UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

TEMA:

MODELAMIENTO DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO PIGUCHUELA

PLAN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

AUTORA:

Moya Pastaz Kelly Zamira

DIRECTOR:

Ing. Oscar Armando Rosales Enríquez, MSc.

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, hacemos la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual ponemos a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES	Moya Pastaz Kelly Zamira

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	MODELAMIENTO DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO PIGUCHUELA
AUTORA:	Moya Pastaz Kelly Zamira
FECHA:	30/06/ 2026
PROGRAMA:	■ PREGRADO ☐ POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera en Recursos Naturales Renovables
DIRECTOR:	MSc. Oscar Armando Rosales Enríquez
ASESOR:	PhD. Dario Paul Arias Muñoz

2. CONSTANCIAS

La autora 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 es 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 30 días del mes de junio de 2026

La autora

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
KELLY ZAMIRA MOYA PASTAZ

Moya Pastaz Kelly Zamira
100432550-0

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente que el presente trabajo fue desarrollado por la señorita Moya Pastaz Kelly Zamira, con cédula de identidad Nro. 100432550-0, bajo mi supervisión en calidad de director.



MSc. Oscar Armando Rosales Enríquez
DIRECTOR

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Técnica del Norte, por abrirme sus puertas y regalarme los mejores cuatro años de mi vida. Agradezco cada experiencia, enseñanza y oportunidad que me permitieron crecer en el ámbito académico y personal. En sus aulas encontré conocimiento, felicidad y amistades que dejaron una huella en mi existencia. Allí conocí personas increíbles que fueron testigos de mis logros, mis alegrías y de mis días tristes, acompañándome en cada etapa de este camino.

Mi agradecimiento infinito a mi director de tesis y querido profesor, MSc. Oscar Armando Rosales Enríquez, y a mi asesor, PhD. Darío Paul Arias Muñoz, por su guía, dedicación y apoyo incondicional durante este proceso. Gracias por no dejarme sola y enseñarme que mientras este viva, siempre puedo volverlo a intentar, aprender de cada experiencia y crecer en el camino. Su paciencia, confianza y compromiso fueron fundamentales para alcanzar esta meta. Más que profesores, se convirtieron en personas que marcaron mi vida.

A mi TEAM de la universidad, gracias por quedarse, por escucharme, por creer en mí incluso cuando yo dudaba y por nunca dar nada por sentado y demostrarme su cariño y ternura. Su compañía en los viajes, las largas jornadas académicas, las risas compartidas y cada una de sus bromas fueron un rayo de sol que iluminó mis días. Gracias por transformar el estrés en motivación y por hacer de este recorrido una experiencia mucho más llevadera.

De manera especial, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis amigos y familiares que me acompañaron durante la fase de campo de esta investigación. Gracias por dedicar su tiempo, esfuerzo y apoyo para que este proyecto pudiera llevarse a cabo. Sé que cada jornada, cada recorrido y cada momento compartido representó un sacrificio y una muestra de cariño hacia mis sueños y metas. Siempre recordaré con gratitud el compromiso, la paciencia y el entusiasmo con los que me acompañaron en esta etapa tan importante de mi vida académica.

Agradezco a todos los momentos vividos fuera de las aulas. Esas escapadas, aventuras y experiencias me permitieron descubrir nuevas versiones de mí misma y enamorarme una vez más de mi vida. Para mí, la universidad fue un espacio de crecimiento, amistad, amor, paciencia y valiosas lecciones de vida que guardaré en mi corazón y las canciones de Zoé que fueron una caricia al alma.

Kelly Zamira Moya Pastaz

DEDICATORIA

Al final, somos una mezcla de todas las personas que han sido parte de nuestro camino. De cada abrazo, cada consejo, cada risa y cada momento compartido. Y hoy, mirando hacia atrás, me llena el corazón saber que muchas de esas personas son parte esencial de quien soy.

Dedico este trabajo a una mujer fuerte, decidida e inteligente: mi mamita, Verónica Pastaz. Gracias por enseñarme que los límites muchas veces solo existen en los pensamientos que nos imponemos a nosotros mismos. Gracias por impulsarme a soñar en grande y por recordarme siempre que era capaz de lograr todo aquello que me propusiera. Te amo infinitamente y espero que este logro te haga tan feliz como me hace a mí.

A mi familia, gracias por ser mi lugar seguro, mi refugio y mi fuerza en los momentos más difíciles. Gracias por sostenerme cuando sentía que ya no podía más, por acompañarme en cada paso y por celebrar conmigo cada pequeña victoria. Nada de esto habría sido posible sin ustedes. Este logro también les pertenece.

Finalmente, a mí. Porque hubo días en los que sentí que ya no podía más, pero aun así encontré la fuerza para seguir. Porque fui valiente incluso cuando tenía miedo, Espero nunca perder esa capacidad de seguir intentándolo, de apostar por mí y de perseguir aquello que me hace feliz. Que la mujer que soy hoy siempre recuerde que fue capaz de llegar hasta aquí, y que la paz, la felicidad y el amor propio sean siempre el lugar al que regrese, sin importar qué tan lejos me lleve la vida.

Kelly Zamira Moya Pastaz

ÍNDICE DE CONTENIDO

Contenido **Pág.**

CAPÍTULO I 1

INTRODUCCIÓN 1

1.1. Antecedentes del estudio 1

1.2. Problema de investigación y justificación 2

1.3. Objetivos 3

1.3.1. Objetivo general 3

1.3.2. Objetivos específicos 3

1.3.3. Preguntas directrices de la investigación 4

CAPÍTULO II 5

MARCO TEÓRICO 5

2. Revisión de literatura 5

2.1. Erosión del suelo 5

2.2. Erosión hídrica del suelo 6

2.3. Modelos de erosión del suelo 7

2.3.1. Modelo RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) 8

2.3.2. Modelo USLE (Universal Soil Loss Equation) 8

2.4. Estimación de sedimentos en cuencas hidrográficas 9

2.5. Marco legal 9

CAPÍTULO III 12

MATERIALES Y MÉTODOS 12

3.1. Descripción del área de estudio 12

3.2. Morfometría de la microcuenca del río Piguchuela 13

3.2.1. Edafología del suelo 15

3.3. Métodos 16

3.3.1. Cálculo de la Pérdida de Suelo por Erosión Hídrica 17

3.3.2. Determinación factor R 17

3.3.3. Determinación del factor K 18

3.3.4. Determinación del factor LS 20

3.3.5. Determinación del factor C 20

3.3.6. Factor P 21

3.3.7. Validación modelo RUSLE 21

3.3.8. Puntos de muestreo y análisis de laboratorio 23

3.3.9. Evaluación del Riesgo de Erosión 25

3.4. Estrategias de manejo de conservación 26

3.5. Materiales y equipos 27

CAPÍTULO IV 28

RESULTADOS Y DISCUSIÓN 28

4.1. Zonificación del riesgo de erosión hídrica y determinación de la pérdida de suelo 28

4.1.1. Factor R 28

4.1.2. Factor K 28

4.1.3. Factor LS 30

4.1.4. Factor C 30

4.2. Validación del modelo RUSLE 32

4.3. Discusiones 33

4.4. Prácticas de conservación del suelo para mitigar áreas vulnerables a la erosión hídrica 36

4.4.1. Análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas 39

4.4.2. Diseño de estrategias 40

4.4.2.1. Estrategia 1: Promover la reforestación y sistemas agroforestales en zonas con pendientes pronunciadas para disminuir la erosión y degradación del suelo 41

4.4.2.2. Estrategia 2: Implementar prácticas de conservación y manejo sostenible para disminuir la degradación ambiental y la pérdida de fertilidad causada por la sobreutilización del suelo 42

4.4.2.3. Estrategia 3: Controlar el uso inadecuado de las tierras Clase VIII para evitar procesos de erosión, sedimentación y deterioro de la calidad del agua del río Piguchuela 44

4.5. Socialización de las medidas de conservación con actores locales 45

CAPÍTULO V 47

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 47

5.1. Conclusiones 47

5.2. Recomendaciones 48

Referencias 49

Anexos 55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla **Pág.**

Tabla 1. Límites de la cuenca hidrográfica del río Piguchuela WGS-84 UTM 17S..... 13
Tabla 2. Parámetros morfométricos y caracterización física de la cuenca Piguchuela.. 14
Tabla 3. Valores del factor C..... 20
Tabla 4. Categorías de erosión..... 25
Tabla 5. Materiales, equipos e insumos empleados en la investigación..... 27
Tabla 7. Sedimentos Suspendidos (ton/ha/año)..... 33
Tabla 8. Matriz FODA..... 39
Tabla 9. Matriz de estrategias FA, FO, DO, DA derivadas del análisis FODA de la microcuenca del rio Piguchuela..... 40
Tabla 10. Tabla operativa para la ejecución de la estrategia 1..... 41
Tabla 11. Tabla operativa para la ejecución de la estrategia 2..... 43
Tabla 12. Tabla operativa para la ejecución de la estrategia 3..... 44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura **Pág.**

Figura 1. Marco Legal en el que se sustenta la tesis 11
Figura 2. Ubicación microcuenca río Piguchuela..... 12
Figura 3. Textura del suelo de la cuenca del río Piguchela 16
Figura 4. Puntos de muestreo 23
Figura 5. Investigadora recolectando muestras de agua..... 25
Figura 6. Factores modelo RUSLE 29
Figura 7. Erosión hídrica de la microcuenca de Piguchuela 32
Figura 8. Clases agrológicas de la microcuenca del río Piguchuela..... 36
Figura 9. Conflictos de uso de suelo 38
Figura 10. Puntos de ubicación de la estrategia de reforestación..... 42
Figura 11. Puntos de ubicación para estrategia 2 43
Figura 12. Puntos de ubicación de la estrategia 3 45

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

MODELAMIENTO DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO PIGUCHUELA

Trabajo de Titulación

Moya Pastaz Kelly Zamira

RESUMEN

La erosión hídrica es uno de los principales procesos de degradación del suelo, afecta la productividad agrícola, la calidad de los recursos hídricos y la estabilidad de los ecosistemas. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el riesgo de erosión hídrica en la microcuenca del río Piguchuela, ubicada en la provincia de Imbabura, mediante la aplicación del modelo RUSLE integrado con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Para la estimación de la pérdida potencial de suelo se consideraron los factores de erosividad de la lluvia (R), erodabilidad del suelo (K), longitud e inclinación de la pendiente (LS), cobertura y manejo del suelo (C) y prácticas de conservación (P). Se realizaron análisis de laboratorio para determinar propiedades físicas del suelo, como textura, materia orgánica y densidad aparente, y se validó el modelo mediante el análisis de sedimentos suspendidos en la microcuenca. Los resultados demostraron la presencia de distribución espacial de la erosión hídrica, predominando áreas con erosión muy baja a nula (0–15 ton/ha/año), por la presencia de cobertura vegetal y pendientes suaves. Sin embargo, se identificaron sectores con erosión alta (>50 ton/ha/año), en zonas con pendientes pronunciadas, menor cobertura vegetal y mayor susceptibilidad edáfica. La validación del modelo presentó un porcentaje de sesgo (PBIAS) de -6.98 %, que demuestra un ajuste adecuado entre los datos observados y simulados. Con base en la zonificación del riesgo de erosión y el análisis de capacidad de uso del suelo, se propuso estrategias de conservación orientadas a la reforestación con especies nativas, implementación de sistemas agroforestales, establecimiento de barreras vivas, terrazas y prácticas de manejo sostenible. Se concluye que el modelo RUSLE es una herramienta confiable para identificar áreas vulnerables a la erosión hídrica y apoyar la planificación de medidas de conservación del suelo y gestión de los recursos naturales en la microcuenca del río Piguchuela.

Palabras clave: erosión hídrica, RUSLE, SIG, conservación del suelo, microcuenca del río Piguchuela, sedimentos suspendidos

ABSTRACT

Water erosion is one of the main processes of soil degradation, affecting agricultural productivity, water resource quality, and ecosystem stability. The objective of this study was to assess the risk of water erosion in the Piguchuela River micro-watershed, located in Imbabura Province, Ecuador, through the application of the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model integrated with Geographic Information System (GIS) tools. To estimate potential soil loss, the rainfall erosivity (R), soil erodibility (K), slope length and steepness (LS), cover-management (C), and conservation practice (P) factors were considered. Laboratory analyses were conducted to determine soil physical properties, including texture, organic matter content, and bulk density. The model was validated through the analysis of suspended sediments within the micro-watershed. The results demonstrated a spatial distribution of water erosion, with areas of very low to null erosion (0–15 t ha^{-1} yr^{-1}) predominating due to the presence of vegetation cover and gentle slopes. However, areas with high erosion rates (>50 t ha^{-1} yr^{-1}) were identified in zones characterized by steep slopes, lower vegetation cover, and greater soil susceptibility to erosion. Model validation yielded a Percent Bias (PBIAS) value of −6.98%, indicating a satisfactory agreement between observed and simulated data. Based on the erosion risk zoning and land-use capability analysis, conservation strategies were proposed, including reforestation with native species, implementation of agroforestry systems, establishment of live barriers, terracing, and sustainable land management practices. It is concluded that the RUSLE model is a reliable tool for identifying areas vulnerable to water erosion and supporting the planning of soil conservation measures and natural resource management within the Piguchuela River micro-watershed.

Keywords: water erosion, RUSLE, GIS, soil conservation, Piguchuela River micro-watershed, suspended sediments.

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes del estudio

La erosión del suelo ha transformado de manera natural el relieve terrestre mediante el desgaste y transporte de material superficial (Stallard, 1995). Este proceso actúa de forma continua en todos los territorios, con una intensidad variable que depende del clima, la cobertura vegetal y la topografía del terreno, dando lugar a cañones, mesetas y valles que, en milenios han aportado al depósito de sedimentos y a la formación del suelo (Lambin, 1997; Xiaoping, y Eitel, 2016). La erosión del suelo es una problemática ambiental, ya que contamina los cuerpos de agua y reduce la productividad del suelo debido al arrastre de nutrientes, el desprendimiento de sedimentos y la disgregación de material particulado (Issaka , y Ashraf, 2017). Woldemariam et al. (2023) señalan que las prácticas antrópicas inadecuadas han acelerado las tasas de pérdida de suelo a diferentes escalas, superando las tasas naturales de formación.

Durante el siglo XX se reportó que las tasas de erosión del suelo en Estados Unidos, China e India fueron entre 10 y 40 veces superiores a las tasas normales de erosión, contribuyendo a que el 85 % de la degradación de los suelos a nivel mundial estuviera asociada a este fenómeno presentando una reducción del 17 % en la productividad de los cultivos (Jahun et al., 2015). Xiong et al. (2018) señalan que la erosión del suelo puede reducirse hasta niveles aceptables al establecer prácticas de conservación que modifican los procesos erosivos. Echavarría (2020) y Casas et al. (2022) sostienen que evaluar su impacto requiere cálculos rigurosos que desarrollen estrategias de conservación efectivas. Para comprender los procesos que influyen en la erosión y cuantificar las pérdidas de suelo, se han desarrollado diversos estudios basados en modelos matemáticos que difieren en sus requerimientos de información, variables de entrada e insumos (Pijl et al., 2020).

En Túnez, Serbaji et al. (2023) evaluaron el riesgo regional de erosión utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) para crear un mapa de riesgo e identificar áreas vulnerables. El modelo RUSLE consideró factores como la erodibilidad de los suelos, la topografía, el uso del suelo, la erosividad de las lluvias y las prácticas antierosivas, aplicando el software ArcGIS. Mostraron que el 6.43% del área presentaba una pérdida de suelo muy alta (>30 ton/ha/año) y el 4.20% tenía pérdidas medias altas (20-30 ton/ha/año), principalmente en el suroeste, centro y oeste. La

cartografía de erosión sirvió como apoyo para mejorar la gestión de la tierra y desarrollar estrategias de control de la erosión.

Casanova et al. (2024) establecieron programas de mitigación frente a la erosión al destacar la importancia de la producción de sedimentos por erosión hídrica. Estimaron los volúmenes de sedimentos en las cuencas de Manabí mediante el modelo RUSLE y datos satelitales. Se mostraron tasas de erosión entre 0.10 y 3252.22 ton/ha, y estimaciones de sedimentos entre 0.06 y 692.43 m^3/año. La densidad aparente promedio del suelo fue de 1.49 ton/m^3, con un alto contenido de arena. La validación mostró una excelente compatibilidad con el análisis convencional, con una diferencia promedio inferior al 3%. Arias-Muñoz et al. (2023) cuantificaron la distribución de la erosión hídrica en la cuenca media-alta del río Mira, Ecuador, utilizando el modelo RUSLE en un entorno SIG. Demostraron que la erosión varió entre 0 y 812.30 ton/ha/año, con un promedio de 32.79 ton/ha/año.

1.2. Problema de investigación y justificación

La erosión hídrica es un problema ambiental que transforma el relieve terrestre y modifica el paisaje. Este proceso se intensifica debido a las actividades antrópicas asociadas al uso inadecuado del suelo, lo que ocasiona el deterioro de la estabilidad y productividad de los ecosistemas. En la microcuenca del río Piguchuela, el crecimiento poblacional, la deforestación y la expansión de la frontera agrícola se han convertido en factores que favorecen la erosión del suelo, incrementando la producción de sedimentos. Como consecuencia, se deteriora la calidad de los cuerpos de agua y se reduce la capacidad de los ecosistemas para proveer bienes y servicios ecosistémico.

La vulnerabilidad del suelo en la microcuenca del río Piguchuela incrementa al estar asociada a actividades de labranza excesiva, pastoreo y uso de cultivos en laderas sin control de erosión lo que está llevando al suelo de este sector la degradación. La escorrentía superficial se incrementa debido a la deforestación y a las prácticas inadecuadas de uso y manejo del suelo lo que favorecen el desprendimiento y transporte de partículas sedimentarias, facilitando su deposición en los cuerpos de agua. La limitación de información de la microcuenca el río Piguchuela sobre los procesos erosivos y la dinámica espacial de la erosión dificulta la implementación de estrategias de manejo sostenibles y eficientes, restringiendo el diseño de medidas preventivas adecuadas y limita la toma de decisiones para la gestión del recurso suelo.

Ante esta problemática, resulta necesaria una evaluación detallada de las tasas de erosión, los factores que impulsan este proceso y las áreas con mayor vulnerabilidad dentro de la microcuenca del río Piguchuela. Esta información permitirá diseñar estrategias de manejo y conservación del suelo adaptadas a las características biofísicas y socioambientales de la cuenca. Actualmente, la microcuenca enfrenta prácticas agrícolas inadecuadas que generan presión sobre los servicios ecosistémicos. Esta situación, sumada a la limitada implementación de políticas orientadas al manejo sostenible del suelo, dificulta la gestión de los recursos naturales. Como consecuencia, la erosión hídrica ha contribuido a la disminución de la productividad agrícola, al incremento de la sedimentación en los cuerpos de agua y al deterioro de su calidad, generando riesgos para la biodiversidad local.

El modelamiento de la erosión hídrica mediante la aplicación del modelo RUSLE permitirá estimar las pérdidas potenciales de suelo e identificar las áreas críticas de erosión dentro de la microcuenca. Los resultados se convertirán en una base técnica para la formulación de estrategias de conservación y manejo sostenible del suelo, orientadas a reducir los procesos erosivos y promover el uso sostenible de los recursos naturales. El estudio proporcionará estrategias e insumos para la toma de decisiones a nivel local, facilitando la implementación de prácticas de manejo sostenible, programas de reforestación y restauración de áreas degradadas, contribuyendo a la mejora de la calidad ambiental de la región.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el riesgo de la erosión hídrica en la microcuenca del río Piguchuela con el fin de proponer estrategias de conservación del suelo.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar la pérdida de suelo causada por erosión hídrica en la microcuenca del río Piguchuela.
- Zonificar el riesgo de erosión hídrica en la microcuenca del río Piguchuela.
- Proponer estrategias de conservación del suelo para mitigar los efectos de erosión hídrica en la microcuenca del río Piguchuela.

1.3.3. Preguntas directrices de la investigación

- ¿Cuál es la pérdida de suelo causada por erosión hídrica de la microcuenca del río Piguchuela?
- ¿Cuáles son las áreas más susceptibles a la erosión hídrica en la microcuenca del río Piguchuela?
- ¿Cuál es el factor climático o edáfico que incrementan la erosión hídrica en la microcuenca del río Piguchuela?

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2. Revisión de literatura

2.1. Erosión del suelo

La erosión del suelo es un problema ambiental que amenaza la supervivencia terrestre restringiendo el desarrollo socioeconómico sostenible a nivel mundial (Igwe et al., 2017). La influencia de diversas actividades antrópicas en los procesos naturales de erosión, aumentan las tasas de pérdida de suelo, alterando el paisaje (Borrelli et al., 2021). La regeneración del suelo se ve reducida por la actividad agrícola, actividades industriales y el sobrepastoreo (Huerta et al., 2018). A nivel mundial, se estima que alrededor del 40 % de los suelos ha sufrido procesos de degradación en mayor o menor medida (Cotler et al., 2020).

Las propiedades biológicas, físicas y químicas del suelo se ven afectadas al disminuir la concentración de nutrientes, provocando una reducción en la producción agrícola (Lal, 2008; Cotler et al. 2020). La acción del agua y del viento altera la estructura del suelo al remover su capa superficial fértil. Este proceso se intensifica al disminuir la cobertura vegetal, reduciendo la capacidad de regeneración natural del suelo (Amundson et al., 2015). El desprendimiento de partículas del suelo se produce por el impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie o por la velocidad con la que se desplaza el viento, lo que provoca el transporte de sedimentos hacia los drenajes de la cuenca (Hairsine y Rose, 1991).

El transporte de sedimentos es directamente proporcional a la capacidad de los agentes erosivos para desprender y movilizar partículas del suelo, incrementándose bajo condiciones favorables como lluvias intensas, pendientes pronunciadas y determinadas propiedades intrínsecas del suelo, entre ellas la textura, la estructura y el contenido de materia orgánica (Arias-Muñoz et al., 2023). La intensificación de los procesos erosivos genera pérdidas económicas tanto para los agricultores como para la sociedad en general, debido a la disminución de la productividad del suelo y a los costos asociados con la degradación del suelo (Igwe et al., 2017).

2.2. Erosión hídrica del suelo

El agua pone en riesgo el sistema productivo del suelo al arrastrar partículas, lo que genera impactos ambientales significativos y elevados costos económicos en las cuencas hidrográficas (Weldeslassie et al., 2017). Sus efectos sobre la calidad del agua y la infraestructura amenazan la seguridad alimentaria y representan un obstáculo para el desarrollo sustentable (Nájera et al., 2016; Gaitán et al., 2017). El impacto de las gotas de lluvia y el flujo superficial poco profundo originan la erosión por salpicadura y la erosión laminar, por su parte la escorrentía superficial produce la erosión por surcos que forma canales pequeños bien definidos a diferencia de las cárcavas que son pequeñas (Ketema y Dwarakisha, 2021). Desde la perspectiva de Ketema y Dwarakisha (2021) estos tipos de erosión son las responsables de reducir la fertilidad y productividad del suelo afectando las actividades agrícolas.

Como resultado de la escorrentía superficial, el impacto de la lluvia sobre el suelo y las condiciones morfológicas del terreno, se produce el desprendimiento y transporte de partículas, compuestas principalmente por arcilla, arena y limo, que son arrastradas pendientes abajo (Gaitán et al., 2017). A ello se suman los efectos del cambio climático, que vuelven impredecibles los patrones de precipitación y dan lugar a diversas formas de flujo superficial. Entre estas se encuentran el flujo laminar, que erosiona el suelo a una velocidad lenta, y el flujo por surcos o erosión en surcos, que se desplaza con mayor rapidez; ambos son responsables del transporte de sedimentos, siendo este último el de mayor impacto en los procesos erosivos (Gaitán et al., 2017; Arias-Muñoz et al., 2023, Rosales, 2020).

Debido a su baja velocidad, la erosión laminar deteriora progresivamente el paisaje, provocando la pérdida de tierras agrícolas y la reducción de la productividad; por ello, es necesario implementar medidas de control y prácticas de conservación que permitan mitigar sus efectos (Liu et al., 2012). La erosión por surcos, común en regiones semiáridas, afecta la productividad agrícola en función de factores como la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, la estabilidad de las fuentes de agua y la tasa de infiltración (Fernández et al., 2004). Por su parte, la erosión por cárcavas implica la formación de surcos profundos como consecuencia de la acción concentrada del agua, lo que ocasiona importantes daños ambientales (Li et al., 2021).

2.3. Modelos de erosión del suelo

La erosión hídrica constituye una amenaza para el suelo, ya que altera sus atributos físicos y químicos, repercutiendo en el desarrollo socioeconómico de la población (Karydas et al., 2014). Alatorre y Beguería (2009), junto con Karydas et al. (2014), señalan que la modelización de la erosión hídrica proporciona información sobre sus patrones y tendencias, permitiendo analizar escenarios relacionados con los usos actuales y potenciales del suelo. Por esta razón, la simulación numérica por computador es una herramienta de modelamiento de la erosión del suelo que usa modelos especializados que evalúan su frecuencia, temporalidad y los efectos que produce sobre este recurso. La simulación de estos procesos requiere predecir el comportamiento de la erosión, sin embargo, debido a la complejidad de dichos sistemas, los modelos deben aproximarse a esta realidad mediante la consideración de variables cuyas relaciones generan conocimiento científico sobre el fenómeno estudiado (Montoya, 2009).

Los esfuerzos por entender los modelos erosivos y sus atributos espaciales han permitido mejoras en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Teledetección ya que recopilan, almacenan, transforman y permiten la visualización de datos espaciales (Karydas et al., 2014). El uso de los SIG, técnicas de interpolación espacial, la disponibilidad de datos ambientales y el uso de herramientas para el modelamiento de erosión del suelo permiten el modelamiento de procesos erosivos con mayor precisión a diferentes escalas, permitiendo implementar estrategias de manejo y conservación del suelo basadas en las condiciones específicas de cada territorio (Borreli et al., 2021).

Los sistemas de modelación son herramientas que facilitan la toma de decisiones debido a la variedad de enfoques que abordan (Borreli et al., 2021). Entre los más destacados se encuentra el modelo RUSLE, una modificación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), la cual, por su simplicidad, presenta limitaciones en ciertos tipos de suelo (Croke y Nethery, 2006). El Modelo Topográfico (TOPOG) y el Proyecto de Predicción de la Erosión Hídrica (WEPP) son sistemas de modelación más complejos, que representan los procesos hidrológicos y de erosión con mayor detalle, por lo que requieren una mayor cantidad de datos y recursos para su implementación (Nearing, 2013).

2.3.1. Modelo RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)

El modelo RUSLE permite estimar con mayor precisión la pérdida de suelo causada por el agua, mediante cinco factores: erosividad de la lluvia (R), erosionabilidad del suelo (K), pendiente del terreno (LS), cobertura y manejo del suelo (C), y prácticas de conservación (P). Cada uno de estos elementos influye en la vulnerabilidad del suelo frente a la erosión (Darbayeva et al., 2020). El componente R refleja la cantidad e intensidad de las precipitaciones; K mide la vulnerabilidad del suelo a la erosión según su textura y estructura. LS considera la pendiente del terreno, C evalúa la protección de la vegetación y el manejo, y P incluye medidas de conservación para reducir la erosión (Ecuación 1) (Renard y Freimund, 1994).

$$A = R * K * LS * C * P \quad (1)$$

Donde

- A: Pérdida media anual de suelo (ton/ha/año)
- R: Erosividad de la lluvia (MJ·mm/ha·h·año)
- K: Erosionabilidad del suelo (ton·ha·h/ha·MJ·mm)
- LS: Factor de pendiente y longitud de la pendiente
- C: Factor de cobertura y manejo del cultivo
- P: Factor de prácticas de conservación del suelo

2.3.2. Modelo USLE (Universal Soil Loss Equation)

El modelo USLE fue desarrollado por Wischmeier y Smith en 1978 como una herramienta empírica para estimar la pérdida media anual de suelo causada por la erosión hídrica, originada por la lluvia y la escorrentía superficial. Utiliza una fórmula sencilla basada en cinco factores principales: la erosividad de la lluvia (R), la erosionabilidad del suelo (K), la longitud y pendiente del terreno (LS), el tipo de cobertura vegetal y manejo del suelo (C), y las prácticas de conservación implementadas (P). Pese a que este modelo no considera procesos físicos en detalle ni variaciones temporales, es utilizada por su simplicidad, facilidad de aplicación y la disponibilidad de datos requeridos (Ecuación 2).

$$A = R * K * LS * C * P \quad (2)$$

Donde

- A: Pérdida media anual de suelo (ton/ha/año)
- R: Erosividad de la lluvia (MJ·mm/ha·h·año)
- K: Erosionabilidad del suelo (ton·ha·h/ha·MJ·mm)
- LS: Factor de pendiente y longitud de la pendiente
- C: Factor de cobertura y manejo del cultivo
- P: Factor de prácticas de conservación del suelo

2.4. Estimación de sedimentos en cuencas hidrográficas

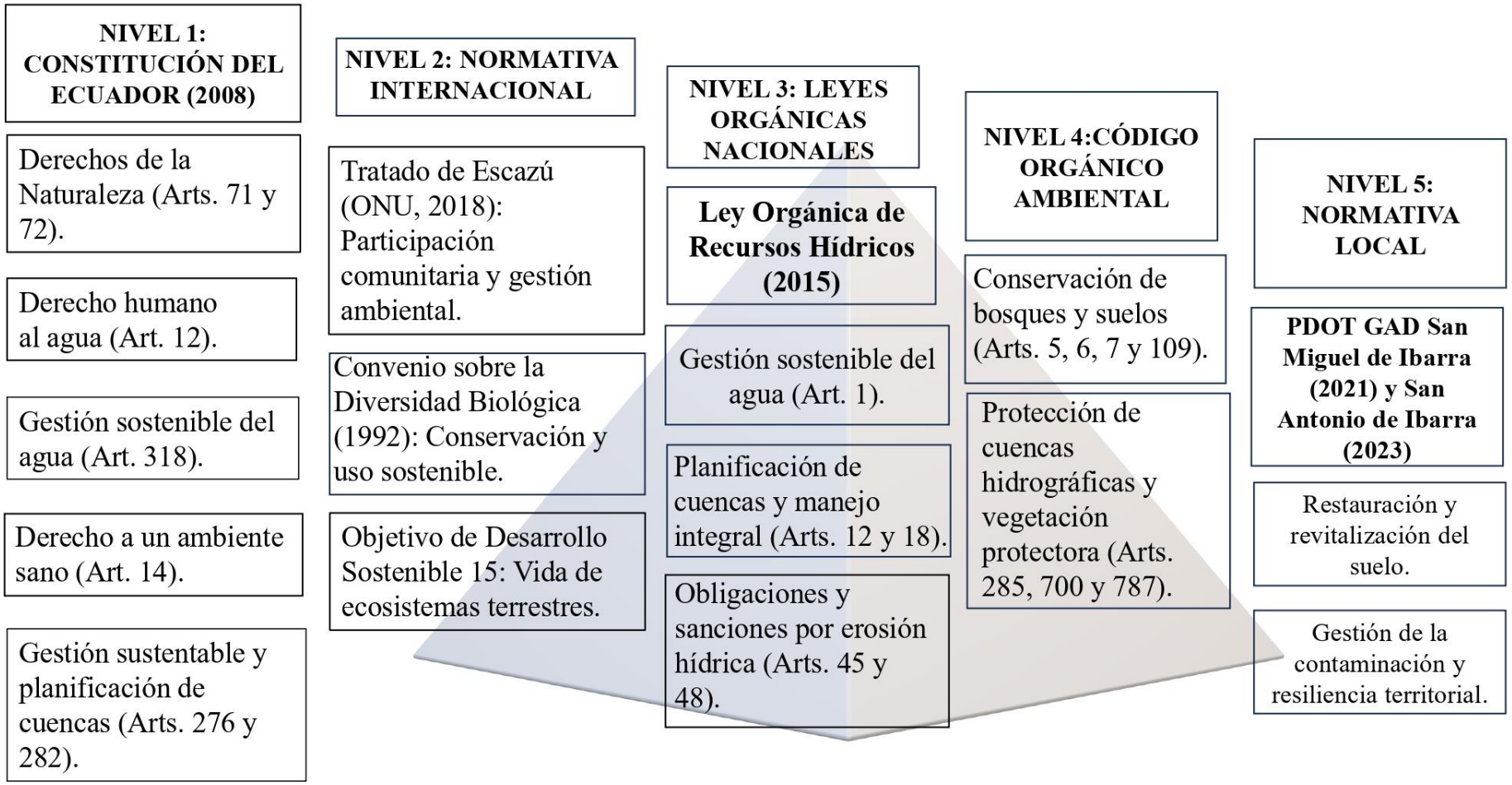
La estimación de sedimentos en cuencas hidrográficas es un proceso en la planificación y manejo sostenible de los recursos naturales. La sedimentación, es el transporte y depósito de partículas sólidas arrastradas por el agua de manera natural que se intensifica por la deforestación, la agricultura intensiva, el sobrepastoreo y la expansión urbana no planificada (Williams, 2012). Este proceso está influenciado por múltiples factores físicos y climáticos, tales como el tipo de suelo, la pendiente, la cobertura vegetal, la intensidad de las lluvias y las prácticas de uso del suelo (Wischmeier y Smith, 1978). La cobertura vegetal determina la energía cinética del agua de lluvia, disminuye la escorrentía superficial y aumenta la infiltración, reduciendo la erosión y, la generación de sedimentos (Pimentel et al., 1995).

2.5. Marco legal

El presente estudio se sustenta en un marco normativo integral que orienta la planificación, gestión y uso sostenible de los recursos naturales. En primer lugar, la Constitución de la República del Ecuador (2008) establece el reconocimiento de la Naturaleza como sujeto de derechos, garantizando la protección ambiental, la conservación de los ecosistemas y el manejo sustentable de los recursos naturales en beneficio de las generaciones presentes y futuras. A nivel internacional, se acoge lo dispuesto en los Acuerdos Multilaterales Ambientales y en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, donde los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) promueven un modelo de desarrollo equilibrado entre lo social, ambiental y económico, siendo relevantes especialmente los ODS 13 (Acción por el clima), ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres) y ODS 6 (Agua limpia y saneamiento).

En el ámbito legal interno, se incorpora lo establecido en el Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD), que regula las competencias de los Gobiernos Autónomos Descentralizados en materia de ordenamiento territorial, gestión ambiental y control del uso del suelo. Así también, se articula con el Código Orgánico del Ambiente (COA), instrumento jurídico clave para la planificación, ejecución y seguimiento de las políticas de prevención, mitigación y control de impactos ambientales. Se considera como directriz estratégica el Plan de Desarrollo para el Nuevo Ecuador 2024–2025, el cual orienta las acciones públicas hacia una transición ecológica justa, la resiliencia frente al cambio climático y el uso eficiente y equitativo de los recursos naturales renovables (Figura 1).

Figura 1. Marco Legal en el que se sustenta la tesis

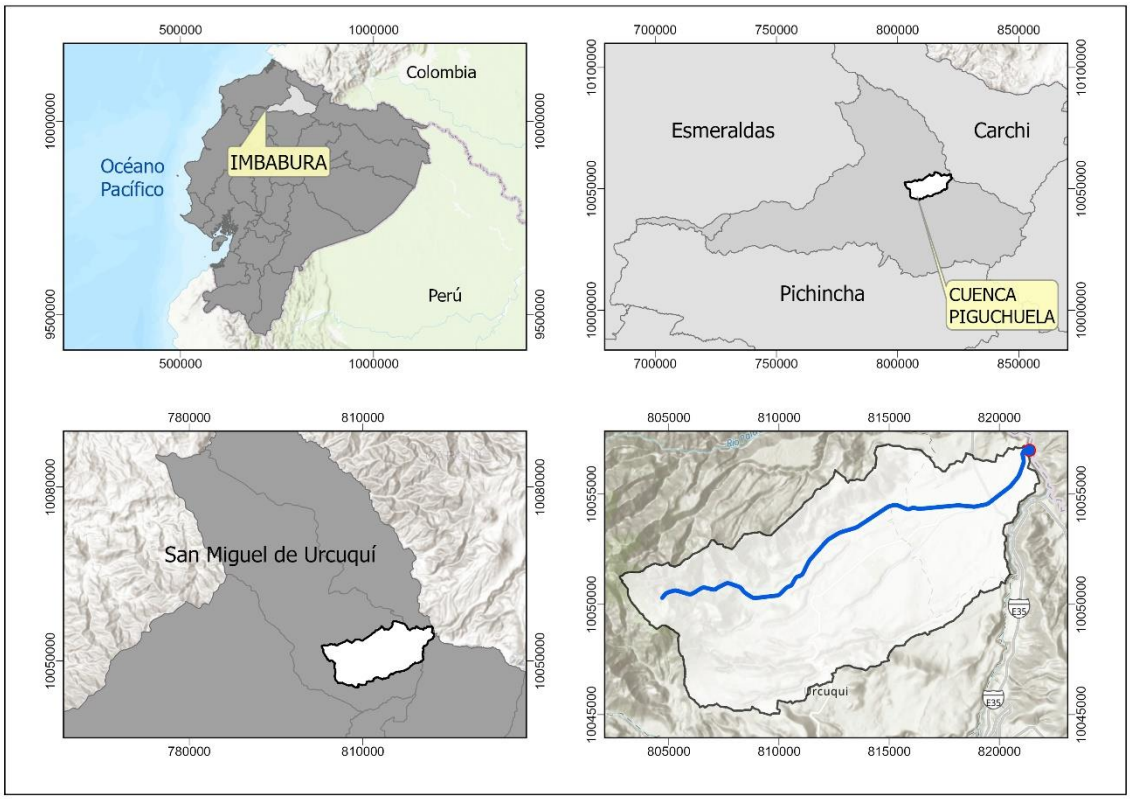


CAPÍTULO III
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Descripción del área de estudio

La cuenca hidrográfica del río Piguchuela se localiza en el norte del Ecuador, en la provincia de Imbabura, dentro del cantón Ibarra. Forma parte del sistema hidrográfico del río Mira y constituye un afluente del río Chota (Terán, 2018). La cuenca presenta una superficie de 12518.8 hectáreas y un rango altitudinal que oscila entre los 1496 y 3929 m.s.n.m. (Figura 2). La precipitación media anual varía entre 350 mm y 1200 mm, mientras que la temperatura media anual fluctúa entre 17 °C en las zonas bajas y 6 °C en los sectores de mayor altitud (Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Imbabura [GADPI], 2017). La cuenca del río Piguchuela presenta relieves montañosos, pendientes pronunciadas y zonas de valle interandino, condiciones que influyen en la dinámica hídrica, los procesos erosivos y el uso del suelo. La variabilidad altitudinal favorece la presencia de diversos pisos ecológicos y una amplia cobertura vegetal, que abarca desde áreas de vegetación arbustiva y zonas de cultivo hasta sectores altoandinos con remanentes de vegetación natural (GADPI, 2021).

Figura 2. *Ubicación microcuenca río Piguchuela*



La agricultura y la ganadería constituyen las principales actividades económicas desarrolladas por la población. Entre los productos agrícolas predominan los cultivos de ciclo corto y los cultivos perennes, como la caña de azúcar. Estas actividades representan el principal sustento económico de las comunidades asentadas dentro de la cuenca y dependen en gran medida de la disponibilidad del recurso hídrico (GADPI, 2017). Al constituir un espacio de regulación hídrica y conservación de ecosistemas andinos, esta cuenca enfrenta problemáticas asociadas con la expansión agrícola, la erosión del suelo, la pérdida de cobertura vegetal y la presión sobre los recursos naturales, factores que ponen en riesgo la calidad y disponibilidad del agua (Ramírez, 2015).

La ubicación geográfica y las características biofísicas de la cuenca convierten al área de estudio en un espacio de interés para investigaciones relacionadas con el manejo de recursos hídricos, la conservación ambiental, la planificación territorial y la sostenibilidad de sistemas productivos (Terán, 2018). En la Tabla 1 se indican las coordenadas de los límites de la cuenca.

Tabla 1. Límites de la cuenca hidrográfica del río Piguchuela WGS-84 UTM 17S

Punto	X	Y	Altitud (m s.n.m.)
Norte	814765	10057321	2020
Sur	809967	10045133	2490
Este	820507	10051413	1717
Oeste	802725	10051264	3938

3.2. Morfometría de la microcuenca del río Piguchuela

La morfometría de la microcuenca del río Piguchuela permite analizar y describir sus características físicas y geométricas, relacionadas con la superficie, perímetro, pendiente, forma, longitud y red de drenaje. Estos parámetros permiten comprender el comportamiento hidrológico de la microcuenca, y de cómo influyen en los procesos de escorrentía, infiltración, erosión y respuesta ante eventos de precipitación (Tabla 2). El análisis morfométrico es una herramienta para la planificación y gestión de los recursos hídricos, la conservación del suelo y la prevención de riesgos ambientales dentro del área de estudio.

Tabla 2. Parámetros morfométricos y caracterización física de la cuenca Piguchuela

Parámetro	Calculo	Interpretación
Área	125.19 km² (12518.8 ha)	Según Arias Muñoz et al. (2023) el área calculada se clasifica como una microcuenca
Perímetro	58.93 km	El perímetro calculado se clasifica como: Medio
Longitud axial	16.87 km	La longitud axial evidencia el desarrollo longitudinal de la cuenca a lo largo de su eje principal.
Ancho promedio	6.88 km	El ancho promedio refleja la dimensión transversal de la cuenca respecto a su longitud axial.
Altitud mínima	1482 m s.n.m.	La altitud mínima corresponde al sector más bajo de la cuenca, asociado a la zona de salida del drenaje principal.
Altitud máxima	4001 m s.n.m.	La altitud máxima se localiza en las zonas más elevadas de la cuenca.
Altitud media	2 22313 m s.n.m.	La altitud media indica que la cuenca presenta características propias de una zona montañosa.
Desnivel	2.519 m	El desnivel evidencia una marcada variación altitudinal dentro de la cuenca.
Pendiente media	23.67 % (12.67°)	La pendiente media caracteriza a la cuenca por presentar un relieve ondulado.
Coeficiente de compacidad (Kc)	1.47	El valor obtenido permite clasificar a la cuenca como oval-redonda u oval-oblonga, con una respuesta hidrológica intermedia frente a eventos de precipitación.
Factor de forma (Ff)	0.13	El factor de forma indica que la cuenca posee una configuración alargada, lo que disminuye la probabilidad de crecidas súbitas.
Longitud del cauce principal	2.08 km	La longitud del cauce principal evidencia una red de drenaje relativamente corta.
Pendiente del cauce principal	5.71 %	La pendiente media del cauce principal es propia de ríos de montaña
Tiempo de concentración	1.33 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.

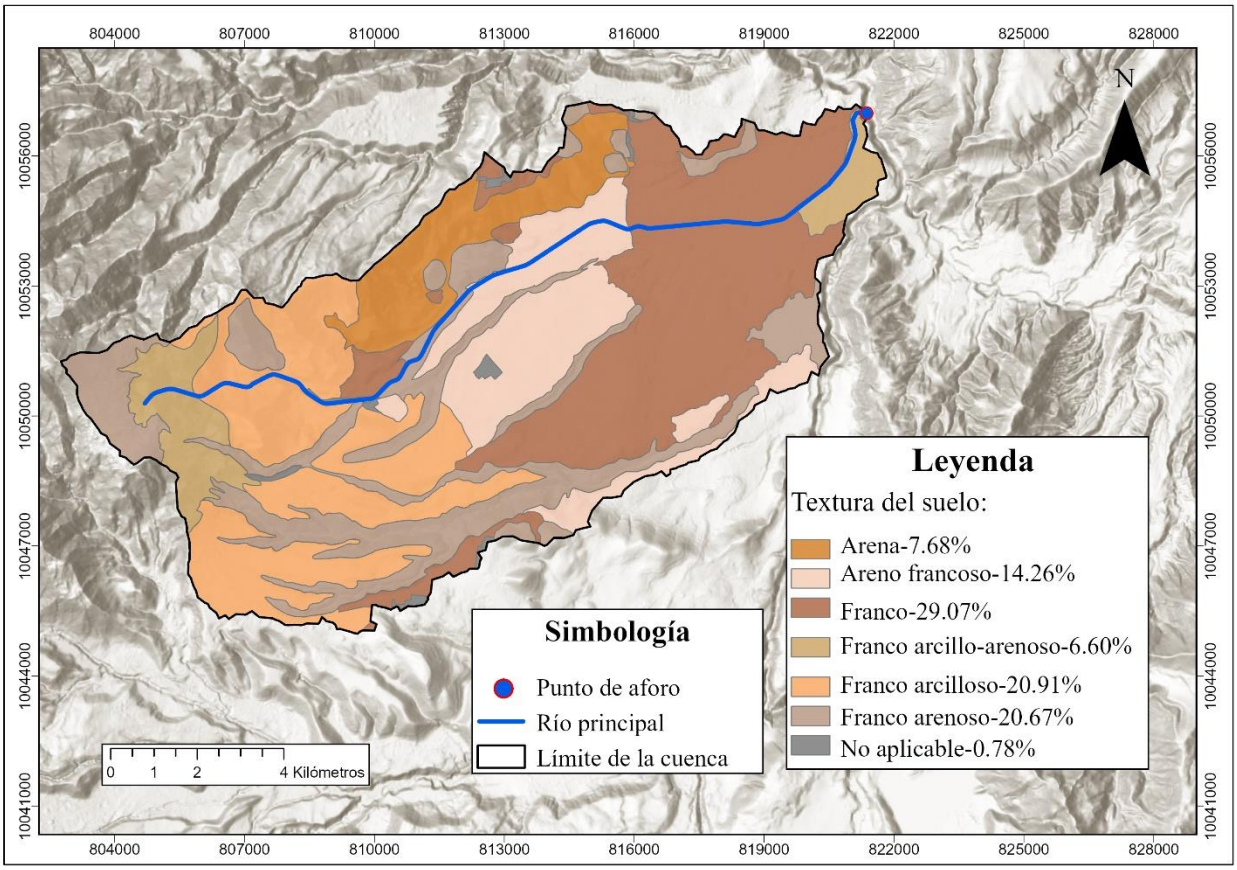
3.2.1. Edafología del suelo

La textura del suelo que presenta la cuenca del río Piguchuela está caracterizada por la variabilidad topográfica, climática y geomorfológica del territorio. En la Figura 3 se evidencia que predominan los suelos de textura franco con un 29.07 %, seguidos por los suelos franco-arcillosos (20.91 %) y francos arenosos (20.67 %), que ocupan gran parte de la superficie de la cuenca. Los suelos francos presentan un equilibrio entre arena, limo y arcilla, condición favorable para las actividades agrícolas por su buena capacidad de retención de humedad, aireación y disponibilidad de nutrientes. Los suelos franco-arcillosos poseen una mayor capacidad de retención de agua, aunque presentan menor permeabilidad y drenaje lento. Estas características favorecen los procesos de compactación y erosión en sectores con pendientes pronunciadas.

Los suelos franco-arenosos y areno francosos, que representan el 20.67 % y 14.26 % respectivamente, se caracterizan por presentar mayor permeabilidad y menor capacidad de retención hídrica, lo que influye en una rápida infiltración del agua y una menor disponibilidad de humedad para los cultivos durante épocas secas. En menor proporción se identifican suelos arenosos (7.68 %) y franco arcillo-arenosos (6.60 %), distribuidos en sectores específicos de la cuenca. Los suelos arenosos suelen presentar baja fertilidad natural y alta susceptibilidad a la erosión, mientras que el franco arcillo-arenosos poseen características de drenaje y retención de humedad.

Figura 3.

Textura del suelo de la cuenca del río Piguchela



3.3. Métodos

La presente investigación tuvo un enfoque cuantitativo de tipo transversal, orientado al modelamiento de la erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río Piguchuela mediante la aplicación de la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo (RUSLE). Este modelo permitió estimar la pérdida potencial de suelo a partir de la integración de variables climáticas, edáficas, topográficas y de cobertura vegetal mediante herramientas de análisis geoespacial en un entorno SIG. La investigación se desarrolló en varias fases que abarcaron la recopilación y procesamiento de información climática, topográfica, edáfica y de cobertura vegetal; el cálculo de los factores R, K, LS, C y P del modelo RUSLE; la generación de mapas temáticos; la estimación espacial de la pérdida de suelo; y la validación del modelo mediante el análisis de sedimentos suspendidos en el punto de aforo de la microcuenca.

3.3.1. Cálculo de la Pérdida de Suelo por Erosión Hídrica

Para el cálculo de la pérdida de suelo por erosión hídrica se empleó la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo (RUSLE), con el fin de estimar la erosión potencial mediante variables climáticas, topográficas, edáficas y de cobertura vegetal dentro de la cuenca hidrográfica del río Piguchuela (Ecuación 1).

$$A = R * K * LS * C * P \qquad (1)$$

Donde:

- **A:** Pérdida de suelo (ton/ha/año)
- **R:** Factor de erosividad de la lluvia (MJ·mm/ha·h·año)
- **K:** Factor de erodabilidad del suelo (ton*h*ha/(ha*MJ*mm)
- **LS:** Factor de longitud y pendiente del terreno (adimensional)
- **C:** Factor de cobertura y manejo del suelo (adimensional)
- **P:** Factor de prácticas de conservación (adimensional)

3.3.2. Determinación factor R

El factor R representa la erosividad de la lluvia con el fin de expresar la capacidad de la precipitación para generar erosión en el suelo. Este factor se basa en la energía cinética de las gotas de lluvia y la intensidad máxima de la lluvia registrada en un intervalo de 30 minutos, tiempo en el que las gotas desagregan el suelo en partículas pequeñas que posteriormente son transportadas por salpicadura o escorrentía superficial. Dicha energía depende de características como el tamaño, la masa y la velocidad de caída de las gotas. Se debe considerar que, a mayor tamaño de gota, mayor será su energía cinética y, por ende, su capacidad de provocar desagregación y erosión del suelo (Ayma, 2023). El factor R se realizó empleando datos de precipitación del área de estudio para un período de 30 años (Ecuación 2).

$$Factor\ R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 * 10^{\left(1.5 log_{10}\left(\frac{Pi^2}{P}\right) - 0.08188\right)} \qquad (2)$$

Donde:

- R: (x, y) es el Factor R (MJ mm ha-1 h-1 yr-1) en el tamaño de celda (x, y)
- Pi: es precipitación mensual (mm)
- P: es una precipitación anual (mm)

3.3.3. Determinación del factor K

El factor de erodabilidad del suelo (K) evalua el grado de susceptibilidad del suelo frente a los procesos erosivos en función de sus características físicas y químicas. Se estimó con base en información proveniente del archivo geoespacial de Geopedología del Ecuador, disponible en el geoportal de SIGTIERRAS, a una escala de 1:25000. Para la determinación se empleó la ecuación propuesta por Neitsch et al. (2011). Se recolectaron muestras representativas de suelo en puntos estratégicos de la microcuenca, que se analizaron en laboratorio con el fin de validar la información obtenida (Ecuación 2).

$$K_{USLE} = f_{sand} * f_{cl-si} * f_{orge} * f_{hisand} \qquad (2)$$

Donde:

- K_{USLE}: erodabilidad del suelo modelo RUSLE
- f_{sand}: contenido de arena
- f_{cl}-si: contenido de arcilla y limo
- f_{orgc}: contenido de carbono orgánico
- f_{hisand}: altos contenidos de arena

Se aplicó un factor de corrección de 0.01317 para ajustar la ecuación K_{USLE} al modelo RUSLE (Ecuación 3).

$$K_{USLE} = K * 0.13.17 \qquad (3)$$

La ecuación K_{USLE} corresponde a la erodabilidad del suelo y se expresa en ton-h-ha/(ha-MJ-mm), en similitud con el modelo RUSLE. La estimación de este factor se realiza a partir de las propiedades físicas y químicas del suelo mediante una serie de funciones de corrección. La primera función, presentada en la Ecuación 4, considera el efecto del contenido de arena gruesa sobre la erodabilidad del suelo.

$$f_{csand} = \left\{0.2 + 0.3x\ exp\left[-0.256\ x\ m_s x\left(1 - \frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}}\right)\right]\right\} \quad (4)$$

La Ecuación 5 representa el factor asociado a la relación entre el contenido de limo y la presencia de arcilla y limo en el suelo, reflejando la influencia de estas partículas en la susceptibilidad a la erosión.

$$f_{ci-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}}\right)^{0,3} \quad (5)$$

La Ecuación 6 aborda el efecto del carbono orgánico, el cual mejora la estabilidad estructural del suelo y, por tanto, a reducir su erodabilidad.

$$f_{orgc} = \left\{1 - \frac{0.25\ x\ orgC}{orgC + exp(3.75 - 2.95\ x\ orgC)}\right\} \quad (6)$$

La Ecuación 7 estima el factor de corrección relacionado con altos contenidos de arena, ajustando el valor de la erodabilidad en suelos con predominio de partículas arenosas

$$f_{hisand} = \left\{1 - \frac{0.7\left(1 - \frac{m_s}{100}\right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100}\right) + exp\left[-5.51 + 22.9x\left(1 - \frac{m_s}{100}\right)\right]}\right\} \quad (7)$$

Donde

- m_s: porcentaje de arena
- m_{silt}: porcentaje de limo
- m_c: porcentaje de arcilla
- orgC: porcentaje de SOC

Obtenidos los valores del factor K para cada muestra de suelo, se utilizó un entorno SIG para interpolarlos y generar un mapa de la erodabilidad del suelo en toda la microcuenca. Los resultados fueron validados mediante observaciones de campo y su comparación con datos de erodabilidad previamente reportados para la zona de estudio.

3.3.4. Determinación del factor LS

El factor LS presentado en la ecuación 8 es la longitud e inclinación de las pendientes del terreno, cuya magnitud influye en el incremento de la erosión hídrica (Arias-Muñoz et al., 2023). Para su determinación, se utilizó un Modelo Digital de Elevación con resolución de 30 m, obtenido de la plataforma Open Topography, el cual permitió analizar las características del relieve. Este insumo se procesó mediante la ecuación propuesta por McCool (Renald et al., 1994). Se consideró el grado de la pendiente, expresado en porcentaje o grados, y la forma del perfil del terreno, que puede presentarse como cóncavo, convexo o recto (Ramos y Sánchez, 2023).

$$LS = \left(\frac{Flow\ accumulation\ x\ cell\ size}{22.13}\right)^{0.4} * \left(\frac{Sin_{Slope}}{0.0896}\right)^{1.3} \qquad (8)$$

Donde:

- LS: longitud de la pendiente y pendiente inclinada
- Flow accumulation: número de celdas que contribuyen al flujo de una celda dada
- Cell size: tamaño de las celdas que es de 30 m, 22.13: constante de la longitud
- Sin slope: es el Seno de la pendiente en radianes

3.3.5. Determinación del factor C

El factor C evalúa la influencia de la cobertura vegetal y las prácticas de manejo del suelo en los procesos de erosión (Xiong et al., 2023). Este parámetro analiza cómo los diferentes tipos de vegetación y usos agrícolas actúan como elementos protectores o, por el contrario, favorecen la exposición del suelo a la erosión hídrica. Para su estimación, se utilizaron los valores propuestos por Arias-Muñoz et al. (2023), los cuales se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores del factor C

Cobertura del Suelo	Factor C
Bosque	0.001
Matorral	0.035
Páramo	0.040
Pastizal	0.037
Cultivos	0.35

Roca	0
Zona Urbana	0

Nota: La tabla presenta los valores que corresponden a la cobertura del suelo en el factor C. Fuente: Arias-Muñoz et al. (2023).

3.3.6. Factor P

El factor P considera la influencia de las prácticas de conservación implementadas para el control de la erosión, como terrazas y cultivos en contorno, estás prcaticas se representan con el valor de cero [0] a diferencia de la inexistencia de prcaticas de conservación que son representadas con el valor de uno [1] (Arias-Muñoz et al., 2023). Debido a que en la microcuenca del río Piguchuela no se han desarrollado practicas de conservación se empleó el valor de 1.

3.3.7. Validación modelo RUSLE

La metodología propuesta por Ebrahimzadeh et al. (2018) permitió la comprobación del modelo RUSLE, esto ayudó a estimar la producción de sedimentos. Esta variable cuantifica la carga sedimentaria neta transportada hasta la parte baja de la microcuenca (Ecuación 9).

$$SY = A * SDR \qquad (9)$$

Donde

- **SY:** Producción total de sedimentos (mm)
- **A:** Pérdida anual del suelo (mm)
- **SDR:** Cantidad estimada de suelo erosionada (mm)

La integración de los datos empíricos del área de estudio con los resultados simulados mediante el modelo RUSLE permitió determinar el valor de SY, el cual fue estimado a partir de la concentración de sólidos suspendidos (CSS) y su relación con el caudal medio anual. Estos resultados fueron comparados con los valores simulados, con el fin de sustentar el proceso de validación. De acuerdo con Tsegaye y Bharti (2021), este enfoque permite cuantificar la erosión del suelo en función de la longitud de la pendiente (Ecuación 10).

$$SDR = 0.5656 * S^{-0.11} \qquad (10)$$

Donde

- 0.5656 = constante adimensional
- S = superficie de la microcuenca (km2)
- -0.11 = exponente que expresa la relación inversa entre el tamaño de la microcuenca y el SDR

La validación del modelo se realizó comparando los valores de producción de sedimentos simulados (SY) con los obtenidos en campo, utilizando un conjunto de 12 muestras. Para analizar el desempeño del modelo, se emplearon indicadores estadísticos como el sesgo porcentual (PBIAS) (Ecuación 11) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) (Ecuación 12). Según los criterios establecidos por Moriasi et al. (2015), el PBIAS identifica la tendencia del sesgo: valores positivos indican subestimación, y valores negativos evidencian sobrestimación. Es así como se considera que el modelo presenta un ajuste aceptable a escala de microcuenca cuando el PBIAS se encuentra dentro del rango de ±55%.

$$PBIAS = \frac{\sum(SY_{ob} - SY_{sim})(100)}{\sum SY_{ob}} \qquad (11)$$

Donde

SY_{ob} = Sedimentos observados (ton/ha/año)

SY_{sim} = sedimentos simulados (ton/ha/año)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(SY_{sf} - SY_{rg})^2}{n}} \qquad (12)$$

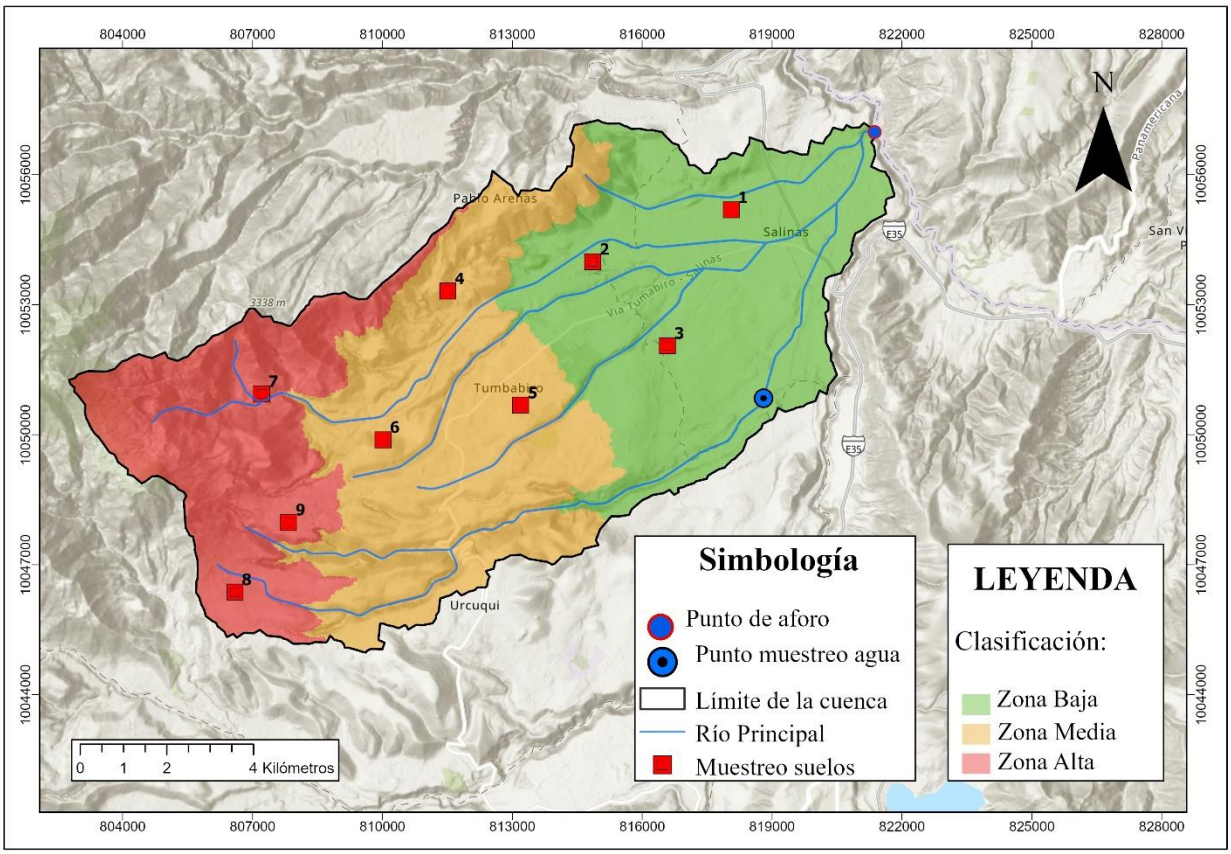
Donde

- SY_{sf} = sedimentos calculados por el modelo (ton/ha/año)
- SY_{rg} = sedimentos observados a registrados (ton/ha/año)
- n = número total de observaciones utilizadas en comparación
- Σ (SY_{sf} - SY_{rg}) = suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores calculados y observados

3.3.8. Puntos de muestreo y análisis de laboratorio

El muestreo de agua estuvo compuesto en 12 campañas de muestreo, con el fin de obtener representatividad estacional de la microcuenca, en las coordenadas 81879 E y 10050851 N (Figura 4). Se realizó un análisis comparativo entre las estaciones de estiaje y de precipitación intensiva, considerando que la dinámica de transporte de sedimentos y la carga aluvial dependen directamente de la variación del caudal. La concentración de sólidos se expresa en mg/L.

Figura 4. Puntos de muestreo



Las muestras recolectadas se trasladaron al Laboratorio de Química de la Universidad Técnica del Norte para el análisis de la concentración de sólidos suspendidos (CSS) (Ecuación 13). La cuantificación de la masa de sólidos se realizó mediante el método gravimétrico, que establece la cantidad exacta de una sustancia a partir de la medición de su masa, considerando las variaciones de peso tras un proceso controlado (Moore y Wilson, 1992). Fueron recolectadas 12 muestras, para cada muestra se efectuaron tres repeticiones, obteniéndose un total de 36 submuestras. En este procedimiento se empleó un filtro de microfibra de vidrio GF2 de 0.1 µm para la

determinación de los sólidos suspendidos (ASTM International, 2019). El método gravimétrico se empleó para el modelamiento geológico del terreno en escalas que van desde decimétricas hasta kilométricas. El método detecta los contrastes de densidad entre las formaciones del subsuelo y estima su distribución geométrica.

El modelado consistió en proponer una representación del subsuelo definida mediante parámetros físicos y geométricos, para obtener la curva de respuesta de una magnitud física observada en la zona de estudio (Gómez, 2012). El modelado gravimétrico consiste en calcular la respuesta gravitacional a partir de la formulación de una distribución de densidades propuesta con base en una fundamentación geológica del subsuelo. Dicha distribución queda caracterizada por un conjunto de parámetros que describen su geometría y los contrastes de densidad (Telford et al., 1990).

$$CSS = \frac{W_s - W_f}{V} \qquad (13)$$

Donde:

- W_S = peso del filtro con sedimentos secos (mg)
- W_f = peso del filtro vacío (mg)
- V = volumen de agua filtrada (L)

Para obtener el valor de los sedimentos suspendidos (kg/s) se multiplicó por el caudal (m^3/s) (Ecuación 14).

$$Sedimentos\ en\ Suspendidos\ \left(\frac{kg}{s}\right) = CSS * Qx \qquad (14)$$

El valor obtenido se multiplicó por la superficie de la microcuenca para poder transformar la cifra en ton/ha/año (Ecuación 15).

$$SS = \frac{SS\left(\frac{kg}{s}\right) * 3600 * 24 * 365}{1000} \qquad (15)$$

Donde

SS: Sedimentos suspendidos

Figura 5. Investigadora recolectando muestras de agua



3.3.9. Evaluación del Riesgo de Erosión

La evaluación del riesgo de erosión consideró diversos procesos, incluyendo la identificación de los factores que influyen en la erosión, como la erosividad de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la longitud e inclinación de la pendiente, la cobertura vegetal y las prácticas de conservación (Tabla 4). Se emplearon modelos como la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo (RUSLE) para estimar la pérdida potencial de suelo. Las herramientas SIG permitieron modelar y analizar el proceso erosivo (Ramos y Sánchez, 2023).

Tabla 4. *Categorías de erosión*

Tasa de Erosión (ton/ha/año)	Categorías	Características
0	Nula	Zonas no susceptibles a procesos erosivos, tales como áreas urbanas y embalses
0-15	Muy Baja	Zonas con niveles de erosión muy bajos, donde las pérdidas de suelo se consideran tolerables
15-25	Baja	Zonas con niveles de erosión bajos, donde las pérdidas de suelo se consideran tolerables
25-50	Moderada	Zonas con procesos erosivos leves, en las que la erosión no es apreciable a simple vista.
>50	Alta	Zonas con pérdidas de suelo no tolerables.

La información climática fue empleada como insumo; se utilizaron registros diarios de precipitación para estimar la erosividad. Se consideraron variables como la textura, estructura, contenido de materia orgánica y la profundidad del horizonte superficial para caracterizar las propiedades del suelo. La información topográfica, referente a la longitud e inclinación de la pendiente, junto con los datos de cobertura vegetal y las prácticas de manejo del suelo, también fueron incorporadas. Los mapas de suelos y demás información espacial permitieron la implementación de la metodología en un entorno SIG, facilitando un análisis más preciso del riesgo de erosión (Ayma, 2023)

3.4. Estrategias de manejo de conservación

En la cuenca del río Piguchuela, la caracterización de la vulnerabilidad a la erosión se desarrolló mediante un diagnóstico FODA, el cual permitió analizar las interacciones entre las actividades antrópicas, las condiciones biofísicas del suelo y las respuestas del ecosistema. Este enfoque facilitó la formulación de estrategias de conservación enfocadas en la sostenibilidad (Nikulin y Becker, 2015). Los resultados del modelo RUSLE, la zonificación del riesgo de erosión y la capacidad de uso potencial del área permitieron sintetizar las variables para la construcción de una matriz estratégica (FO, FA, DO, DA), que fue validada mediante la superposición cartográfica de tres componentes clave: la aptitud física del suelo, la identificación de conflictos por sobreuso y subuso, y la clasificación de las clases agrológicas (III a VIII) según su grado de limitación productiva y sensibilidad ambiental.

La matriz FODA se realizó con los resultados del modelo RUSLE, la zonificación del riesgo de erosión hídrica, la clasificación agrológica de los suelos y el análisis de conflictos de uso del suelo de la microcuenca del río Piguchuela. Las fortalezas y debilidades se identificaron considerando la cobertura vegetal, la presencia de áreas sin intervención antrópica, la capacidad agrológica de los suelos y las limitaciones físicas para el uso productivo. Las oportunidades y amenazas se determinaron desde las posibilidades de implementación de programas de conservación, restauración y manejo sostenible del suelo, y de los procesos que incrementan la vulnerabilidad a la erosión, como la sobreutilización del suelo, la expansión de actividades agropecuarias en áreas de alta fragilidad y la degradación de la cobertura vegetal. La información se sintetizó en una matriz estratégica que permitió formular acciones de manejo y conservación para reducir los procesos erosivos de la microcuenca.

3.5. Materiales y equipos

A continuación, se presenta los materiales, equipos e insumos empleados para la ejecución de la investigación.

Tabla 5. Materiales, equipos e insumos empleados en la investigación

Materiales	Equipos	Insumos
Barreno	Balanza analítica	Botas de caucho
Base de datos	Cámara fotográfica	Guantes quirúrgicos
Cartografía digital	Computador	Etiquetas para muestras
Cilindros metálicos	Navegador GPS	Libreta de campo
Imágenes satelitales	USB	Martillo de goma
Probetas para muestras de agua	Vehículo	Cinta métrica
Pipetas para muestras de agua		Ropa de campo
Software SIG		

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Zonificación del riesgo de erosión hídrica y determinación de la pérdida de suelo

La zonificación del riesgo de erosión hídrica y la determinación de la pérdida de suelo en la microcuenca del río Piguchuela se realizaron mediante el modelo RUSLE. Fueron integrados los factores de erosividad de la lluvia (R), erodabilidad del suelo (K), longitud e inclinación de la pendiente (LS) y cobertura y manejo del suelo (C), mediante la aplicación de herramientas SIG. La información provino de registros climáticos, modelos digitales de elevación, cobertura vegetal y análisis físicos del suelo, incluyendo textura, materia orgánica y densidad aparente. Los resultados identificaron las zonas con mayor susceptibilidad a la erosión hídrica, permitiendo cuantificar la pérdida potencial de suelo en la microcuenca (Figura 6).

4.1.1. Factor R

El mapa del factor R (Figura 6A) representa la capacidad de la precipitación para generar procesos erosivos dentro de la cuenca. Se identificó valores entre 320 y 501 $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot año^{-1}$, clasificándose en categorías de baja, moderada, media y alta erosividad. En la Figura 6A se observa que gran parte de la cuenca presenta valores de erosividad entre moderados y altos, mostrando influencia de la precipitación en los procesos de erosión hídrica. Las zonas con mayor erosividad se localizan hacia el oeste y noroeste de la cuenca, mientras que los valores moderados predominan en el centro y este. La intensidad y frecuencia de las precipitaciones influyen en la pérdida de suelo, ya que lluvias de alta energía favorecen el desprendimiento y transporte de partículas superficiales. Es así como las áreas con mayores valores de R presentan mayor susceptibilidad a los procesos erosivos, en zonas con pendientes pronunciadas o escasa cobertura vegetal.

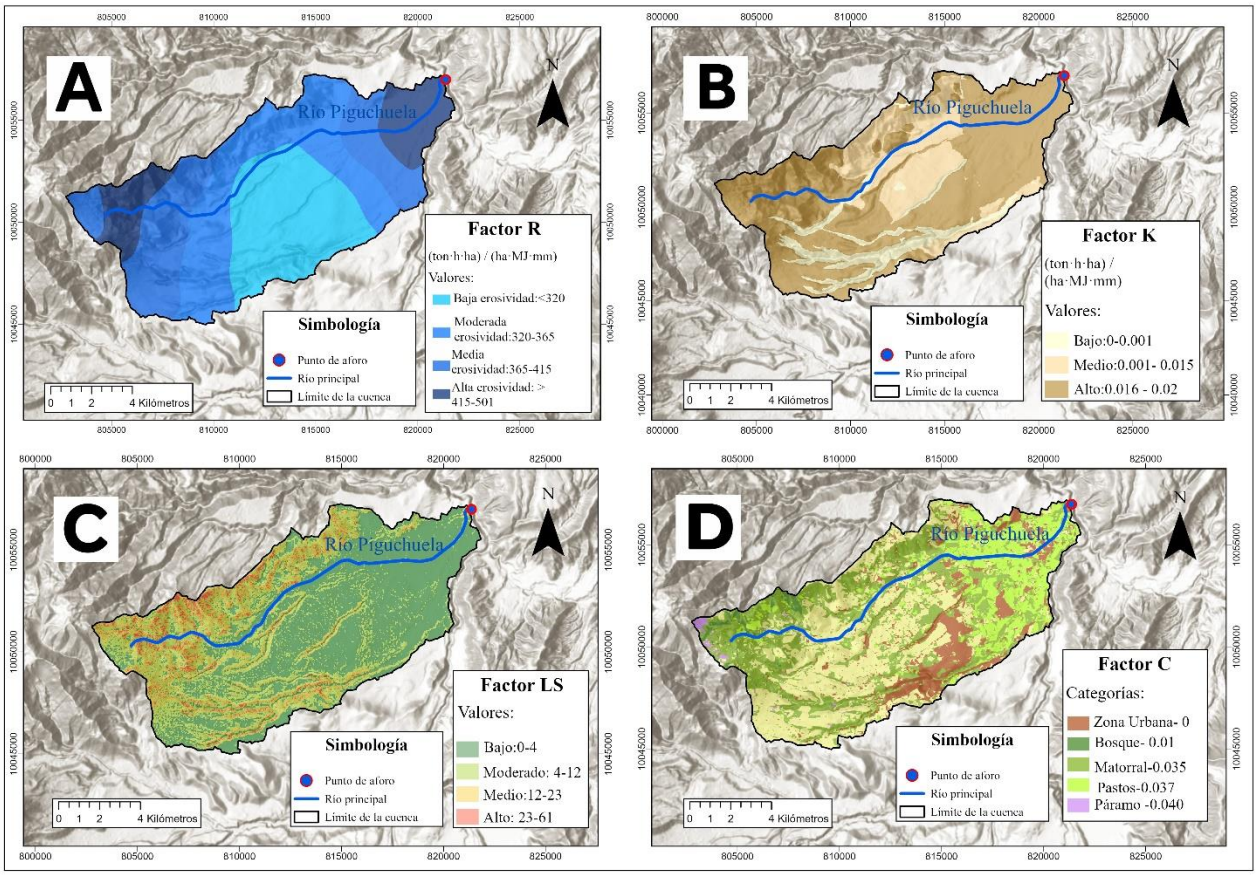
4.1.2. Factor K

El factor K representa la susceptibilidad del suelo al desprendimiento y transporte de partículas por la acción del agua. Los valores identificados en la microcuenca Piguchuela oscilaron entre 0 y 0.02, clasificándose en niveles bajo, medio y alto. En la cuenca predominan valores medios de erodabilidad, asociados a suelos con textura franco-limosa y un contenido moderado de materia orgánica. En la Figura 6B se identifican sectores con valores altos, como en las zonas centrales y occidentales, donde

los suelos presentan mayor susceptibilidad al deterioro estructural y al arrastre superficial. El comportamiento del factor K evidencia que ciertas unidades edáficas presentan menor resistencia frente al impacto de la lluvia y al escurrimiento superficial, lo que incrementa el riesgo de erosión. Este patrón puede estar relacionado con procesos de compactación, pérdida de cobertura vegetal y prácticas de manejo inadecuadas.

Los valores del factor K se determinaron mediante el análisis físico del suelo que se realizaron en laboratorio, considerando las variables textura, contenido de materia orgánica y densidad aparente. Se evidenció el predominio de suelos con características franco-limosas y contenidos variables de materia orgánica dentro de la microcuenca, condiciones que influyen en la susceptibilidad del suelo y transporte de partículas. Los sectores con menor contenido de materia orgánica y mayor compactación presentaron mayores niveles de erodabilidad, mientras que los suelos con mejores condiciones estructurales mostraron una mayor resistencia frente a los procesos erosivos.

Figura 6. Factores modelo RUSLE



En el factor K se debe destacar que el contenido de materia orgánica en la microcuenca del río Piguchuela presentó un incremento desde la cuenca alta hacia la cuenca baja. La cuenca alta registró un contenido de materia orgánica de 1.44% (Anexo 13), valor considerado bajo y asociado a una menor capacidad del suelo para retener humedad y nutrientes, lo que incrementa su susceptibilidad a la erosión. La cuenca media presentó 2.27% (Anexo 14), evidenciando una ligera mejora en las condiciones del suelo. Por su parte, la cuenca baja alcanzó 6.17% (Anexo 15), valor considerado alto, que favorece la estabilidad estructural del suelo, la retención de agua y nutrientes, y una menor vulnerabilidad a los procesos erosivos. El aumento del contenido de materia orgánica contribuye a disminuir la erodabilidad del suelo y el riesgo de erosión hídrica.

4.1.3. Factor LS

El factor LS representa la influencia de la topografía sobre la erosión hídrica, al integrar el efecto de la longitud de la pendiente y su grado de inclinación. Los valores obtenidos oscilaron entre 0 y 61, clasificándose en categorías de baja, moderada, media y alta. Los valores bajos predominan en áreas planas o de pendientes suaves, ubicados en la zona central de la cuenca (Figura 6C). Los valores altos se concentran en zonas montañosas y laderas pronunciadas, ubicadas hacia los bordes de la cuenca y en sectores de transición altitudinal. Este comportamiento evidencia la influencia de la topografía en la aceleración de los procesos erosivos, ya que las pendientes pronunciadas incrementan la velocidad del escurrimiento superficial y la capacidad del agua para remover partículas del suelo. Las áreas con valores elevados de LS representan zonas críticas con mayor potencial de pérdida de suelo.

4.1.4. Factor C

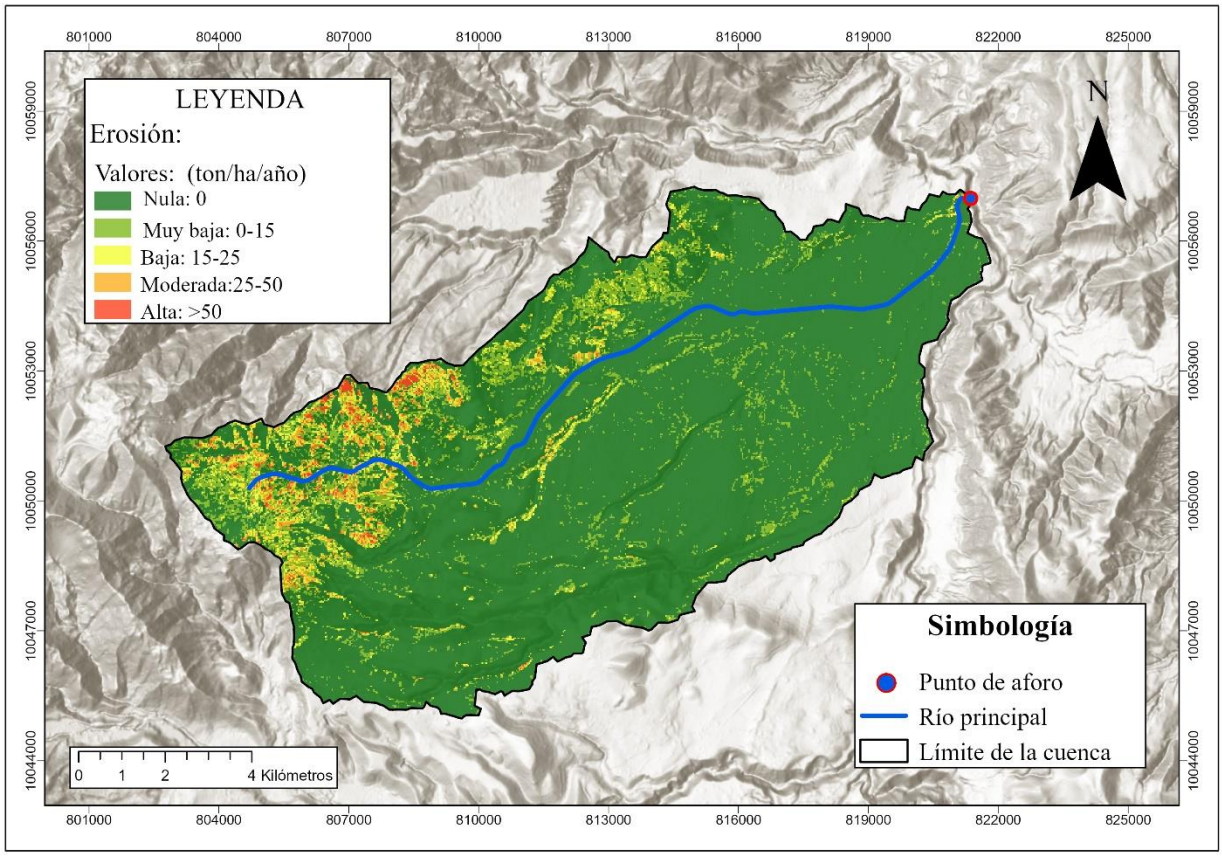
El factor C hace referencia al efecto protector de la cobertura vegetal y del uso del suelo frente a la erosión. La Figura 6D muestra diferentes categorías asociadas a bosque, matorral, pastos, páramo y zonas urbanas. Las áreas boscosas presentan los valores más bajos del factor C, lo que indica una mayor protección del suelo, en la parte baja de la cuenca, debido a la cobertura vegetal permanente y a la presencia de raíces que contribuyen a la estabilidad del terreno. A diferencia de las zonas de pastizales y áreas intervenidas que presentan valores más altos, lo que refleja una menor protección y una mayor susceptibilidad a la erosión. En la Figura 6D se observa que gran parte de la cuenca está cubierta por vegetación natural y seminatural, la cual contribuye a disminuir el

impacto de las gotas de lluvia y a reducir el escurrimiento superficial. Por el contrario, en sectores donde predominan actividades agropecuarias o suelos desnudos, el riesgo erosivo aumenta progresivamente debido a la disminución de la cobertura vegetal.

La erosión hídrica obtenida mediante el modelo RUSLE muestra una distribución espacial heterogénea de la pérdida de suelo en la cuenca (Figura 7). Predominan las zonas con erosión muy baja a nula (0–15 ton/ha/año), asociadas a buena cobertura vegetal, pendientes suaves y suelos resistentes. Las áreas con erosión baja a moderada (15–50 ton/ha/año) se distribuyen de forma dispersa y reflejan condiciones intermedias influenciadas por el uso del suelo y la pendiente. Las zonas con alta erosión (>50 ton/ha/año) se concentran en el sector occidental, en laderas con pendientes pronunciadas, menor cobertura vegetal y mayor susceptibilidad del suelo, favoreciendo el aporte de sedimentos al río principal. Aunque predomina una baja vulnerabilidad, existen sectores críticos que requieren medidas de conservación.

La erosión hídrica obtenida mediante el modelo RUSLE muestra una distribución espacial heterogénea de la pérdida de suelo en la cuenca (Figura 7). Predominan las zonas con erosión muy baja a nula (0–15 ton/ha/año), asociadas a buena cobertura vegetal, pendientes suaves y suelos resistentes. Las áreas con erosión baja a moderada (15–50 ton/ha/año) se distribuyen de forma dispersa y reflejan condiciones intermedias influenciadas por el uso del suelo y la pendiente. Las zonas con alta erosión (>50 ton/ha/año) se concentran en el sector occidental, en laderas con pendientes pronunciadas, menor cobertura vegetal y mayor susceptibilidad del suelo, favoreciendo el aporte de sedimentos al río principal. Aunque predomina una baja vulnerabilidad, existen sectores críticos que requieren medidas de conservación.

Figura 7. Erosión hídrica de la microcuenca de Piguchuela



4.2. Validación del modelo RUSLE

La validación del modelo RUSLE se realizó comparando la producción de sedimentos observada (SY observado), obtenida a partir de la concentración de sólidos suspendidos y su relación con el caudal medio anual, y la producción de sedimentos simulada (SY simulado), estimada mediante la integración de la pérdida de suelo calculada con RUSLE y el índice de entrega de sedimentos (SDR). Para ello, se analizaron doce puntos de muestreo distribuidos dentro de la microcuenca del río Piguchuela. Los resultados de los valores observados de producción de sedimentos oscilaron entre 0.08 y 1.88 ton/ha/año, mientras que los valores simulados variaron entre 0.83 y 1.08 ton/ha/año (Tabla 7). Se muestra sobreestimaciones, que son más evidentes en las muestras con valores extremos de producción de sedimentos, esto puede asociarse a la variación espacial de las precipitaciones, cobertura vegetal, topografía y los procesos de transporte de sedimentos presentes en la microcuenca.

La evaluación estadística del desempeño del modelo se realizó mediante el porcentaje de sesgo (PBIAS), que presentó un valor de -6.98 %. De acuerdo con los

criterios propuestos por Moriasi et al. (2015), los valores negativos reflejan una tendencia a sobrestimar la producción de sedimentos; sin embargo, el resultado obtenido se encuentra dentro del rango de aceptación establecido para estudios de erosión a escala de microcuenca (±55%). Esto demuestra que las diferencias entre los valores observados y simulados son reducidas y que el modelo presenta un nivel de ajuste satisfactorio. Los resultados confirman que el modelo RUSLE representa la dinámica erosiva de la microcuenca del río Piguchuela siendo una herramienta confiable para estimar la pérdida de suelo. La incorporación de datos de campo, mediante el análisis de sólidos suspendidos, permitió fortalecer la confiabilidad de las simulaciones y respaldar la aplicación del modelo para la identificación de áreas vulnerables a la erosión hídrica.

Tabla 6. Sedimentos Suspendidos (ton/ha/año)

N° Muestra	SY Observado	SY Simulado
1	0.08	0.83
2	0.85	0.83
3	0.88	0.83
4	0.88	0.83
5	1.00	1.08
6	0.62	1.08
7	0.97	1.08
8	1.88	1.08
9	1.79	1.08
10	1.06	1.08
11	0,44	1.08
12	0.71	1.08
Promedio	0.93	1.00

4.3. Discusiones

Los resultados del modelo RUSLE demostraron que la mayor parte de la microcuenca del río Piguchuela presenta pérdidas de suelo entre 0 y 15 ton/ha/año, mientras que las tasas superiores a 50 ton/ha/año se concentran en sectores específicos del área occidental. Este comportamiento coincide con lo señalado por Jahun et al. (2015), quienes indican que la erosión hídrica está determinada por la interacción entre la erosividad de la lluvia, la topografía, las características del suelo y la cobertura vegetal. En la microcuenca, las mayores pérdidas de suelo se registraron en zonas con pendientes pronunciadas y menor cobertura vegetal, mientras que las áreas con vegetación natural y mayor contenido de materia orgánica presentaron una menor susceptibilidad a la erosión.

Tanyas et al. (2015) demuestran que la integración del modelo RUSLE con herramientas SIG identifica las zonas más susceptibles a la erosión al relacionarlas con las características del relieve, el suelo y la cobertura vegetal. En el caso de la microcuenca del río Piguchuela, las mayores pérdidas de suelo se asociaron a pendientes pronunciadas, valores elevados del factor LS y una menor cobertura vegetal, condiciones que favorecen el incremento de la escorrentía superficial y el transporte de sedimentos. Por el contrario, las áreas con vegetación natural y mayores contenidos de materia orgánica presentaron una menor susceptibilidad a la erosión. Sus resultados manifiestan que la cobertura y el manejo del suelo constituyen factores determinantes en las estimaciones de erosión, debido a su capacidad para reducir el impacto de la lluvia y proteger la superficie del suelo.

Luvai et al. (2022), indican que la erosión hídrica está determinada por la interacción entre la lluvia, la topografía, las propiedades del suelo y la cobertura vegetal. Señalan que las mayores pérdidas de suelo se registraron en sectores con valores elevados de erosividad (R), pendientes pronunciadas (LS) y menor cobertura vegetal, condiciones que favorecen el desprendimiento y transporte de partículas. Por el contrario, las áreas con vegetación natural y mayores contenidos de materia orgánica presentaron menores niveles de erosión debido al efecto protector de la cobertura vegetal y la estabilidad estructural del suelo. Es así como la topografía y el uso del suelo son factores determinantes en la distribución espacial de la erosión hídrica dentro de la microcuenca.

La densidad aparente del suelo evaluado en la microcuenca del río Piguchuela presentó valores entre 0.98 y 1.43 g/cm³, con un promedio de 1.14 g/cm³. El valor más alto se registró en la localidad de Salinas (1.43 g/cm³), mientras que los valores más bajos se observaron en Santa Susana (0.98 g/cm³) y San Francisco (0.99 g/cm³). Los resultados evidencian que la mayoría de los sitios presentan densidades aparentes inferiores a 1.30 g/cm³, lo que indica condiciones favorables de la estructura del suelo para el desarrollo radicular, la infiltración del agua y la circulación del aire. Por otro lado, los valores más elevados se registraron en Salinas (1.43 g/cm³) y San Rafael (1.32 g/cm³), lo que sugiere una mayor compactación del suelo en estos sectores. Esta condición podría limitar la infiltración del agua y favorecer la escorrentía superficial bajo determinadas condiciones ambientales y de manejo del suelo.

Martínez et al. (2021) señalan que la resistencia del suelo frente a la erosión depende de sus propiedades físicas, como la textura y la cohesión. Destacan que los suelos con mayor contenido de arcillas presentan mayor resistencia al desprendimiento por acción del agua, mientras que los que presentan mayor contenido de arena son más vulnerables por la escasa unión entre sus partículas. Una mayor densidad aparente podría limitar la infiltración y favorecer el escurrimiento superficial, potenciando la acción erosiva al coincidir con pendientes pronunciadas y baja cobertura vegetal. Esta idea la complementan, Djoukbala et al. (2024) indican que los suelos con mayor infiltración, contenido de materia orgánica y mejor estructura presentan mayor resistencia a la erosión hídrica. Los bajos valores de densidad aparente registrados en la mayoría de los sitios de la microcuenca muestran condiciones adecuadas para la infiltración, mientras que los valores altos podrían favorecer la escorrentía superficial y aumentar el riesgo de erosión.

La validación del modelo RUSLE en la microcuenca del río Piguchuela mostró un valor de PBIAS de -6.98%, indicando una ligera sobreestimación de la producción de sedimentos, aunque dentro de los rangos aceptables para estudios de erosión. Este resultado evidencia un ajuste satisfactorio entre los valores observados y simulados, lo que respalda la confiabilidad del modelo para representar la dinámica erosiva de la microcuenca.

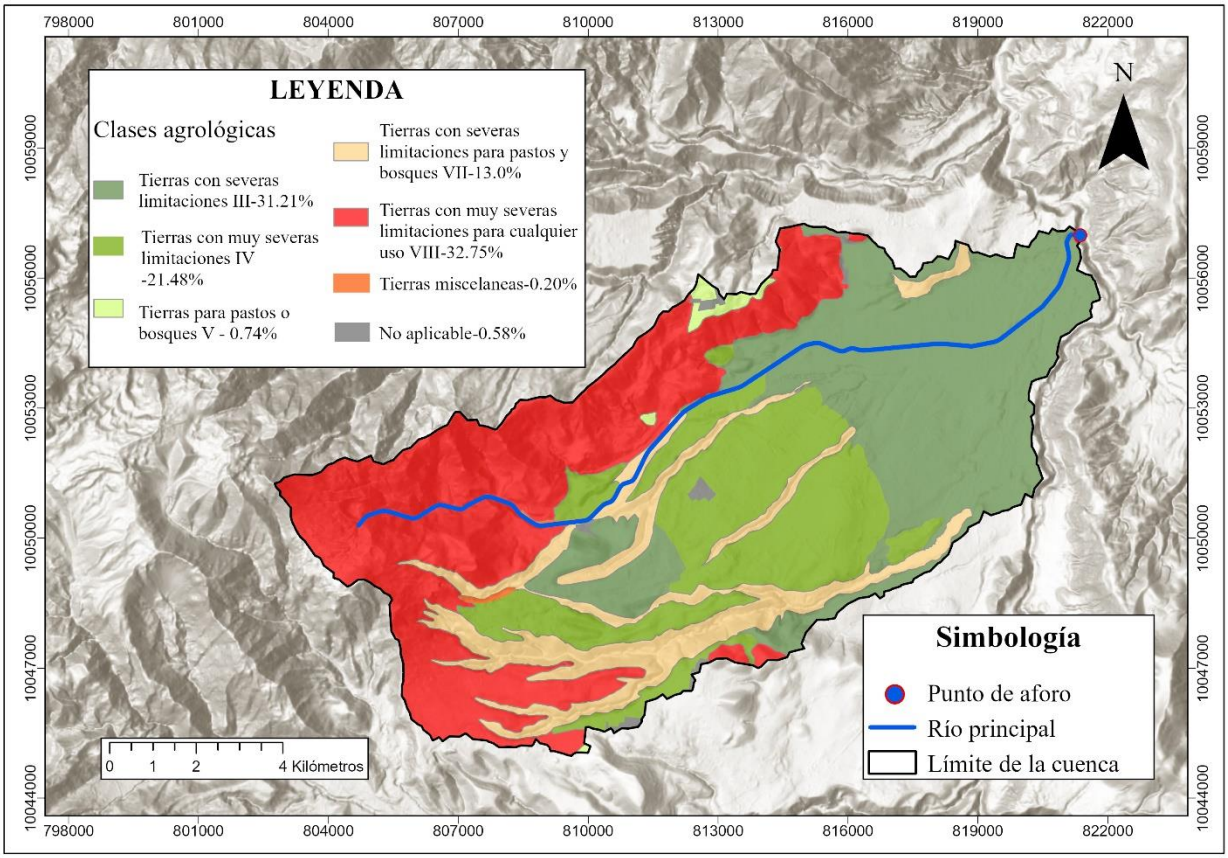
Luvai et al. (2022) señalan que la precisión de las estimaciones obtenidas mediante RUSLE depende de la calidad de la información utilizada para representar los factores climáticos, topográficos, edáficos y de cobertura vegetal. En este sentido, la incorporación de datos de campo y herramientas SIG permitió obtener resultados consistentes y reducir las incertidumbres asociadas a la estimación de la pérdida de suelo. De manera complementaria, Jahun et al. (2015) y Tanyas et al. (2015) destacan que la integración de RUSLE con SIG identifican áreas vulnerables a la erosión y estimar la distribución espacial de la pérdida de suelo. Los resultados obtenidos en la microcuenca del río Piguchuela coinciden con estos planteamientos, ya que el modelo permitió localizar los sectores con mayor susceptibilidad erosiva y representar adecuadamente la producción de sedimentos observada en campo.

4.4. Prácticas de conservación del suelo para mitigar áreas vulnerables a la erosión hídrica

Esta propuesta estratégica se articula con un enfoque integral de gestión territorial, basado en el uso potencial del suelo y las clases agrológicas identificadas en la microcuenca de Piguchuela. A partir de esta clasificación, se establecen prácticas de conservación orientadas a mitigar los procesos de erosión hídrica, priorizando las áreas con mayores limitaciones productivas y mayor susceptibilidad ambiental. En las zonas clasificadas con limitaciones severas a muy severas (clases VII y VIII), ubicadas en sectores de ladera y zonas montañosas, se debe implementar prácticas de conservación como la reforestación con especies nativas, establecer cobertura vegetal permanente y excluir las actividades agropecuarias intensivas. Estas medidas reducirán la escorrentía superficial, aumentando la infiltración y estabilizando el suelo (Figura 8).

En las áreas con limitaciones moderadas (clases IV y V), donde aún es posible el uso agropecuario bajo manejo adecuado, se debe poner en práctica cultivos en el contorno, terrazas, barreras vivas y sistemas agroforestales, para disminuir la pérdida de suelo y mejorar la sostenibilidad productiva.

Figura 8. *Clases agrológicas de la microcuenca del río Piguchuela*

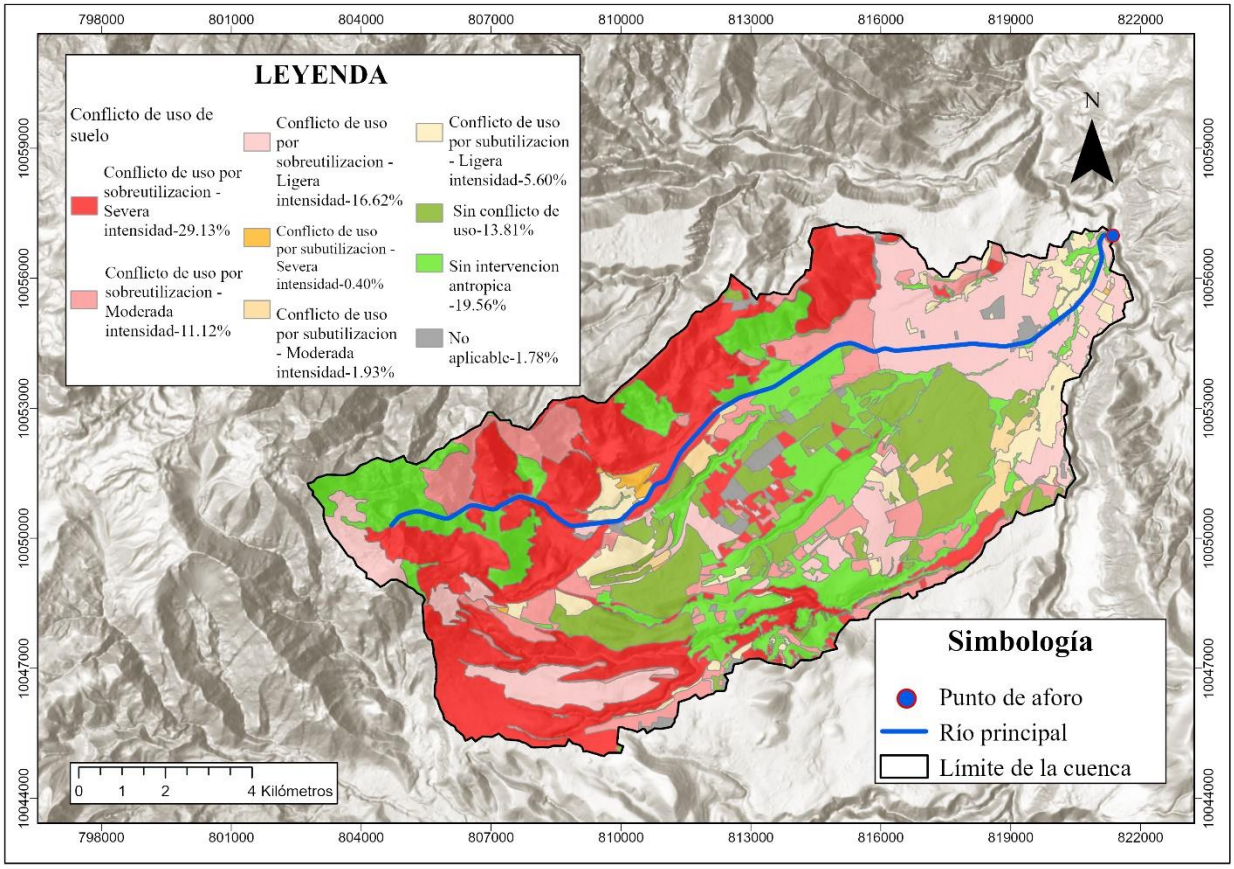


El mapa de conflicto de uso del suelo (Figura 9) evidencia una distribución espacial compleja entre áreas en equilibrio y zonas con uso inadecuado del territorio dentro de la cuenca. Se observa que una proporción del área presenta conflictos por sobreutilización, principalmente en sectores occidentales y suroccidentales, donde predominan categorías de intensidad moderada a severa. Estas zonas corresponden a áreas con importantes limitaciones agrológicas que están siendo sometidas a usos más intensivos de lo que su capacidad permite, lo que incrementa el riesgo de degradación del suelo y de procesos de erosión hídrica. Se identifican áreas con subutilización del suelo, aunque en menor proporción, distribuidas de forma dispersa en la cuenca.

Estas zonas reflejan un uso por debajo de su capacidad productiva, lo que representa una oportunidad para optimizar el aprovechamiento del suelo bajo criterios sostenibles. Las áreas clasificadas como sin conflicto de uso y sin intervención antrópica se concentran principalmente en la zona central y en algunos sectores orientales, donde el uso actual del suelo es acorde con su capacidad agrológica o se mantiene en condiciones naturales. Los conflictos de uso se asocian principalmente a zonas de ladera y áreas con mayores limitaciones físicas, donde el uso inadecuado del suelo intensifica la vulnerabilidad a la erosión. Esta situación resalta la necesidad de implementar prácticas de manejo y conservación del suelo ajustadas a su capacidad de uso, con el fin de reducir los procesos de degradación y promover un desarrollo sostenible en la microcuenca.

La integración del mapa de clases agrológicas con el conflicto de uso del suelo permite identificar las áreas críticas donde el uso actual del territorio no corresponde con su capacidad productiva y sus limitaciones físicas. En la microcuenca, las tierras clasificadas en clases VII y VIII, caracterizadas por presentar limitaciones severas a muy severas, se localizan principalmente en sectores de ladera y zonas montañosas. Estas áreas coinciden con zonas de conflicto por sobreutilización, donde se desarrollan actividades agropecuarias intensivas que superan la capacidad del suelo, incrementando su susceptibilidad a procesos de erosión hídrica y degradación estructural.

Figura 9. Conflictos de uso de suelo



Las clases agrológicas intermedias (IV y V), que presentan limitaciones moderadas y son aptas para usos controlados como pastos o sistemas agroforestales, muestran tanto zonas sin conflicto como áreas con subutilización ligera a moderada. Esto evidencia un potencial desaprovechado del suelo, donde podrían implementarse prácticas productivas sostenibles sin comprometer su estabilidad. Las áreas clasificadas como sin conflicto de uso coinciden, en su mayoría, con suelos cuyo uso actual es acorde con su capacidad agrológica o con zonas sin intervención antrópica, lo que favorece la conservación del recurso suelo y la regulación de los procesos hidrológicos.

Este análisis integrado evidencia que los principales problemas de degradación del suelo en la microcuenca están asociados a la sobreutilización de tierras con alta fragilidad ambiental. Esto resalta la necesidad de orientar el uso del suelo en función de su aptitud, promoviendo prácticas de conservación y manejo sostenible que reduzcan la erosión hídrica y garanticen la sostenibilidad del sistema productivo.

4.4.1. Análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas

Para la gestión adecuada ante la erosión del suelo del río Piguchuela se realizó un análisis FODA en donde se consideraron aquellas características del territorio identificadas en el modelo RUSLE. (Tabla 8)

Tabla 7. Matriz FODA

Fortalezas	**Oportunidades**
F1: El río Piguchuela atraviesa longitudinalmente toda la cuenca, lo que permite el abastecimiento de agua para el desarrollo de actividades agrícolas y ecosistémicas. F2: La cuenca presenta un 19.56% de áreas sin intervención antrópica, lo que representa espacios estratégicos para la conservación ambiental y la regulación hídrica. F3: El 31.21% de la cuenca corresponde a tierras Clase III con severas limitaciones; sin embargo, estas son aptas para actividades agropecuarias bajo un manejo y conservación adecuados. F4: La cuenca cuenta con un porcentaje bajo de erosión de 4.11%	O1: Implementar programas de manejo sostenible del suelo y conservación para reducir los conflictos existentes. O2: Plantear programas agroforestales o reforestación en áreas con limitaciones severas y muy severas (clases VII y VIII). O3: Fortalecer actividades productivas compatibles con la capacidad agrológica del territorio, como la conservación forestal.
Debilidades	**Amenazas**
D1: Gran parte de la cuenca corresponde a tierras con muy severas limitaciones para cualquier uso (Clase VIII: 32.75%), lo que restringe actividades agrícolas intensivas. D2: 29.13% de la cuenca presenta conflictos por uso inadecuado del suelo respecto a su capacidad.	A1: La erosión del suelo incrementa con el avance de la frontera agrícola hacia zonas no aptas puede incrementar provocando pérdida de suelo y deslizamientos. A2: La sobreutilización del suelo puede provocar, disminución de fertilidad y pérdida de productividad.

D3: Las áreas con pendientes pronunciadas aumentan la susceptibilidad a erosión y degradación del suelo.	A3: El uso inadecuado del suelo podría generar sedimentación del río principal y deterioro de la calidad del agua.

4.4.2. Diseño de estrategias

Obtenidas las unidades hidrológicas de la microcuenca del río Puguchuela, se consideró que el uso inadecuado del suelo y el avance de la frontera agrícola constituyen algunos de los principales factores responsables de la degradación acelerada de los ecosistemas. Como respuesta a esta problemática, se establecieron tres estrategias vinculadas con la zonificación de la vulnerabilidad erosiva. La planificación de la cuenca toma como referencia la aplicación de la matriz FODA, herramienta que permite realizar una síntesis diagnóstica precisa para orientar las acciones de recuperación y manejo sostenible (Tabla 9).

Tabla 8. Matriz de estrategias FA, FO, DO, DA derivadas del análisis FODA de la microcuenca del rio Piguchuela

Combinación	Estrategia
F1 + O2	Utilizar el recurso hídrico del río Piguchuela para impulsar proyectos de reforestación y sistemas agroforestales en zonas con limitaciones severas y muy severas.
F3 + O3	Fortalecer actividades agropecuarias sostenibles y pastoreo controlado en las tierras Clase III, bajo prácticas adecuadas de manejo y conservación.
D2 + O1	Desarrollar programas de manejo sostenible del suelo para reducir los conflictos por sobreutilización severa presentes en la cuenca.
D3 + O2	Promover la reforestación y sistemas agroforestales en zonas con pendientes pronunciadas para disminuir la erosión y degradación del suelo.
D2 + A2	Implementar prácticas de conservación y manejo sostenible para disminuir la degradación ambiental y la pérdida de fertilidad causada por la sobreutilización del suelo.
D1 + A3	Controlar el uso inadecuado de las tierras Clase VIII para evitar procesos de erosión, sedimentación y deterioro de la calidad del agua del río Piguchuela.

4.4.2.1. ***Estrategia 1:*** *Promover la reforestación y sistemas agroforestales en zonas con pendientes pronunciadas para disminuir la erosión y degradación del suelo*

Justificación: La cuenca del río Piguchuela presenta áreas con pendientes pronunciadas y conflictos de uso del suelo que incrementan los procesos erosivos y la degradación ambiental. La implementación de programas de reforestación y sistemas agroforestales permitirá mejorar la cobertura vegetal, reducir la pérdida de suelo y fortalecer la regulación hídrica de la cuenca.

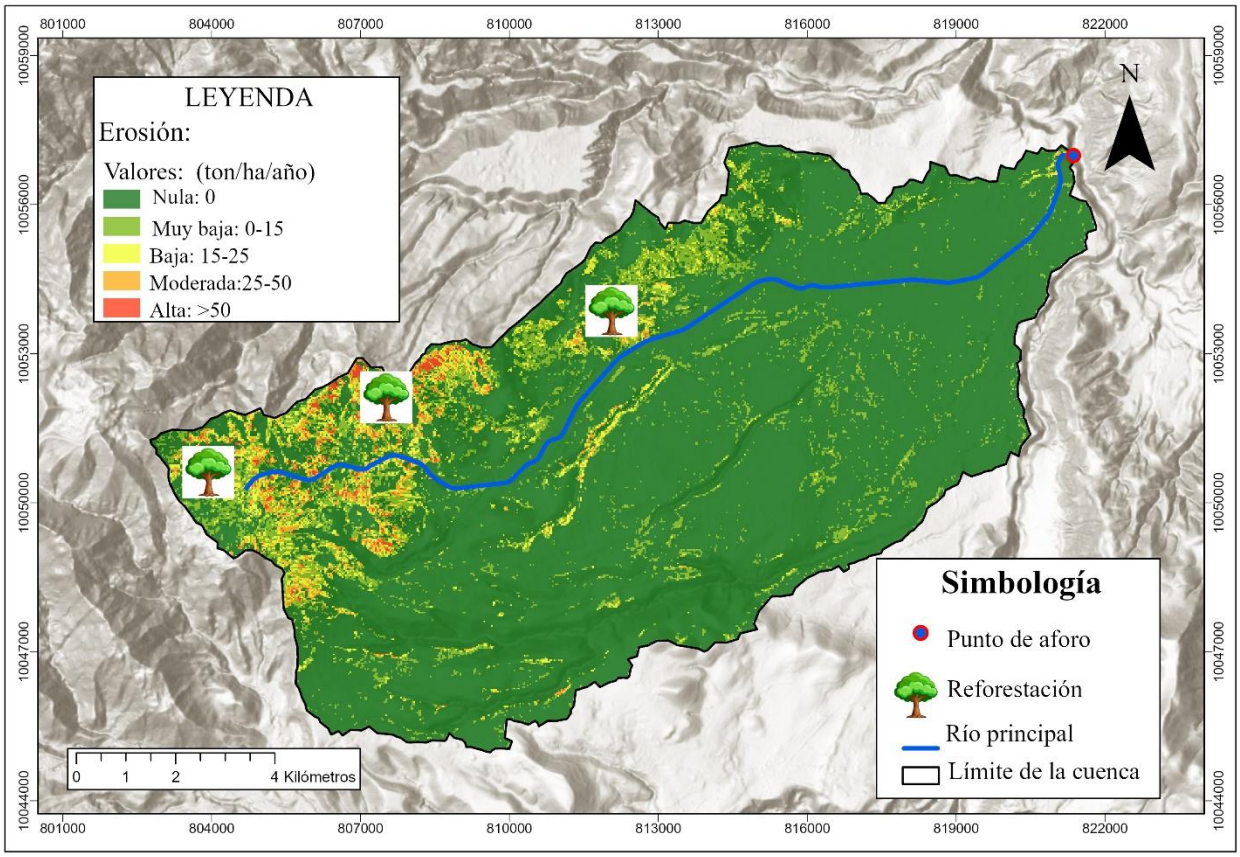
Objetivo: Reducir los procesos de erosión y degradación del suelo con la implementación de actividades de reforestación y sistemas agroforestales en zonas vulnerables de la cuenca del río Piguchuela.

Meta: Establecer sistemas agroforestales en las zonas susceptibles a la erosión dentro de la cuenca, incrementando la cobertura vegetal y mejorando la conservación del suelo y agua.

Tabla 9. Tabla operativa para la ejecución de la estrategia 1

Actividades	Indicadores	Medios de verificación	Responsables
Identificar las zonas con pendientes de 14° a 21° que presentan susceptibilidad a la erosión.	Número de áreas identificadas y delimitadas.	Mapas temáticos, informes técnicos	GAD Municipal, técnicos ambientales, investigadores.
Reforestación con especies nativas.	Especies Nativas seleccionadas.	Cronograma de reforestación e inventarios forestales.	Ministerio del Ambiente, GAD Municipal, comunidad local.
Implementar sistemas agroforestales en áreas intervenidas.	Hectáreas con sistemas agroforestales establecidos.	Informes de campo y registros fotográficos.	Productores locales, MAG, organizaciones comunitarias.
Capacitar a la población sobre conservación del suelo y manejo sostenible.	Número de capacitaciones realizadas y participantes.	Listas de asistencia, memorias técnicas y fotografías.	Instituciones públicas, Estudiante UTN y organizaciones ambientales.
Monitoreo de cobertura vegetal y reducción de erosión.	Porcentaje de recuperación vegetal y disminución de áreas erosionadas.	Informes de monitoreo, fotografías comparativas y análisis técnicos.	Técnicos ambientales, GAD Municipal, comunidad local.

Figura 10. Puntos de ubicación de la estrategia de reforestación



4.4.2.2. ***Estrategia 2:*** *Implementar prácticas de conservación y manejo sostenible para disminuir la degradación ambiental y la pérdida de fertilidad causada por la sobreutilización del suelo*

Justificación: En la cuenca del río Piguchuela existen conflictos por uso inadecuado del suelo, aumentando los procesos de erosión del suelo y disminución de la fertilidad. Aplicar prácticas de conservación y manejo sostenible recuperará y reducirá los impactos ambientales y promoverá un uso acorde con la capacidad agrológica del territorio.

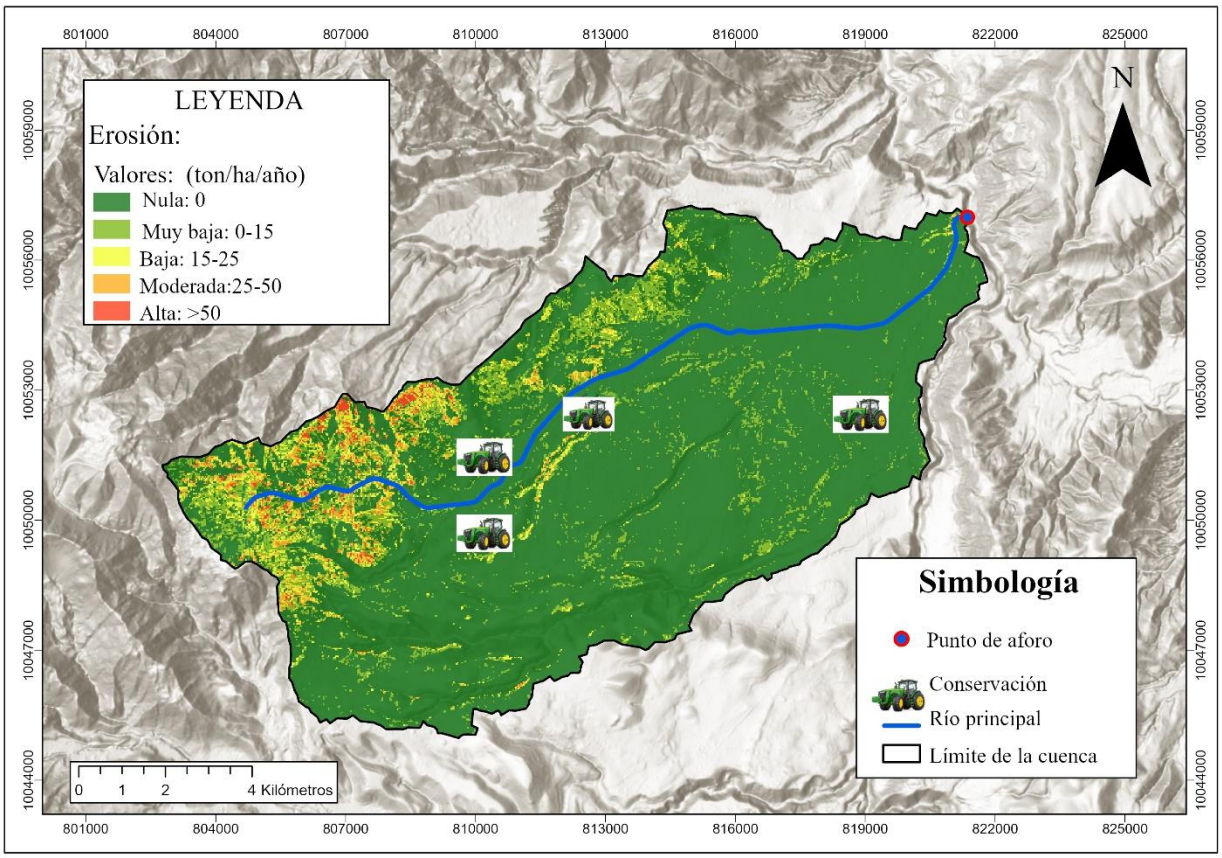
Objetivo: Disminuir la perdida de fertilidad del suelo mediante la implementación de prácticas de conservación y manejo sostenible en las áreas sobreutilizadas de la cuenca del río Piguchuela.

Meta: Implementar prácticas de manejo sostenible en las áreas con conflictos de sobreutilización, para reducir la erosión y promover la recuperación de la fertilidad del suelo.

Tabla 10. Tabla operativa para la ejecución de la estrategia 2

Actividades	Indicadores	Medios de Verificación	Responsables
Implementar prácticas de conservación como terrazas, barreras vivas y cultivos en contorno.	Número de prácticas implementadas y hectáreas intervenidas.	Registros fotográficos, informes técnicos y visitas de campo.	MAG, productores locales y comunidad.
Capacitar a los productores sobre manejo sostenible y conservación del suelo.	Número de capacitaciones realizadas y participantes capacitados.	Listas de asistencia, memorias técnicas y fotografías.	Instituciones públicas, universidades y organizaciones comunitarias.
Promover el uso adecuado del suelo de acuerdo con su capacidad agrológica.	Porcentaje de áreas manejadas según su capacidad de uso.	Informes de evaluación y monitoreo territorial.	GAD Municipal, MAG y técnicos ambientales.
Monitorear la recuperación de la fertilidad y reducción de erosión en las áreas intervenidas.	Disminución de áreas erosionadas y mejora de indicadores de fertilidad.	Informes de monitoreo, análisis de suelo y registros fotográficos.	Técnicos ambientales, comunidad local y entidades competentes.

Figura 11. Puntos de ubicación para estrategia 2



4.4.2.3. ***Estrategia 3:*** *Controlar el uso inadecuado de las tierras Clase VIII para evitar procesos de erosión, sedimentación y deterioro de la calidad del agua del río Piguchuela*

Justificación: Debido a la topografía montañosa y la identificación de puntos de concentración con erosión moderada y alta (>25 ton/ha/año), es necesario implementar medidas de control biomecánico del agua y regulación del uso del suelo en las tierras Clase VIII, con el fin de reducir los procesos erosivos, la sedimentación y el deterioro de la calidad hídrica del río Piguchuela.

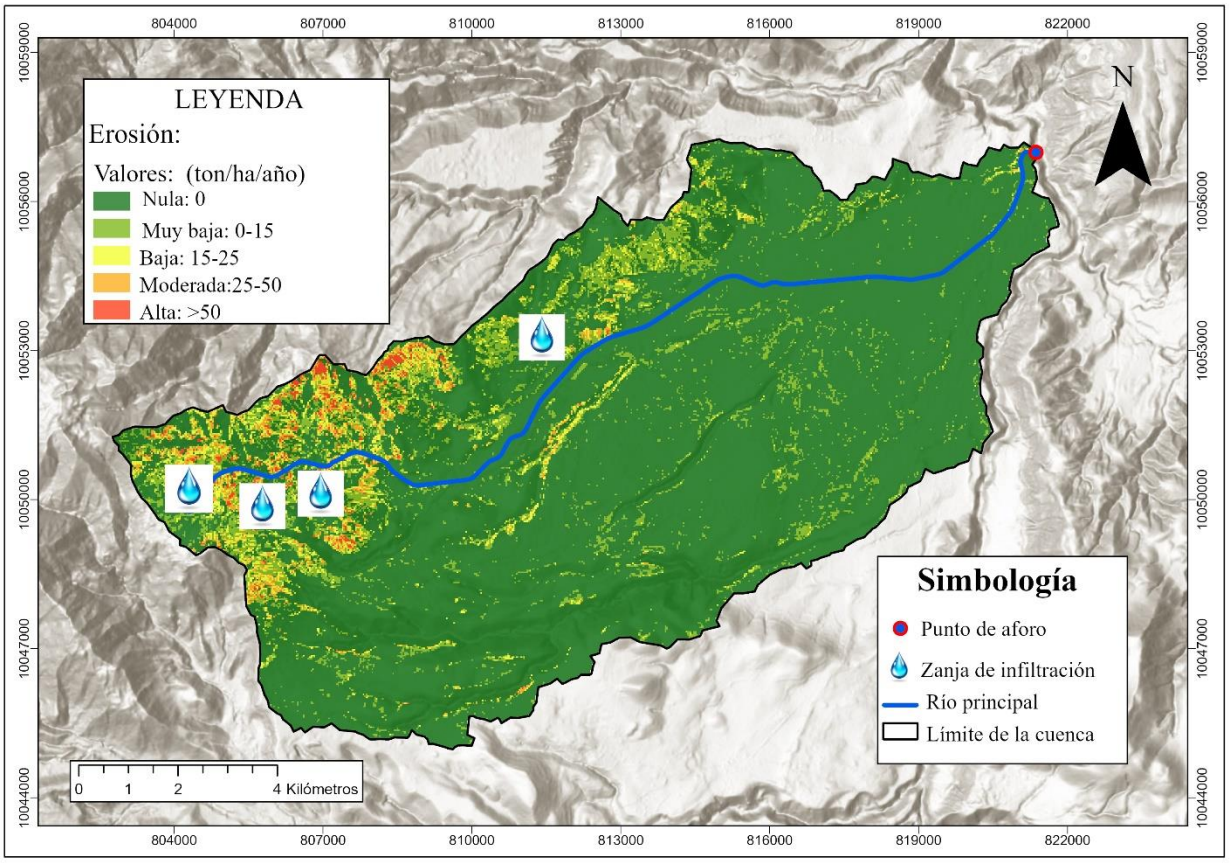
Objetivo: Disminuir los procesos de erosión y sedimentación mediante el control del uso inadecuado de las tierras Clase VIII y la implementación de prácticas de conservación y control de escorrentía en la cuenca del río Piguchuela.

Meta: Construir zanjas de infiltración en las áreas con mayor susceptibilidad a erosión para disminuir la pérdida de suelo y mejorar la infiltración de agua en la cuenca.

Tabla 11. Tabla operativa para la ejecución de la estrategia 3

Actividades	Indicadores	Medios de verificación	Responsables
Diseñar zanjas de infiltración de acuerdo con las condiciones topográficas y del suelo.	Número de diseños elaborados.	Planos técnicos y memorias de diseño.	Técnicos hidráulicos y ambientales.
Construir zanjas de infiltración en las áreas priorizadas.	Metros lineales de zanjas construidas.	Registros fotográficos, informes técnicos y actas de obra.	GAD Municipal, comunidad local y MAG.
Realizar mantenimiento periódico de las zanjas para garantizar su funcionamiento.	Número de mantenimientos realizados por año.	Informes de mantenimiento y registros fotográficos.	Comunidad local y GAD Municipal.
Monitorear la reducción de erosión y sedimentación en las zonas intervenidas.	Disminución de áreas erosionadas y sedimentos transportados.	Informes de monitoreo, análisis técnicos y fotografías comparativas.	Técnicos ambientales, universidades y entidades competentes.

Figura 12. Puntos de ubicación de la estrategia 3



4.5. Socialización de las medidas de conservación con actores locales

La socialización de resultados se dirigió a los actores vinculados con el uso y manejo del suelo en la microcuenca del río Piguchuela. En esta actividad participaron representantes de la Asociación de Cañicultores de Imbabura y Carchi, las asociaciones de productores Santa Catalina, El Progreso, Trabajadores Autónomos y presidentes de los barrios asentados dentro del área de estudio. Fueron presentados los resultados que se obtuvieron tras aplicar el modelo RUSLE, se resaltó la zonificación de la erosión hídrica, la clasificación de las clases agrológicas, el análisis de conflicto de uso del suelo y la identificación de las zonas con mayor vulnerabilidad a los procesos erosivos. Se dio a conocer las tres estrategias de conservación propuestas para la microcuenca, que tienen el objetivo de promover el manejo sostenible del suelo.

Acorde la capacidad del uso del suelo se explicó la importancia de implementar prácticas de conservación. Entre las principales medidas presentadas se incluyeron la

reforestación con especies nativas, el establecimiento de sistemas agroforestales, la construcción de terrazas agrícolas, barreras vivas, cultivos en contorno y zanjas de infiltración. Se generó un espacio de intercambio entre los participantes, quienes compartieron sus experiencias relacionadas con el manejo agrícola de la cuenca. Los asistentes conocieron las zonas de intervención y las prácticas de manejo recomendadas para cada territorio, fortaleciendo los resultados de la investigación y promoviendo la toma de decisiones basada en criterios técnicos para la gestión de la microcuenca del río Piguchuela.

La socialización se respaldó mediante registros fotográficos, listas de asistencia y un acta de la reunión, documentos que evidencian la participación de los representantes de la Asociación de Cañicultores de Imbabura y Carchi, de las asociaciones de productores y de los presidentes barriales (Anexo 21).

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- En la microcuenca del río Piguchuela, la aplicación del modelo RUSLE para calcular la pérdida de suelo causada por erosión hídrica evidenció una distribución espacial heterogénea de los procesos erosivos. La validación del modelo mediante sedimentos suspendidos mostró un valor de PBIAS de 2.34%, confirmando la confiabilidad del modelo para estimar la pérdida de suelo y dar a conocer que la microcuenca presenta una pérdida de suelo baja, con áreas de erosión alta que requieren intervención prioritaria.
- La zonificación del riesgo de erosión hídrica permitió identificar que las áreas con mayor susceptibilidad se localizan en las zonas de ladera y sectores occidentales de la microcuenca del río Piguchuela, donde las pendientes pronunciadas, la menor cobertura vegetal y los conflictos de uso del suelo favorecen pérdidas de suelo superiores a 50 ton/ha/año. En contraste, las áreas con cobertura vegetal adecuada y pendientes suaves presentan niveles de erosión muy bajos o nulos.
- Se establecieron seis estrategias de manejo, seleccionándose tres orientadas a la reforestación, la conservación del suelo y el control de su uso inadecuado. Estas se basaron en los principales factores de erosión hídrica de la microcuenca del río Piguchuela. Se identificó mayor riesgo de erosión en zonas con clases agrológicas VII y VIII y en áreas sobreutilizadas. Como respuesta, se propusieron medidas como la reforestación con especies nativas, la cobertura vegetal permanente, los sistemas agroforestales, las terrazas y los cultivos en contorno para reducir la escorrentía, mejorar la infiltración y conservar la estabilidad del suelo.

5.2. Recomendaciones

- Con base en la estimación de la pérdida de suelo mediante el modelo RUSLE, se debe implementar un programa permanente de monitoreo de erosión hídrica y producción de sedimentos en la microcuenca del río Piguchuela, en las áreas que registraron pérdidas superiores a 50 ton/ha/año. Esto permitirá evaluar la evolución de los procesos erosivos y generar información actualizada para la toma de decisiones en la gestión y conservación del recurso suelo.
- Priorizar las acciones de manejo y conservación en los sectores occidental y de ladera de la microcuenca, donde se identificaron las mayores condiciones de susceptibilidad erosiva con base en la zonificación del riesgo de erosión hídrica. Es necesario incorporar los resultados obtenidos en los procesos de planificación territorial y ordenamiento del uso del suelo, con el fin de reducir los conflictos por sobreutilización y disminuir la degradación de los recursos naturales.
- Con base en las estrategias de conservación propuestas, se debe promover la implementación de prácticas de manejo sostenible del suelo, como la reforestación con especies nativas, establecer cobertura vegetal permanente, sistemas agroforestales, terrazas y cultivos en contorno en las áreas clasificadas dentro de las clases agrológicas VII y VIII. Estas acciones reducirán la escorrentía superficial, incrementará la infiltración del agua, disminuirá la pérdida de suelo y fortalecerá la sostenibilidad de la microcuenca.

Referencias

Alatorre, L., y Beguería, S. (2009). Los modelos de erosión: una revisión. Revista C&G, 23(1-2), 29-48.

Amundson, R., Berhe, A., Hopmans, J., Olson, C., Sztein, A., y Sparks, D. (2015). Soil and human security in the 21st century. *Science*, *348*(6235), 1261071.

Arias, P., Escolano, S., y Saz, M. (2023). 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), 207.230.

ASTM International. (2019). https://store.astm.org/d3977-97r19.html.

Ayma, S. (2023). Evaluación de la Tasa Promedio Anual por Erosión Hídrica Mediante los Modelos SWAT y USLE en la Cuenca Cusiqocha, Distrito Chinchero, Provincia Urubamba - Departamento Cusco, 2022. https://orcid.org/0009-0001-6152-5236.

Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J. A. A., Baartman, J., Ballabio, C., y Panagos, P. (2021). Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Science of the total environment*, 780, 146494.

Casanova, G., Delgado, D., y Panchana, R. (2024). Estimación de volúmenes de sedimentos por erosión hídrica empleando el modelo RUSLE en cuencas de la provincia de Manabí, Ecuador. *Revista de Teledetección*, (63), 1-21.

Casas, R., Godagnome, R., y Fuente, J. (2022). Evaluación y cartografía de la erosión hídrica en la Argentina. *Revista de Investigaciones Científicas de la Universidad de Morrón*, 6(11), 24-38.

Cotler, H., Corona, J., y Galeana, J. (2020). Erosión de suelos y carencia alimentaria en México: una primera aproximación. Investigaciones geográficas, (101), 1-14.

Croke, J., y Nethery, M. (2006). Modelling runoff and soil erosion in logged forests: Scope and application of some existing models. CATENA, 67(1), 35–49.

Ebrahimzadeh, S., Motagh, M., Mahboub, V., y Mirdar Harijani, F. (2018). An improved RUSLE/SDR model for the evaluation of soil erosion. Environmental Earth Sciences, 77(12), 1–17.

Echavarría, F., Medina, G., y Ruiz, J. (2020). Efecto en la erosión hídrica del suelo en pastizales y otros tipos de vegetación por cambios en el patrón de lluvias por el calentamiento global en Zacatecas. Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias, 11(2), 63-74.

Darbayeva, T., Ramazanova, N., Chashina, B., Berdenov, Z., Mendybayev, E., Wendt, J. A., y Atasoy, E. (2020). Modeling soil erosion in the Chagan river basin of the west Kazakhstan with using RUSLE and GIS tools. Journal of Environmental Biology, 41(2), 396-404.

Djoukbala, O., Djerbouai, S., Alqadhi, S., Hasbaia, M., Benselama, O., Abdo, H., y Mallick, J. (2024). A geospatial approach-based assessment of soil erosion impacts on the dams silting in the semi-arid region. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, *15*(1), 2375543.

Fernández, R., Mateos, L., y Giráldez, J. (2004). Furrow irrigation erosion and management. Irrigation Science, 23(3), 123–131.

Gaitán, J., Navarro, M., Vuegen, L., Pizarro, M., Carfagno, P., y Rigo, S. (2017). Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina. Colección: Investigación, desarrollo e innovación INTA. Ediciones INTA.

Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Imbabura. (2017). Plan provincial de riego y drenaje de Imbabura 2017–2037. GAD Provincial de Imbabura. https://www.imbabura.gob.ec/phocadownload/K-Planes-programas/Plan_Provincial_De_Riego_Y_Drenaje_De_Imbabura_2017_2037.pdf.

Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Imbabura. (2021). Cuencas, subcuencas y microcuencas hidrográficas de Imbabura. GAD Provincial de Imbabura. https://imbabura.gob.ec.

Gómez, M. (2012). Modelado gravimétrico tridimensional del Macizo Norpatagónico. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de la Plata].

Hairsine, P., y Rose, C. (1991). Rainfall detachment and deposition: Sediment transport in the absence of flow-driven processes. Soil Science Society of America Journal, 55(2), 320-324.

Huerta, J., Oropeza, J., Guevara, R., Ríos, J., Martínez, M., Barreto, O., ... y Mancilla Villa, O. (2018). Efecto de la cobertura vegetal de cuatro cultivos sobre la erosión del suelo. Idesia (Arica), 36(2), 153-162.

Igwe, P., Onuigbo, A., Chinedu, O., Ezeaku, I., y Muoneke, M. (2017). Soil erosion: A review of models and applications. International Journal of Advanced Engineering Research and Science, 4(12), 237341.

Issaka, S., y Ashraf, M. (2017). Impact of soil erosion and degradation on water quality: a review. Geology, Ecology, and Landscapes, 1(1), 1-11.

Jahun, B., Ibrahim, R., Dlamini, N., y Musa, S. (2015). Review of soil erosion assessment using RUSLE model an GIS. Journal of Biology, Agricultura and Healthcare, 5(9), 36-47.

Karydas, C., Panagos, P., y Gitas, I. Z. (2014). A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics. International Journal of Digital Earth, 7(3), 229-250.

Ketema, A., y Dwarakish, G. (2021). Water erosion assessment methods: a review. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 27(4), 434-441.

Lal, R. (2008). Soils and sustainable agriculture. A review. Agronomy for Sustainable Development, 28(1), 57-64.

Li, H., Zhu, H., Wei, X., Liu, B., y Shao, M. (2021). Soil erosion leads to degradation of hydraulic properties in the agricultural region of Northeast China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 314, 107388.

Liu, Y., Fu, B., Lü, Y., Wang, Z., & Gao, G. (2012). Hydrological responses and soil erosion potential of abandoned cropland in the Loess Plateau, China. Geomorphology, 138(1), 404-414.

Lambin, E. (1997). Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. Progress in physical geography, 21(3), 375-393.

Luvai, A., Obiero, J., y Omuto, C. (2022). Soil loss assessment using the revised universal soil loss equation (RUSLE) model. Applied and Environmental Soil Science, 2022(1), 2122554.

Montoya, J. (2009). Marco histórico y estado del arte de los modelos de evolución del paisaje y de erosión. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 8(15), 47-57.

Moore, I., y Wilson, J. (1992). Length-slope factors for the revised universal soil loss equation: simplified method of estimation. Journal of Soil & Water Conservation, 47(5), 423–428. https://doi.org/10.1080/00224561.1992.12456740.

Martínez, A., Carrillo, J., Lombana, L., Criado, M., y Palacios, C. (2021). Mapping the risk of water soil erosion in Larrodrigo (Salamanca, Spain) using the RUSLE model and A-DInSAR technique. *Agronomy*, *11*(11), 2120.

Nájera, O., Bojórquez, J., Flores, F., Murray, R., y González, A. (2016). Riesgo de erosión hídrica y estimación de pérdida de suelo en paisajes geomorfológicos volcánicos en México. Cultivos tropicales, 37(2), 45-55.

Nearing, M. (2013). Soil Erosion and Conservation. Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity: Second Edition, 365–378.

Nikulin, C., y Becker, G. (2015). Una metodología Sistémica y creativa para la gestión estratégica: Caso de Estudio Región de Atacama-Chile. Journal of Technology Management& Innovation, 10(2), 127–144. https://doi.org/10.4067/S0718-27242015000200009.

Pijl, A., Reuter, L., Quarella, E., Vogel, T., y Tarolli, P. (2020). GIS-based soil erosion modelling under various steep-slope vineyard practices. CATENA, 193, e104604.

Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., y Blair, R. (1995). Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. Science, 267(5201), 1117-1123.

Ramírez, J. (2015). Alternativas de manejo sustentable de la subcuenca del río Pitura, provincia de Imbabura, Ecuador [Tesis de maestría, Universidad Nacional de La Plata]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de La Plata. https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/49801.

Ramos, B., y Sánchez, E. (2023). Estimación de la pérdida de suelo utilizando el modelo USLE y herramientas SIG, en la microcuenca del río Puela, cantón Penipe. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Chimborazo].

Renald, K., Foster, G., Yoder, D., y McCool, D. (1994). RUSLE revisited: Status, questions, answers, and the future. Journal of Soil and Water Conservation, 49(3), 213–220. https://www.jswconline.org/content/49/3/213.

Renard, K., y Freimund, J. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. Journal of hydrology, 157(1-4), 287-306.

Rosales, O. (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 posgrado, UNIGIS].

Tanyaş, H., Kolat, Ç., y Süzen, M. L. (2015). A new approach to estimate cover-management factor of RUSLE and validation of RUSLE model in the watershed of Kartalkaya Dam. Journal of Hydrology, 528, 584-598.

Stallard, R. (1995). Tectonic, environmental, and human aspects of weathering and erosion: a global review from a steady-state perspective. Annual Review Of Earth And Planetary Sciences, 23,11-40.

Serbaji, M., Bouaziz, M., y Weslati, O. (2023). Soil Water erosion modeling in Tunisia using RUSLE and GIS integrated approaches and Geospatial Data. Land, 12(3), 548.

Telford W., Geldart L., y Sheriff, R., (1990). Applied Geophysics, Second edition. Cambridge University Press.

Terán, G. (2018). Caracterización poblacional de la cuenca hidrográfica Mira-Mataje. Sathiri: Sembrador, 13(1), 140–152. https://doi.org/10.32645/13906925.745.

Tsegaye, L., y Bharti, R. (2021). Soil erosion and sediment yield assessment using RUSLE and GIS-based approach in Anjeb watershed. SN Applied Sciences, 3(5), 1–19.

Weldeslassie, T., Naz, H., Singh, B., y Oves, M. (2017). Chemical contaminants for soil, air and aquatic ecosystem. In Modern age environmental problems and their remediation (pp. 1-22). Cham: Springer International Publishing.

Williams, M. (2012). River sediments. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 370(1966), 2093-2122.

Wischmeier, W., y Smith, D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.

Woldemariam, G., Yasin, K., y Iguala, A. (2023). Water erosion risk assessment for conservation planning in the East Hararghe Zone, Ethiopia. Geosciences, 13(6), 184.

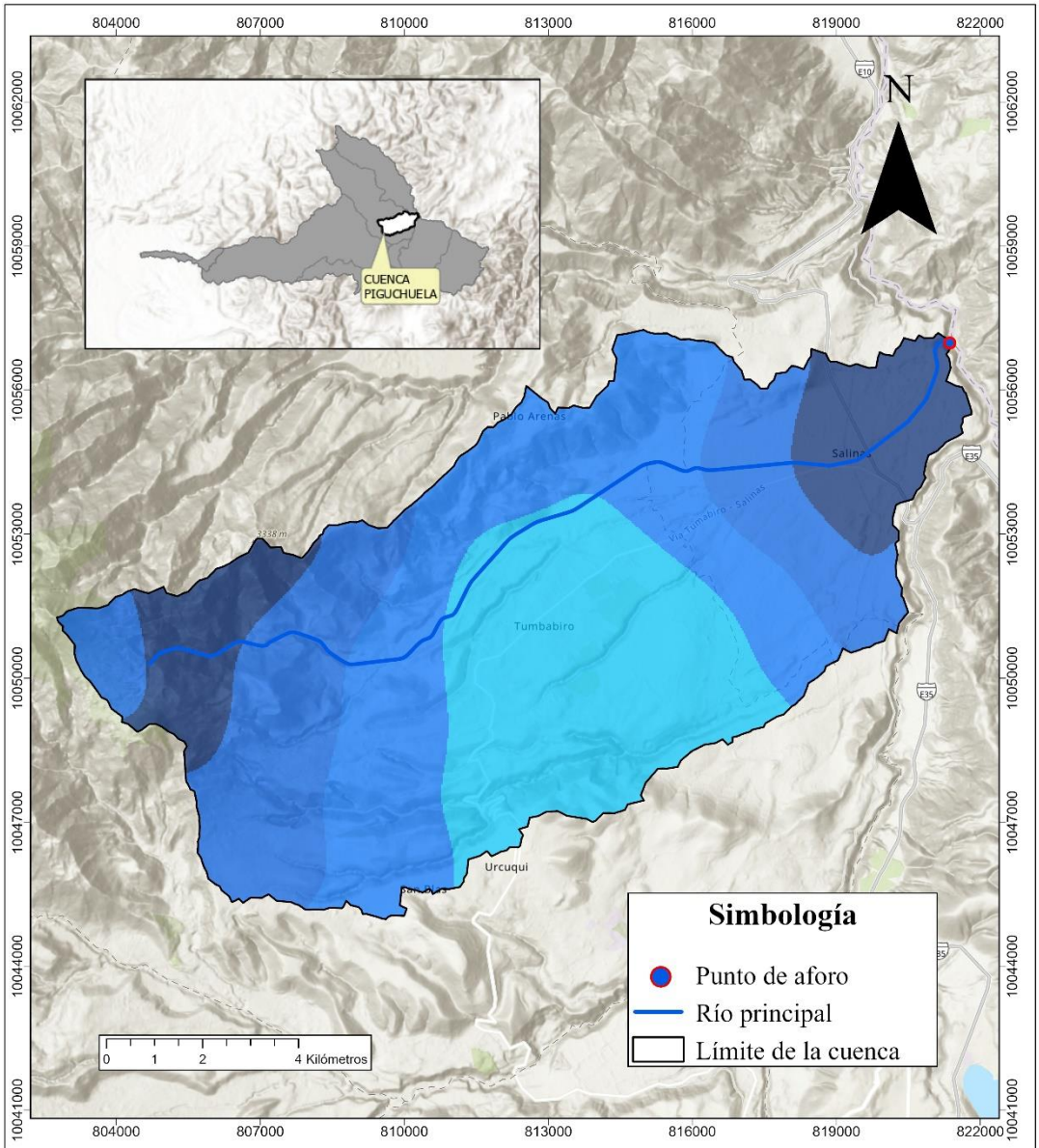
Xiaoping, Y., y Eitel, B. (2016). Understanding the interactions between climate change, landscape evolution, surface processes and tectonics in the Earth System: What can the studies of Chinese deserts contribute? Acta Geologica Sinica-English Edition, 90(4), 1444-1454.

Xiong, M., Leng, G., y Tang, Q. (2023). Global analysis of the cover-management factor for soil erosion modeling. Remote Sensing, 15(11), 2868.

Xiong, M., Sun, R., y Chen, L. (2018). Effects of soil conservation technique on water erosion control: A global analysis. Science of the Total Environment, 645, 753-760.

Anexos

Anexo 1. Mapa del Factor R del modelo RUSLE



Factor R

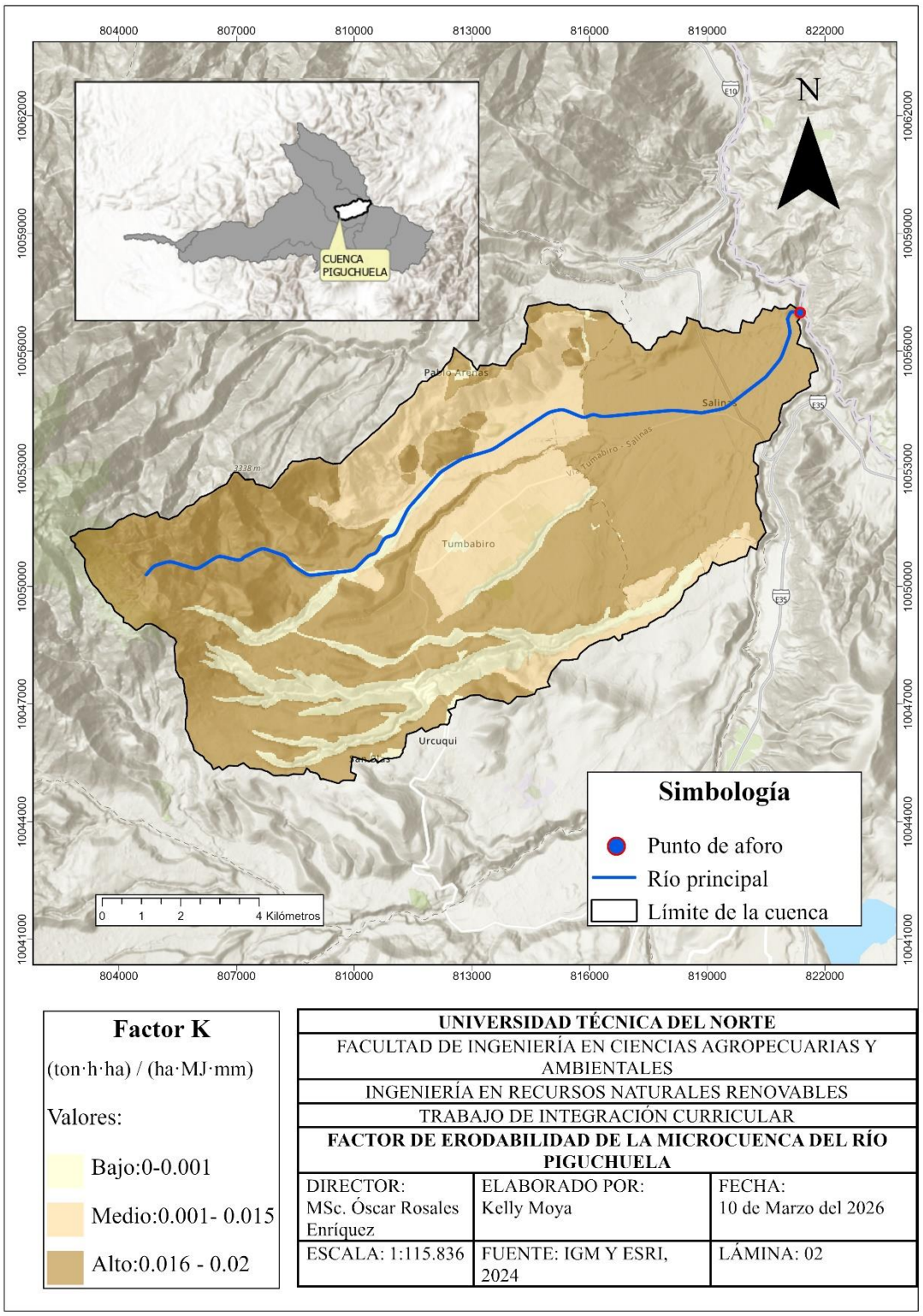
(ton·h·ha) / (ha·MJ·mm)

Valores:

- Baja erosividad:<320
- Moderada erosividad:320-365
- Media erosividad:365-415
- Alta erosividad: > 415-501

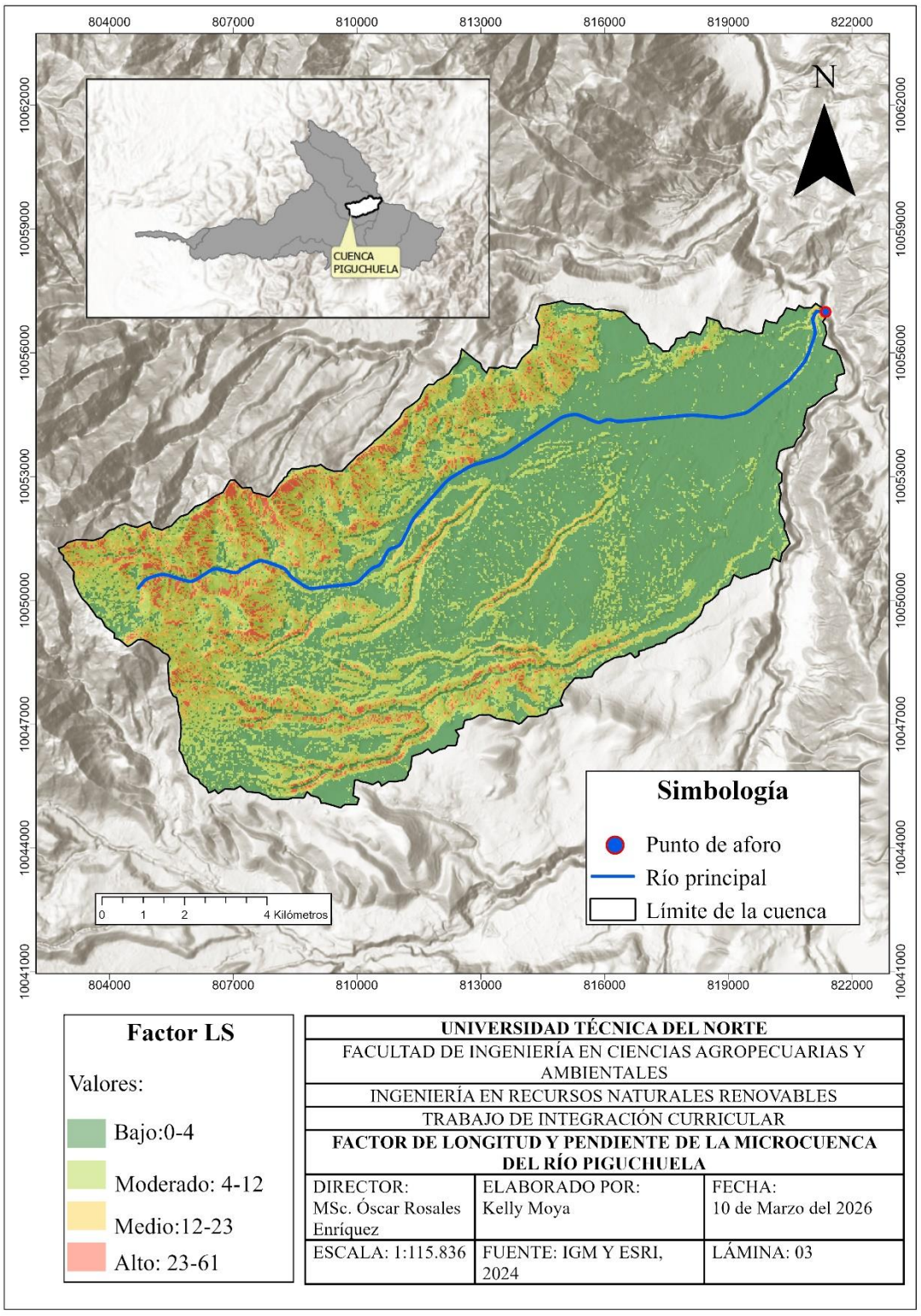
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE		
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES		
INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES		
TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		
FACTOR EROSIVIDAD DE LA LLUVIA DE LA MICROCUENCA DEL RÍO PIGUCHUELA		
DIRECTOR: MSc. Óscar Rosales Enríquez	ELABORADO POR: Kelly Moya	FECHA: 10 de Marzo del 2026
ESCALA: 1:115.836	FUENTE: IGM Y ESRI, 2024	LÁMINA: 01

Anexo 2. Mapa del Factor K del modelo RUSLE

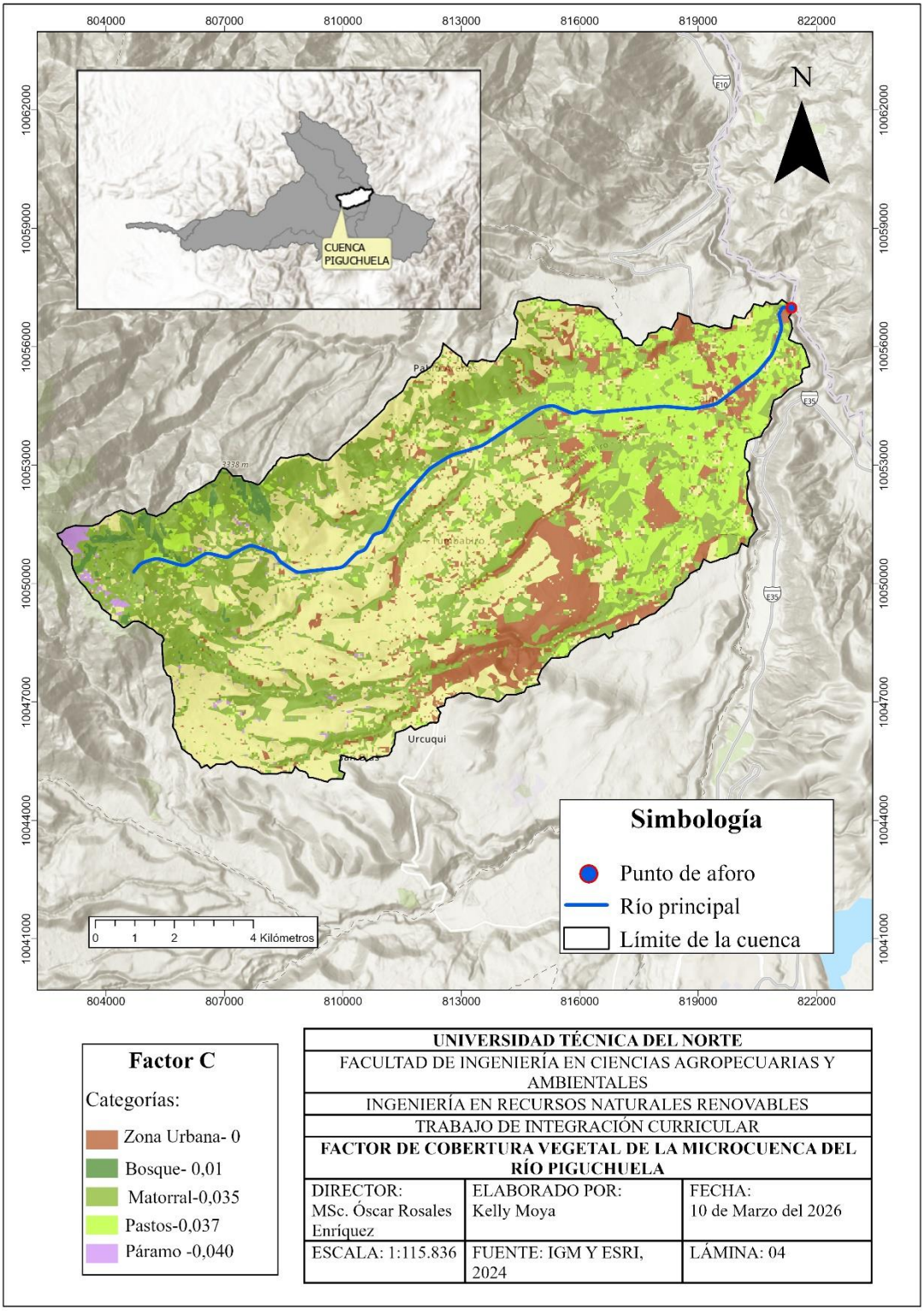


UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE		
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES		
INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES		
TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		
FACTOR DE ERODABILIDAD DE LA MICROCUENCA DEL RÍO PIGUCHUELA		
DIRECTOR: MSc. Óscar Rosales Enríquez	ELABORADO POR: Kelly Moya	FECHA: 10 de Marzo del 2026
ESCALA: 1:115.836	FUENTE: IGM Y ESRI, 2024	LÁMINA: 02

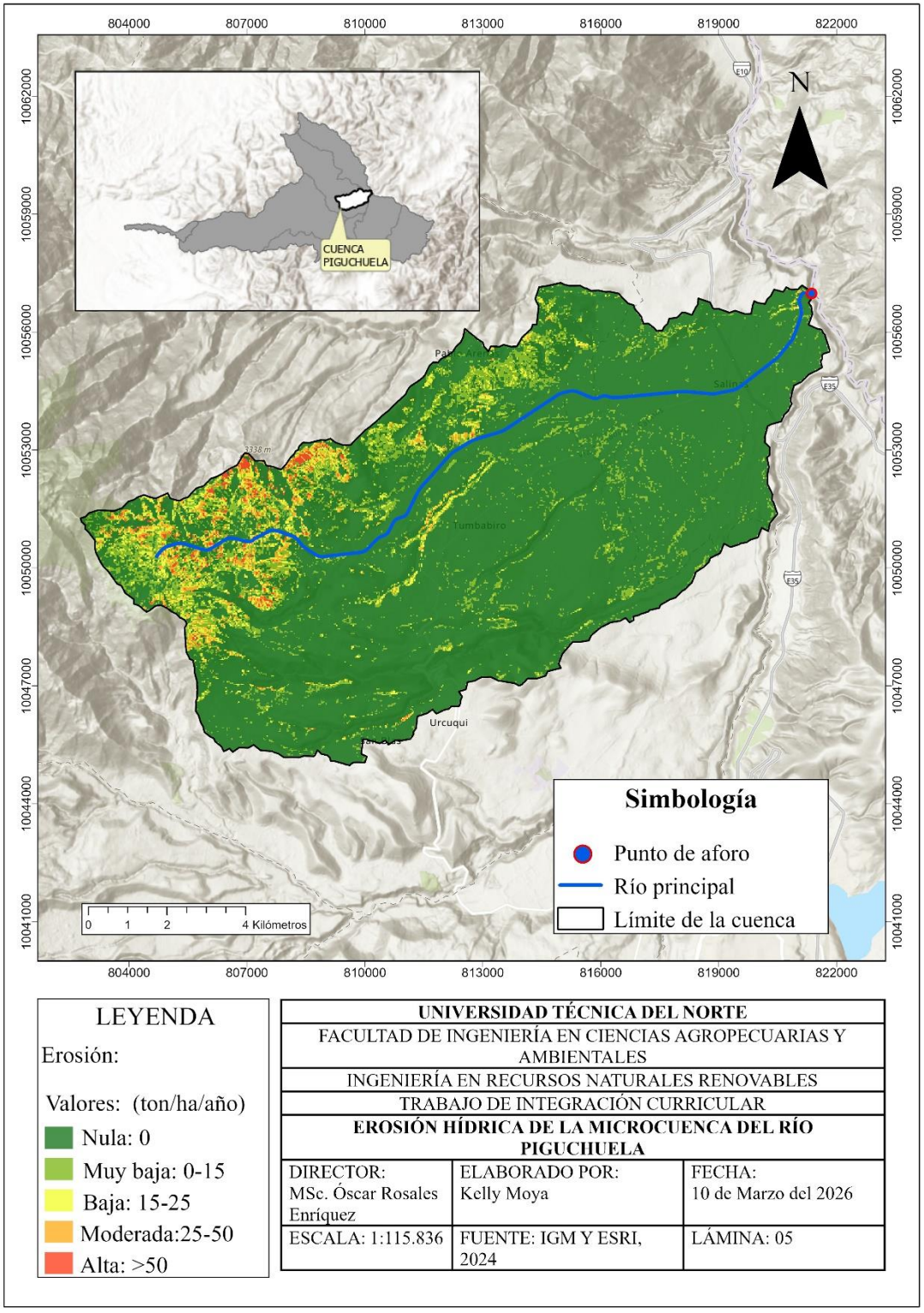
Anexo 3. Mapa del Factor C del modelo RUSLE



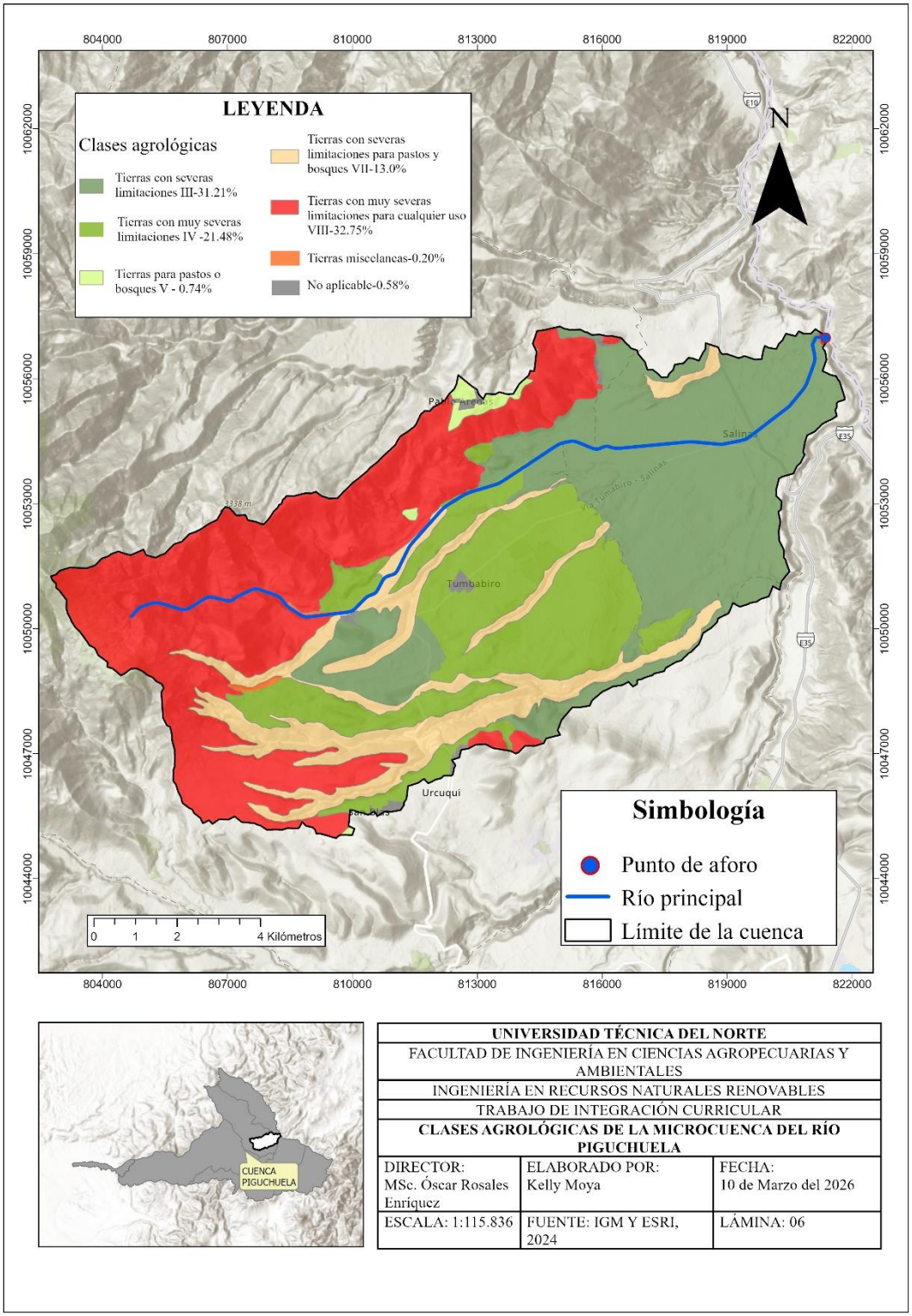
Anexo 4. Mapa de la erosión hídrica



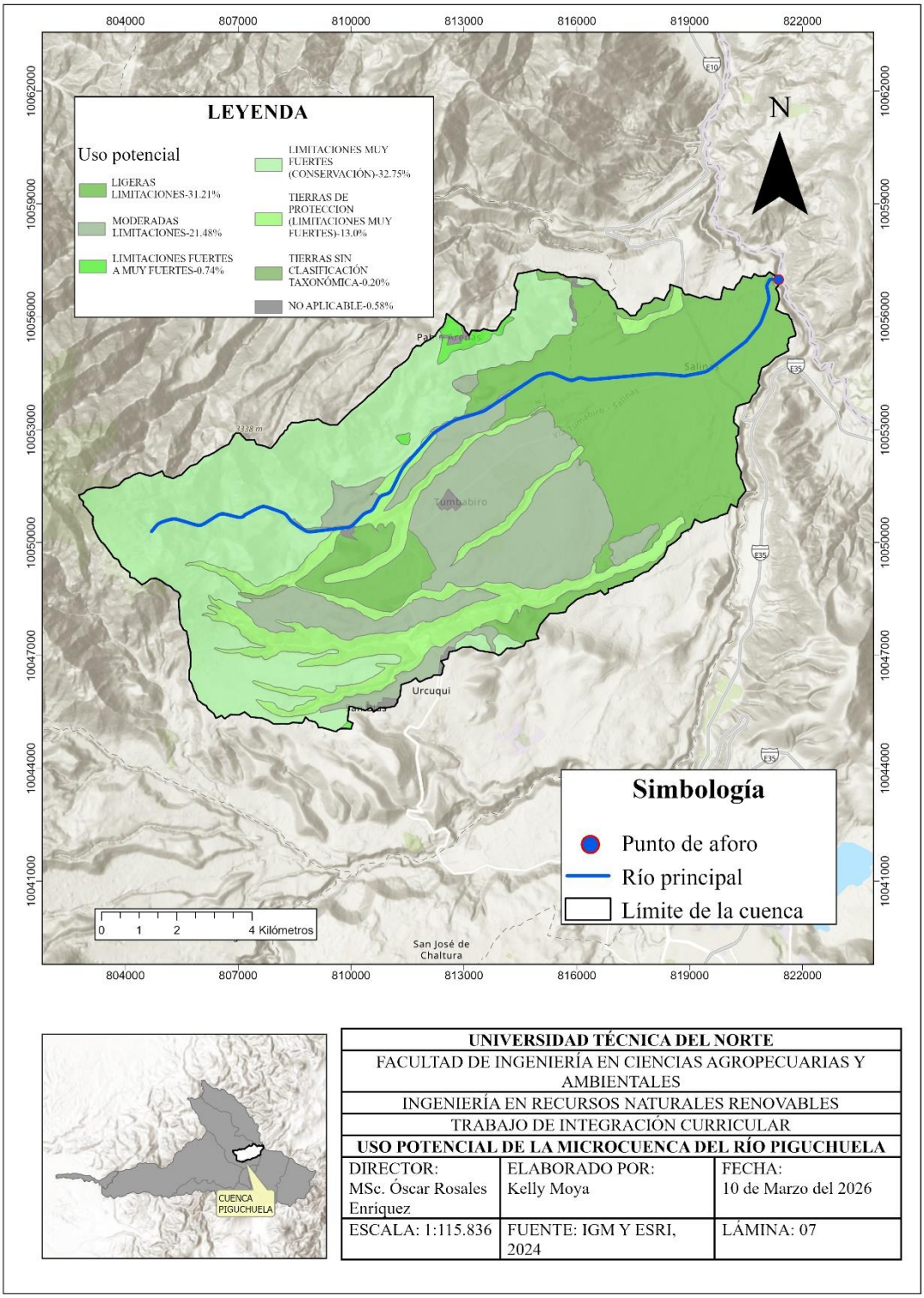
Anexo 5. Mapa de las clases agrologicas presentes en la microcuenca



Anexo 6. Mapa del uso potencial del suelo de la microcuenca

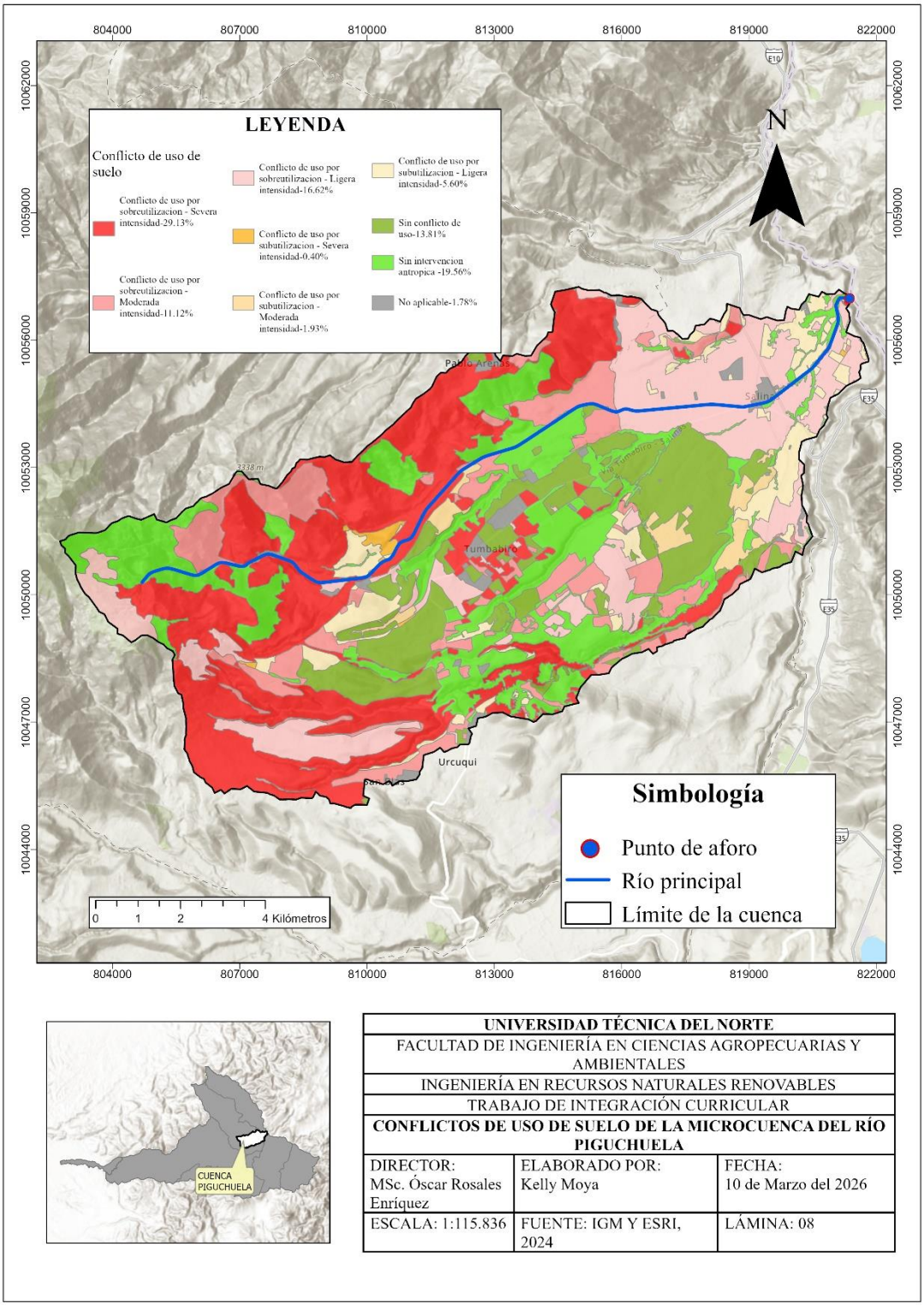


Anexo 7. Mapa de los conflictos del uso del suelo en la microcuenca

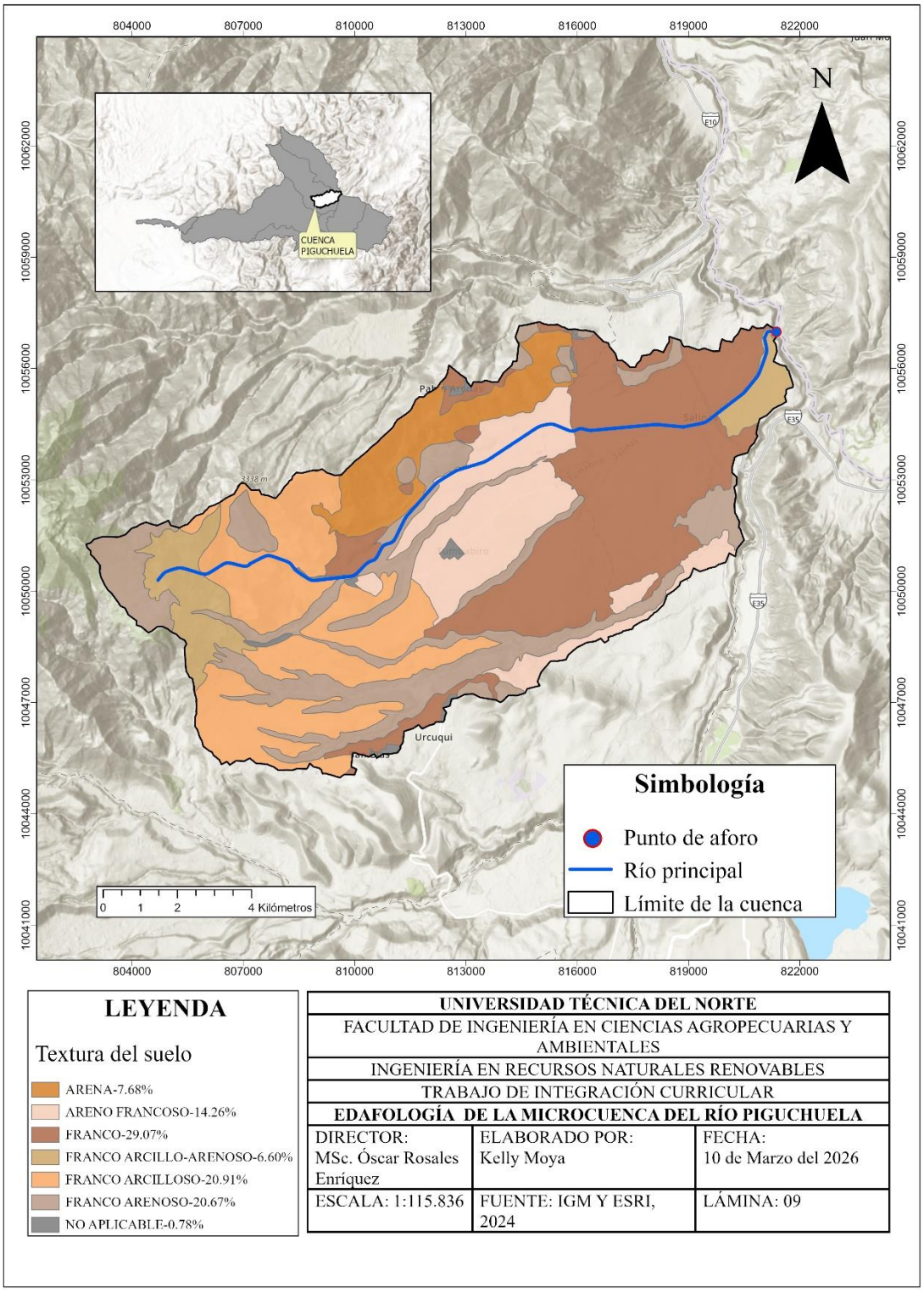


UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE		
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES		
INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES		
TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		
USO POTENCIAL DE LA MICROCUENCA DEL RÍO PIGUCHUELA		
DIRECTOR: MSc. Óscar Rosales Enríquez	ELABORADO POR: Kelly Moya	FECHA: 10 de Marzo del 2026
ESCALA: 1:115.836	FUENTE: IGM Y ESRI, 2024	LÁMINA: 07

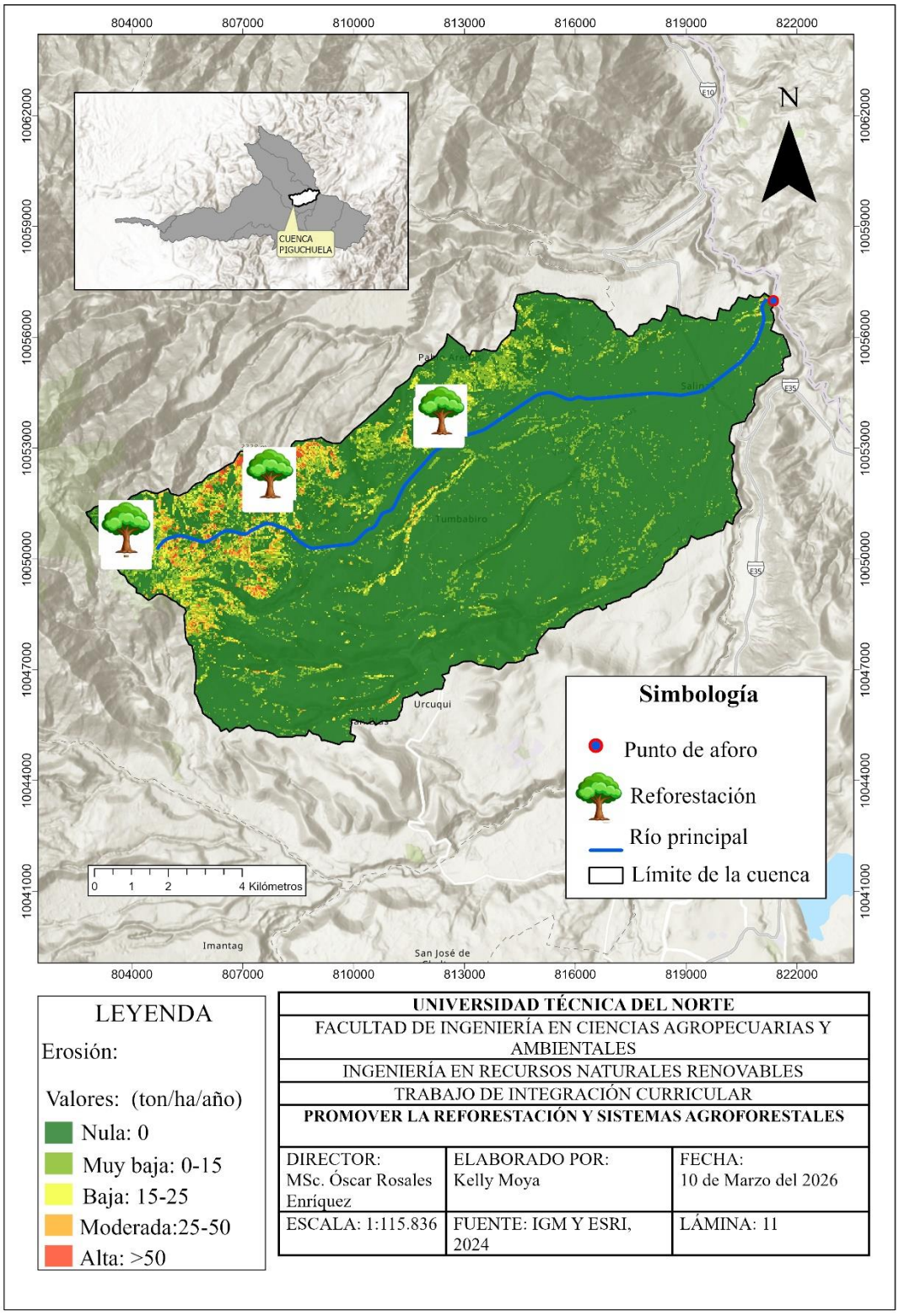
Anexo 8. Mapa edafológico de la microcuenca del río Piguchuela



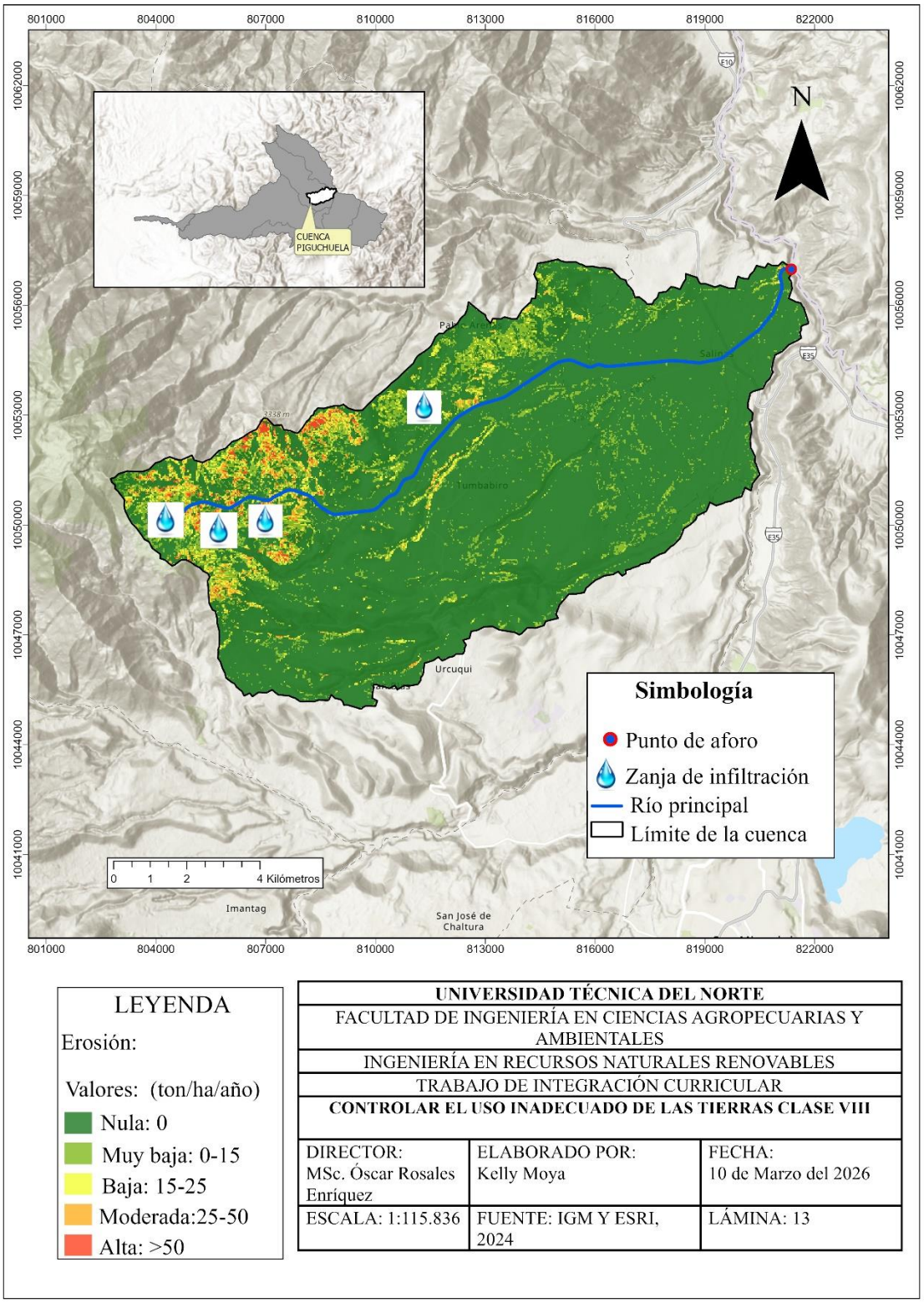
Anexo 9. Puntos de muestreo de agua y suelo en la microcuenca del río Piguchuela



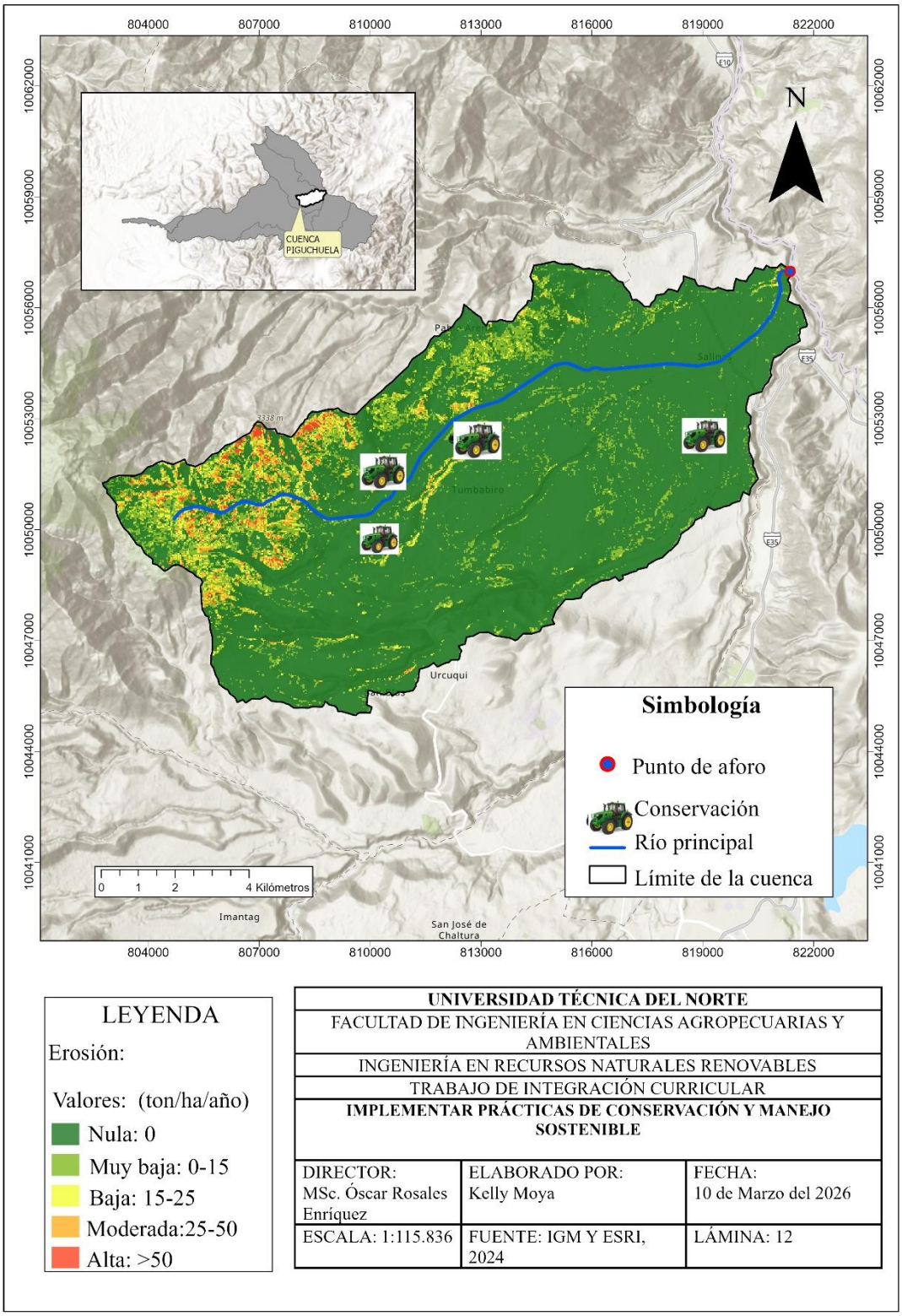
Anexo 10. Mapa de los puntos de reforestación en la microcuenca del río Piguchuela



Anexo 11. Mapa de los puntos para las practicas de conservación en la microcuenca del río Piguchuela



Anexo 12. Mapa para el control y ubicación de las zanjas de protección en la microcuenca del río Piguchuela



Anexo 13. Resultados de la cuenca Alta

L A B O N O R T

LABORATORIOS NORTE
Av. Cristobal de Troya 4-93 y Jaime Roldos Ibarra - Ecuador cel. 0999591050

REPORTE DE ANALISIS DE SUELOS

DATOS DE PROPIETARIO		DATOS DE LA PROPIEDAD	
Nombre:	KELLY MOYA	Provincia:	Imbabura
Ciudad:	Salinas	Cantón:	Ibarra
Teléfono:	0981472663	Parroquia:	Salinas
Fax:		Sitio:	Piguchuela

DATOS DEL LOTE		DATOS DE LABORATORIO	
Sitio:	Piguchuela	Nro Reporte.:	12705
Superficie:		Tipo de Análisis:	Elemental
Número de Campo:	Cuenca alta 1	Muestra:	Suelo, Cuenca alta
Cultivo Actual:		Fecha de Ingreso:	2026-05-25
A Cultivar:		Fecha de Reporte:	2026-05-27

Nutriente	Valor	Unidad	INTERPRETACION
N		ppm	
P		ppm	
S		ppm	
K		meq/100 ml	
Ca		meq/100 ml	
Mg		meq/100 ml	BAJO / MEDIO / ALTO
Zn		ppm	
Cu		ppm	
Fe		ppm	
Mn		ppm	BAJO / MEDIO / ALTO
B		ppm	BAJO / MEDIO / ALTO / TOXICO
pH			0 Requiere Cal 5.5 / 6.5 / 7.0 / 7.5 / 8.0 — Acido / Lig. Acido / Pract. Neutro / Lig. Alcalino / Alcalino
Acidez Int. (Al+H)		meq/100 ml	
Al		meq/100 ml	
Na		meq/100 ml	BAJO / MEDIO / ALTO
Ce		mS/cm	No Salino / Lig. Salino / Salino / Muy Salino
MO	1.44	%	BAJO / MEDIO / ALTO

Ca Mg	Mg K	Ca+Mg K	(meq/100ml) Sum Bases	% NTot	ppm Cl	(%) Arena	Limo	Arcilla	Clase Textural
						60.40	31.20	8.40	Franco arenoso

Dr. Quim. Edison M. Miño M.
Responsable Laboratorio

LABORATORIOS NORTE
LABONORT
IBARRA - ECUADOR
ANALISIS QUÍMICOS SUELOS Y AGUAS

Anexo 14. Resultados de la cuenca Media



L A B O N O R T

LABORATORIOS NORTE

Av. Cristobal de Troya 4-93 y Jaime Roldos Ibarra - Ecuador cel. 0999591050

REPORTE DE ANALISIS DE SUELOS

DATOS DE PROPIETARIO		DATOS DE LA PROPIEDAD	
Nombre:	KELLY MOYA	Provincia:	Imbabura
Ciudad:	Salinas	Cantón:	Ibarra
Teléfono:	0981472663	Parroquia:	Salinas
Fax:		Sitio:	Piguchuela

DATOS DEL LOTE		DATOS DE LABORATORIO	
Sitio:	Piguchuela	Nro Reporte.:	12704
Superficie:		Tipo de Análisis:	Elemental
Número de Campo:	Cuenca media 2	Muestra:	Suelo, cuenca media
Cultivo Actual:		Fecha de Ingreso:	2026-05-25
A Cultivar:		Fecha de Reporte:	2026-05-27

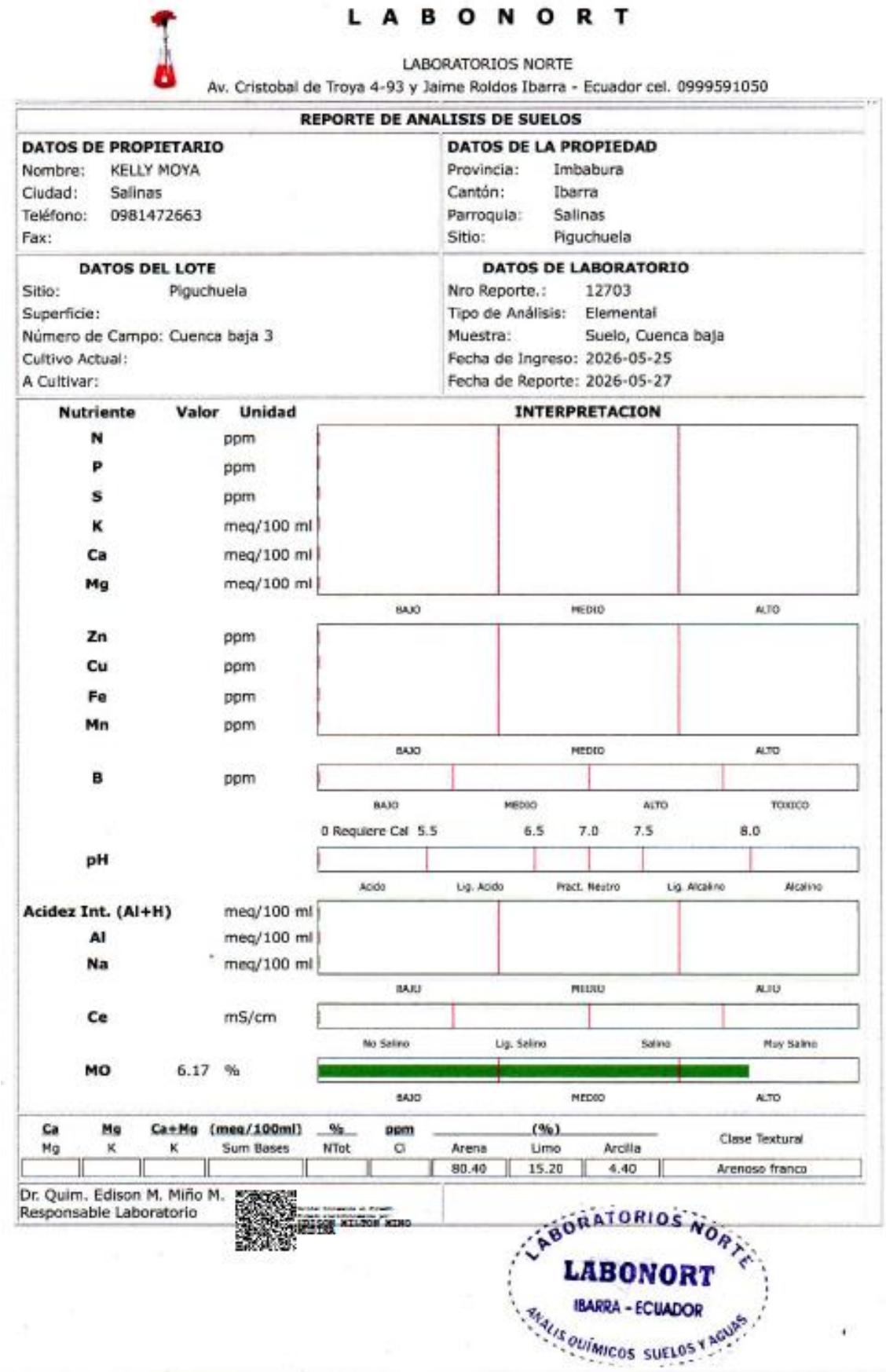
Nutriente	Valor	Unidad	INTERPRETACION
N		ppm	
P		ppm	
S		ppm	
K		meq/100 ml	
Ca		meq/100 ml	
Mg		meq/100 ml	
			BAJO — MEDIO — ALTO
Zn		ppm	
Cu		ppm	
Fe		ppm	
Mn		ppm	
			BAJO — MEDIO — ALTO
B		ppm	
			BAJO — MEDIO — ALTO — TOXICO
			0 Requiere Cal — 5.5 — 6.5 — 7.0 — 7.5 — 8.0
pH			Acido — Lig. Acido — Pract. Neutro — Lig. Alcalino — Alcalino
Acidez Int. (Al+H)		meq/100 ml	
Al		meq/100 ml	
Na		meq/100 ml	
			BAJO — MEDIO — ALTO
Ce		mS/cm	
			No Salino — Lig. Salino — Salino — Muy Salino
MO	2.27	%	
			BAJO — MEDIO — ALTO

Ca / Mg	Mg / K	Ca+Mg / K	(meq/100ml) Sum Bases	% NTot	ppm Cl	(%) Arena	Limo	Arcilla	Clase Textural
						62.40	31.20	6.40	Franco arenoso

Dr. Quim. Edison M. Miño M.
Responsable Laboratorio

LABORATORIOS NORTE
LABONORT
IBARRA - ECUADOR
ANALISIS QUÍMICOS SUELOS Y AGUAS

Anexo 15. Resultados de la cuenca Baja



L A B O N O R T

LABORATORIOS NORTE
Av. Cristobal de Troya 4-93 y Jaime Roldos Ibarra - Ecuador cel. 0999591050

REPORTE DE ANALISIS DE SUELOS

DATOS DE PROPIETARIO
Nombre: KELLY MOYA
Ciudad: Salinas
Teléfono: 0981472663
Fax:

DATOS DE LA PROPIEDAD
Provincia: Imbabura
Cantón: Ibarra
Parroquia: Salinas
Sitio: Piguchuela

DATOS DEL LOTE
Sitio: Piguchuela
Superficie:
Número de Campo: Cuenca baja 3
Cultivo Actual:
A Cultivar:

DATOS DE LABORATORIO
Nro Reporte.: 12703
Tipo de Análisis: Elemental
Muestra: Suelo, Cuenca baja
Fecha de Ingreso: 2026-05-25
Fecha de Reporte: 2026-05-27

Nutriente	Valor	Unidad	INTERPRETACION
N		ppm	
P		ppm	
S		ppm	
K		meq/100 ml	
Ca		meq/100 ml	
Mg		meq/100 ml	BAJO / MEDIO / ALTO
Zn		ppm	
Cu		ppm	
Fe		ppm	
Mn		ppm	BAJO / MEDIO / ALTO
B		ppm	BAJO / MEDIO / ALTO / TOXICO
pH			0 Requiere Cal / 5.5 / 6.5 / 7.0 / 7.5 / 8.0 — Acido / Lig. Acido / Pract. Neutro / Lig. Alcalino / Alcalino
Acidez Int. (Al+H)		meq/100 ml	
Al		meq/100 ml	
Na		meq/100 ml	BAJO / MEDIO / ALTO
Ce		mS/cm	No Salino / Lig. Salino / Salino / Muy Salino
MO	6.17	%	BAJO / MEDIO / ALTO

Ca / Mg	Mg / K	Ca+Mg / K	(meq/100ml) Sum Bases	% NTot	ppm Cl	(%) Arena	(%) Limo	(%) Arcilla	Clase Textural
						80.40	15.20	4.40	Arenoso franco

Dr. Quim. Edison M. Miño M.
Responsable Laboratorio

LABORATORIOS NORTE
LABONORT
IBARRA - ECUADOR
ANALISIS QUÍMICOS SUELOS Y AGUAS

Anexo 16. Matriz de confusión y coeficiente kappa

Confusion matrix online calculator

Home page

Draw confusion matrix for 6 classes.

Truth data

Classifier results	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5	Class 6	Classification overall	User's accuracy (Precision)
Class 1	48	0	0	0	0	0	48	100%
Class 2	0	64	0	1	0	1	66	96.97%
Class 3	1	1	65	0	1	0	68	95.588%
Class 4	0	0	0	63	0	0	63	100%
Class 5	0	0	0	0	47	0	47	100%
Class 6	0	0	0	0	0	27	27	100%
Truth overall	49	65	65	64	48	28	319	
Producer's accuracy (Recall)	97.959%	98.462%	100%	98.438%	97.917%	96.429%		

Overall accuracy (OA): 98.433%

Kappa[1]: 0.981

> Calculate confusion matrix <

2007 by Marco Vanetti

[1]See: J. Richard Landis and Gary G. Koch - *The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data*, Biometrics, Vol. 33, No. 1 (Mar., 1977), pp. 159-174.

Anexo 17. Toma de muestras de agua y suelo





Anexo 18. Muestras de suelo



Anexo 19. Salida de campo con director de tesis



Anexo 20. Resultados análisis de agua

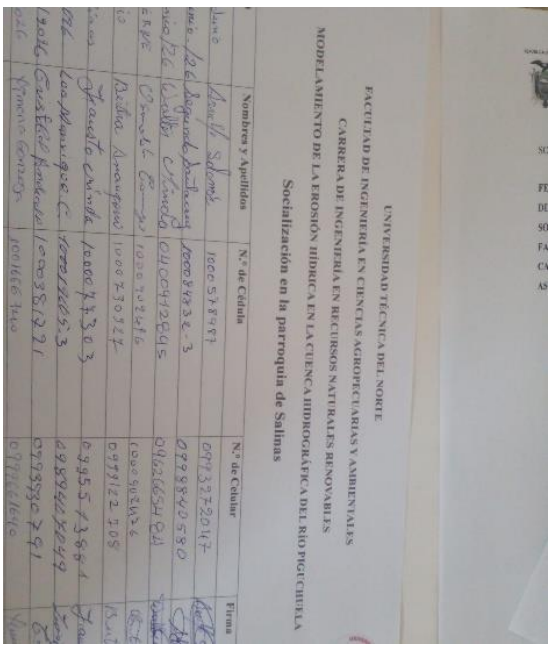
Caudal (m3/s)	Superficie cuenca (ha)	Sedimentos en Suspensión (kg/s)	Sedimentos en Suspensión (ton/año)	Sedimentos en Suspensión (ton/ha/año)	SDR SDR=0.5656*S^-0.11	A (Valor promedio RUSLE) ton/ha/año	SY SY=A*SDR (ton/ha/año)
1,75	12518,8	0,049	1545,264	0,123435473	0,20	4,12	0,83
1,75	12518,8	0,0105	331,128	0,026450459	0,20	4,12	0,83
1,75	12518,8	0,0385	1214,136	0,096985015	0,20	4,12	0,83
1,75	12518,8	0,35	11037,6	0,88168195	0,20	4,12	0,83
1,75	12518,8	0,315	9933,84	0,793513755	0,20	4,12	0,83
1,75	12518,8	0,35	11037,6	0,88168195	0,20	4,12	0,83
1,75	12518,8				0,20	4,12	0,83
1,75	12518,8	0,35	11037,6	0,88168195	0,20	4,12	0,83
1,75	12518,8	0,35	11037,6	0,88168195	0,20	4,12	0,83
1,75	12518,8	0,35	11037,6	0,88168195	0,20	4,12	0,83
1,75	12518,8	0,35	11037,6	0,88168195	0,20	4,12	0,83
1,75	12518,8	0,35	11037,6	0,88168195	0,20	4,12	0,83
1,75	12518,8	0,42	13245,12	1,05801834	0,20	4,12	0,83
1,75	12518,8	0,42	13245,12	1,05801834	0,20	4,12	0,83
1,75	12518,8	0,35	11037,6	0,88168195	0,20	4,12	0,83
1,75	12518,8	0,35	11037,6	0,88168195	0,20	4,12	0,83
1,75	12518,8	0	0	0	0,20	4,12	0,83
1,75	12518,8	0,385	12141,36	0,969850145	0,20	4,12	0,83
1,75	12518,8	0,42	13245,12	1,05801834	0,20	4,12	0,83
1,75	12518,8	0,385	12141,36	0,969850145	0,20	4,12	0,83
1,75	12518,8	0,35	11037,6	0,88168195	0,20	4,12	0,83
1,75	12518,8	0,385	12141,36	0,969850145	0,20	4,12	0,82
1,75	12518,8	0,945	29801,52	2,380541266	0,20	4,12	0,82
1,75	12518,8	0,91	28697,76	2,292373071	0,20	4,12	0,82
1,75	12518,8	0,455	14348,88	1,146186535	0,20	4,12	0,82
1,75	12518,8	1,085	34216,56	2,733214046	0,20	4,12	0,82
1,75	12518,8	0,595	18763,92	1,498859316	0,20	4,12	0,82
1,75	12518,8	0,28	8830,08	0,70534556	0,20	4,12	0,82
1,75	12518,8	0,525	16556,4	1,322522926	0,20	4,12	0,82
1,75	12518,8	0,455	14348,88	1,146186535	0,20	4,12	0,82
1,75	12518,8	0,035	1103,76	0,088168195	0,20	4,12	0,82
1,75	12518,8	0,28	8830,08	0,70534556	0,20	4,12	0,82
1,75	12518,8	0,21	6622,56	0,52900917	0,20	4,12	0,82
1,75	12518,8	0,175	5518,8	0,440840975	0,20	4,12	0,82
1,75	12518,8	0,49	15452,64	1,23435473	0,20	4,12	0,82
1,75	12518,8	0,175	5518,8	0,440840975	0,20	4,12	0,82

Anexo 21. Socialización de medidas de conservación a Asociación de Cañicultores de Imbabura y Carchi ACIC, Asociaciones de productores: Santa Catalina, el Progreso, Trabajadores Autónomos y presidentes de barrios









UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES
MODELAMIENTO DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO PGUCHUELA
Socialización en la parroquia de Salinas

Nombres y Apellidos	N.° de Cédula	N.° de Celular	Firma
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]