEST** | 0.041 | | | |
| | | | | |
| **Pbias** | -0.094 | | | |
| **Pbias (%)** | -9.386 | | | |

**Anexo 18.** Resultados del análisis de suelo

| Fecha ( Toma de la muestra) | Fecha ( Análisis laboratorio) | Muestra | Cilindro humedo (g) | Cilindro seco | Diámetro (cm) | h (cm) | Radio | Àrea (cm2) | Volumen (cm3) | Cilindro vacio | Suelo seco | Densidad (g/cm3) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 24-ene-26 | 14-abr-26 | CAL1CAM1-1 | 199.6 | 170.5 | 4.70 | 4.8 | 2.35 | 105.57 | 83.277 | 87.7 | 82.8 | 0.9943 |
| | | CAL1CAM1-2 | 221.4 | 183.3 | 4.7 | 5 | 2.35 | 108.53 | 86.747 | 86.2 | 97.1 | 11.193 |
| | | CAL1CAM1-3 | 216.3 | 173.7 | 4.7 | 4.9 | 2.35 | 107.05 | 85.012 | 85.8 | 87.9 | 10.340 |
| | | CAL1CAM1-4 | 224.1 | 187.9 | 4.80 | 5 | 2.40 | 111.59 | 90.478 | 87.1 | 100.8 | 11.141 |
| 25-ene-26 | 14-abr-26 | CAL2CAM2-1 | 216.6 | 185.2 | 4.80 | 4.95 | 2.40 | 110.84 | 89.573 | 88.9 | 96.3 | 10.751 |
| | | CAL2CAM2-2 | 220.3 | 187.5 | 4.75 | 5.05 | 2.38 | 110.80 | 89.489 | 88.1 | 99.4 | 11.108 |
| | | CAL2CAM2-3 | 232.9 | 206.5 | 4.80 | 5 | 2.40 | 111.59 | 90.478 | 87.7 | 118.8 | 13.130 |
| | | CAL2CAM2-4 | 208.1 | 182.7 | 4.70 | 5 | 2.35 | 108.53 | 86.747 | 86.3 | 96.4 | 11.113 |
| 24-ene-26 | 30-mar-26 | CAL1CMM1-1 | 230.3 | 190.9 | 4.75 | 5 | 2.38 | 110.05 | 88.603 | 87.5 | 103.4 | 11.670 |
| | | CAL1CMM1-2 | 217.7 | 176.8 | 4.80 | 5.1 | 2.40 | 113.10 | 92.287 | 85.3 | 91.5 | 0.9915 |
| | | CAL1CMM1-3 | 220.1 | 174.9 | 4.80 | 4.9 | 2.40 | 110.08 | 88.668 | 88.9 | 86 | 0.9699 |
| | | CAL1CMM1-4 | 222.8 | 173.2 | 4.70 | 5 | 2.35 | 108.53 | 86.747 | 87.6 | 85.6 | 0.9868 |
| 24-ene-26 | 30-mar-26 | CAL2CMM2-1 | 212.9 | 185.7 | 4.75 | 4.9 | 2.38 | 108.56 | 86.831 | 87.7 | 98 | 11.286 |
| | | CAL2CMM2-2 | 233.1 | 198.1 | 4.75 | 5 | 2.38 | 110.05 | 88.603 | 88.5 | 109.6 | 12.370 |
| | | CAL2CMM2-3 | 244.6 | 187.7 | 4.80 | 5.1 | 2.40 | 113.10 | 92.287 | 87.2 | 100.5 | 10.890 |
| | | CAL2CMM2-4 | 232.1 | 173.7 | 4.80 | 5.05 | 2.40 | 112.34 | 91.383 | 86.4 | 87.3 | 0.9553 |
| 24-ene-26 | 30-mar-26 | CAL3CMM3-1 | 226.1 | 176.5 | 4.80 | 5.05 | 2.40 | 112.34 | 91.383 | 87.1 | 89.4 | 0.9783 |
| | | CAL3CMM3-2 | 239.5 | 184.9 | 4.80 | 5 | 2.40 | 111.59 | 90.478 | 88.1 | 96.8 | 10.699 |
| | | CAL3CMM3-3 | 215.5 | 198.6 | 4.80 | 5 | 2.40 | 111.59 | 90.478 | 86.9 | 111.7 | 12.346 |
| | | CAL3CMM3-4 | 209.7 | 187.1 | 4.80 | 5 | 2.40 | 111.59 | 90.478 | 87.9 | 99.2 | 10.964 |
| 7-nov-25 | 14-abr-26 | CAL1CBM1-1 | 247.7 | 217.6 | 4.80 | 4.9 | 2.40 | 110.08 | 88.668 | 87.2 | 130.4 | 14.707 |
| | | CAL1CBM1-2 | 227.9 | 201.3 | 4.70 | 5 | 2.35 | 108.53 | 86.747 | 86.6 | 114.7 | 13.222 |
| | | CAL1CBM1-3 | 239.3 | 208.8 | 4.75 | 4.9 | 2.38 | 108.56 | 86.831 | 85.6 | 123.2 | 14.189 |
| | | CAL1CBM1-4 | 234.4 | 207.2 | 4.75 | 5.1 | 2.38 | 111.55 | 90.375 | 88.1 | 119.1 | 13.178 |
| 7-nov-25 | 14-abr-26 | CAL2CBM2-1 | 213.8 | 196.2 | 4.80 | 5 | 2.40 | 111.59 | 90.478 | 87 | 109.2 | 12.069 |
| | | CAL2CBM2-2 | 220.1 | 204.8 | 4.80 | 5.05 | 2.40 | 112.34 | 91.383 | 87.7 | 117.1 | 12.814 |
| | | CAL2CBM2-3 | 199.6 | 185.9 | 4.80 | 5 | 2.40 | 111.59 | 90.478 | 87.2 | 98.7 | 10.909 |
| 7-nov-25 | 14-abr-26 | CAL3CBM3-1 | 235.8 | 196.2 | 4.80 | 5.1 | 2.40 | 113.10 | 92.287 | 88.1 | 108.1 | 11.713 |
| | | CAL3CBM3-2 | 226.4 | 189.6 | 4.80 | 5.05 | 2.40 | 112.34 | 91.383 | 87.3 | 102.3 | 11.195 |
| | | CAL3CBM3-3 | 217.2 | 184.9 | 4.80 | 5 | 2.40 | 111.59 | 90.478 | 86.9 | 98 | 10.831 |
| | | CAL3CBM3-4 | 192.9 | 163 | 4.80 | 4.9 | 2.40 | 110.08 | 88.668 | 85.4 | 77.6 | 0.8752 |
| | | | | | | | | | | | | 11.334 |

**Anexo 19.** Resultados del análisis de agua

| LABORATORIO | | | | | | GIS | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N° Muestra | Caudal (m3/s) | Superficie cuenca (ha) | Sedimentos en Suspensión (kg/s) | Sedimentos en Suspensión (ton/año) | Sedimentos en Suspensión (ton/ha/año) | SDR SDR=0.5656 *S^-0.11 | A (Valor promedio RUSLE) ton/ha/año | SY SY=A*SDR (ton/ha/año) |
| 1 | 15.108 | 68415.573 | 0.906 | 28586.753 | 0.418 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.906 | 28586.753 | 0.418 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.906 | 28586.753 | 0.418 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| 2 | 15.108 | 68415.573 | 0.604 | 19057.836 | 0.279 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.604 | 19057.836 | 0.279 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| 3 | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.604 | 19057.836 | 0.279 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| 4 | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.604 | 19057.836 | 0.279 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| 5 | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.03 | 952.892 | 0.014 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| 6 | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| 7 | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.604 | 19057.836 | 0.279 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.604 | 19057.836 | 0.279 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| 8 | 15.108 | 68415.573 | 0.604 | 19057.836 | 0.279 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| 9 | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| 10 | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| 11 | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| 12 | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |
| | 15.108 | 68415.573 | 0.302 | 9528.918 | 0.139 | 0.166 | 1.262 | 0.21 |

**Anexo 20.** Análisis de la textura de suelo de la cuenca hidrográfica del río Apuela

**LABONORT**

LABORATORIOS NORTE

Juan Hernández y Jaime Roldos (M.Mayorista) Ibarra-Ecuador. Telf. cel. 099959105

**REPORTE DE ANÁLISIS DE SUELO**

**NOMBRE:** GABRIELA CHILLAGANO
**MUESTRA:** SUELOS
**ANÁLISIS:** TEXTURA
**REPORTE:** 12517 -18 -19
**FECHA:** 2026 01 30
**SITIO:** IMBABURA- COTACACHI - CUENCA RÍO APUELA

**RESULTADOS**

| REPORTE | N. CAMPO | % ARENA | %LIMO | %ARCILLA | CLASE TEXTURAL |
|---|---|---|---|---|---|
| 12517 | CUENCA BAJA | 57,6 | 31,0 | 11,4 | Franco arenoso |
| 12518 | CUENCA MEDIA | 59,6 | 32,0 | 8,4 | Franco arenoso |
| 12519 | CUENCA ALTA | 57,6 | 34,0 | 8,4 | Franco arenoso |

**Método: Análisis granulométrico por densimetría con hidrómetro de Bouyoucos.**

EDISON MIÑO M.

**Dr.Quim. Edison M. Miño M.**
**RESPONSABLE DE LABONORT**

LABORATORIOS NORTE
LABONORT
IBARRA - ECUADOR
ANALIS QUÍMICOS SUELOS Y AGUAS

**Anexo 21. Fotografías de salidas a campo**






***Descripción:*** *Colecta de muestras de suelo durante el estudio*



***Descripción:*** *Colecta de muestras de agua durante el estudio*