



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS
NATURALES RENOVABLES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

**“MODELAMIENTO DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA
HIDROGRÁFICA DEL RÍO ITAMBÍ”**

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

Línea de investigación: Biotecnología, energía y recursos naturales renovables

AUTOR:

Christian Eduardo Santander De La Cruz

DIRECTOR:

PhD. Darío Paul Arias Muñoz

Ibarra – Ecuador 2025



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO		
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1050269131	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Santander De La Cruz Christian Eduardo	
DIRECCIÓN:	Otavalo - Imbabura	
EMAIL:	cesantanderc@utn.edu.ec santanderc1223@gmail.com	
TELÉFONO FIJO: 0993850276	TELÉFONO MÓVIL:	0981464556

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	“MODELAMIENTO DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO ITAMBÍ”
AUTOR:	Santander De La Cruz Christian Eduardo
FECHA:	2025/12/12
PROGRAMA:	PREGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Recursos Naturales Renovables
DIRECTOR:	PhD. Paúl Arias
ASESOR:	MSc. Óscar Rosales

2. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 12 días del mes de diciembre de 2025

EL AUTOR:

.....
Santander De La Cruz Christian Eduardo

CI:1050269131

.....
PhD. Paúl Arias

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el señor **CHRISTIAN EDUARDO SANTANDER DE LA CRUZ**, con cédula de identidad Nro. 105026913-1, bajo mi supervisión en calidad de director.

.....
PhD. Paúl Arias

DIRECTOR

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi profundo agradecimiento al PhD. Paúl Arias, director de esta investigación, por su orientación precisa, su dedicación y la claridad con la que supo guiar cada fase del estudio. Su compromiso académico fue decisivo para que este trabajo alcanzara el rigor y la solidez necesarios.

Mi reconocimiento se extiende también al MSc. Óscar Rosales, asesor del proyecto, por su constante acompañamiento, la apertura para resolver dudas y el apoyo brindado durante todo el proceso. Sus aportes técnicos y sus criterios analíticos fueron fundamentales para encaminar adecuadamente esta tesis.

A la MSc. Tatiana Delgado le expreso un especial agradecimiento por facilitar los recursos y las condiciones necesarias para la realización de los análisis de laboratorio. Su disposición y apoyo en el uso de las instalaciones del Laboratorio de Química permitieron concretar actividades clave para la obtención de resultados confiables.

Asimismo, agradezco a la Universidad Técnica del Norte por la formación académica recibida y por promover un ambiente de crecimiento personal y profesional. La calidad educativa y las oportunidades brindadas han sido determinantes en la culminación de esta etapa.

A todas las personas e instituciones que contribuyeron, directa o indirectamente, a la realización del trabajo de integración curricular, extiendo mi sincera gratitud.

Christian Eduardo Santander De La Cruz

DEDICATORIA

Dedicado a quienes creen en el valor del conocimiento como herramienta para comprender, proteger y restaurar los sistemas naturales, donde la investigación, la planificación y el pensamiento crítico permitan enfrentar los desafíos ambientales con rigor técnico y compromiso. Este esfuerzo académico es un aporte más hacia el manejo sostenible de los recursos naturales y lleva también el sello de mis familiares y amigos, cuyo respaldo incondicional iluminó cada etapa del camino. Cada avance, cada reto superado y cada aprendizaje estuvieron acompañados por su ánimo, compañía y confianza, que sostuvieron este proceso incluso en los momentos más exigentes; por ello, este logro también les pertenece y refleja la fuerza de su presencia en todo este recorrido.

Christian Eduardo Santander De La Cruz

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO.....	1
1.2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y JUSTIFICACIÓN.....	2
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.3.3 Pregunta directriz de la investigación	4
1.3.4 Hipótesis	5
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1.1 EROSIÓN DEL SUELO.....	6
2.1.2 Erosión Hídrica del Suelo.....	6
2.1.3 Modelos de Erosión del Suelo	7
2.1.4 Estrategias para Mitigar la Erosión del Suelo.....	9
2.2. MARCO LEGAL: BASE LEGAL DEL PRESENTE ESTUDIO	10
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	11
3.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	11
3.1.1 Enfoque del Estudio	12
3.1.2 Tipo de Estudio	12
3.1.3 Diseño de Estudio.....	13
3.1.4 Morfometría de la Microcuenca del río Itambí.....	13
3.2. MÉTODOS DEL ESTUDIO.....	15
3.2.1 Determinación de los Factores Climáticos y Biofísicos.....	16
3.2.2 Modelo Matemático RUSLE	17
3.2.2.1 Factor de Erosividad de la Precipitación (R)	17
3.2.2.2 Factor de Erodabilidad del Suelo (K).....	18
3.2.2.3 Factor Topográfico (LS).....	19
3.2.2.4 Factor Cobertura del Suelo (C)	19
3.2.2.5 Factor Prácticas de Conservación (P).....	21
3.2.3 Simulación de la Erosión Hídrica aplicando el modelo RUSLE	21

3.2.4 Validación del Modelo Hidrográfico RUSLE	22
3.3. ESTRATEGIAS DE MANEJO DE RECURSO SUELO.....	24
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
4.1. Determinación de la pérdida de suelo por erosión hídrica	26
4.2. Simulación de la erosión	29
4.3. Validación del Modelo RUSLE.....	30
4.4. Zonificación del riesgo de erosión hídrica	31
4.5. Propuesta de estrategias de conservación del suelo	32
4.5.1 Importancia de las Estrategias de Conservación.....	33
4.5.2 Análisis (FODA)	33
4.5.3 Diseño de Estrategias	40
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	47
5.1. Conclusiones.....	47
5.2. Recomendaciones	49
REFERENCIAS	50
ANEXOS	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de erosión del suelo	7
Tabla 2. Clasificación de modelos de erosión	8
Tabla 3. Clasificación de estrategias para mitigar la erosión del suelo.....	9
Tabla 4. Límites de la microcuenca del río Itambí.....	12
Tabla 5. Características físicas de la microcuenca del río Itambí.....	13
Tabla 6. Factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada	17
Tabla 7. Estaciones meteorológicas y pluviométricas período 2010-2021	18
Tabla 8. Valores del Factor C.....	20
Tabla 9. Sedimentos en suspensión (SY Observados y Simulados) ton/ha/año	30
Tabla 10. Superficie según niveles de erosión hídrica en la microcuenca del río Itambí	32
Tabla 11. Distribución del Uso Potencial del Suelo.....	34
Tabla 12. Distribución de los Conflictos de Uso del Suelo.....	37
Tabla 13. Clases agrológicas de la microcuenca del río Itambí.....	38
Tabla 14. Matriz FODA del área de estudio	39
Tabla 15. Matriz de estrategias FA, FO, DO y DA derivadas del análisis FODA de la microcuenca del río Itambí.....	40
Tabla 16. Programa de fortalecimiento de muros naturales forestales.....	41
Tabla 17. Programa de construcción de estructuras de contención en zonas moderadas.....	43
Tabla 18. Programa para mejorar la estructura y capacidad de infiltración	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Base legal del Trabajo de Integración Curricular - Pirámide de Kelsen	10
Figura 2. Ubicación de la microcuenca del río Itambí	11
Figura 3. Esquema metodológico de la ecuación RUSLE	16
Figura 4. Uso y Cobertura de la microcuenca del río Itambí	21
Figura 5. Esquema metodológico de la validación del modelo RUSLE.....	24
Figura 6. Factores del Modelo RUSLE.....	26
Figura 7. Susceptibilidad de la Erosión Hídrica de la microcuenca del río Itambí	29
Figura 8. Uso Potencial del Suelo.....	35
Figura 9. Conflictos de Uso de Suelo.....	36
Figura 10. Clases Agrológicas de la microcuenca	37
Figura 11. Ubicación geográfica de la estrategia 1	42
Figura 12. Ubicación geográfica de la estrategia 2.....	44
Figura 13. Ubicación geográfica de la estrategia 3.....	46

RESUMEN

La erosión hídrica es uno de los principales factores de degradación del suelo en la región interandina del Ecuador y constituye un riesgo para la estabilidad de los sistemas productivos, agravado por el uso inadecuado del territorio en actividades agrícolas y pecuarias. El estudio tuvo como objetivo cuantificar la pérdida de suelo por erosión hídrica en la microcuenca del río Itambí, provincia de Imbabura, aplicando el modelo empírico RUSLE en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG), a partir de variables climáticas, edáficas, topográficas y de cobertura vegetal. La erosión promedio en la microcuenca del río Itambí es de 1,89 ton/ha/año, clasificada como muy baja a escala de microcuenca; sin embargo, en sectores con pendientes escarpadas se registraron pérdidas superiores a 100 ton/ha/año, consideradas como críticas. La validación del modelo mediante el sesgo porcentual (PBIAS = -14,62 %) y el error cuadrático medio (RMSE = 0,14) evidenció una adecuada correspondencia entre los valores simulados y los observados de producción de sedimentos (3,1 ton/ha/año). La zonificación del riesgo erosivo indicó que más del 85 % de la superficie de la microcuenca presenta niveles nulos o bajos de erosión, mientras que las áreas agrícolas y de pastoreo ubicadas en laderas medias y altas concentran el mayor riesgo y requieren un manejo prioritario del recurso suelo. En este contexto se proponen estrategias de conservación basadas en la restauración ecológica con especies nativas, la implementación de prácticas agroecológicas y programas de educación ambiental que fortalezcan la sostenibilidad del recurso edáfico y la gestión participativa de la microcuenca. Los resultados confirman la utilidad del modelo RUSLE como herramienta para el diagnóstico, la planificación y el manejo sostenible del suelo en cuencas hidrográficas andinas, donde la erosión hídrica se ha intensificado debido a la intervención antropogénica.

Palabras clave: erosión hídrica, modelo RUSLE, cuenca hidrográfica, cobertura de suelo, sedimentos, Pbias.

ABSTRACT

Water erosion is one of the main drivers of soil degradation in the inter-Andean region of Ecuador and represents a risk to the stability of productive systems, a situation that is exacerbated by inadequate land use in agricultural and livestock activities. The aim of this study was to quantify soil loss caused by water erosion in the Itambí River micro-watershed, Imbabura Province, by applying the empirical RUSLE model in a Geographic Information Systems (GIS) environment, using climatic, edaphic, topographic and land-cover variables. Average erosion in the Itambí River micro-watershed is 1.89 ton/ha/year, which is classified as very low at the micro-watershed scale; however, sectors with steep slopes recorded losses greater than 100 ton/ha/year, which are considered critical. Validation of the model using percent bias (PBIAS = -14.62 %) and root mean square error (RMSE = 0.14) showed good agreement between simulated and observed sediment yield values (3.1 ton/ha/year). The erosion-risk zoning indicated that more than 85 % of the micro-watershed area presents null or low erosion levels, whereas agricultural and grazing areas located on middle and upper slopes concentrate the highest risk and require priority soil-management actions. In this context, conservation strategies are proposed based on ecological restoration with native species, the implementation of agroecological practices and environmental education programmes that strengthen soil-resource sustainability and participatory management of the micro-watershed. The results confirm the usefulness of the RUSLE model as a tool for diagnosis, planning and sustainable soil management in Andean watersheds, where water erosion has intensified due to anthropogenic intervention.

Keywords: water erosion, RUSLE model, watershed, soil cover, sediments, Pbias.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

La intervención antropogénica ha reconfigurado el planeta de forma implacable entre un tercio y la mitad de la superficie terrestre, entre un tercio y la mitad de su superficie, para satisfacer las crecientes demandas de la humanidad. Esta alteración masiva no solo compromete la estabilidad de los suelos, sino que amenaza con erosionar la capacidad regenerativa de los ecosistemas naturales (Vitousek et al., 1997). La erosión y sedimentación afectan la calidad del agua, la biodiversidad y la integridad de los hábitats fluviales. Además, estos sucesos pueden causar un ciclo de retroalimentación negativa que deteriora aún más la calidad de los ecosistemas, al reducir la fertilidad del suelo y aumentar la sedimentación en cuerpos de agua (Viney & Sivapalan, 1999).

La erosión del suelo, en países como China, es uno de los problemas ambientales más urgentes, afectando extensas áreas de cultivos en pendientes elevados, pastizales y zonas de bosque secundario. Este fenómeno exige una planificación detallada sobre las tasas y distribución de la erosión para implementar políticas de manejo de suelo que reduzcan el impacto ecológico y económico en todo el país (Liu et al., 2020). Otro ejemplo, es Malasia donde la erosión del suelo representa un desafío económico y ecológico, especialmente en las cuencas hidrográficas vulnerables, donde la pérdida de capas superficiales disminuye la fertilidad y la productividad agrícola (Islam et al., 2020).

En América Latina y el Caribe (LAC), la erosión del suelo es un problema crítico que se ha intensificado debido a diversas actividades antrópicas. Se estima que más de la mitad de las tierras cultivables en países de la región han sido gravemente afectadas debido a prácticas inadecuadas del manejo del suelo (Gardi et al., 2014). La erosión de suelos en México es un problema ambiental grave que afecta a gran parte del territorio nacional, presentando distintos grados de severidad (León, 2011). A su vez, en la cuenca el Jihuite en Tepatitlán (Jalisco), las características naturales, como la alta pluviometría, la topografía con pendientes pronunciadas y la geología, incrementan el potencial natural de erosión, lo que agrava aún más la situación (López et al., 2023).

Ecuador, al encontrarse en la zona interandina, presenta una alta susceptibilidad a la erosión del suelo debido a factores naturales, como el relieve abrupto, las pendientes pronunciadas y la frecuencia de eventos sísmicos. Estas condiciones favorecen la ocurrencia de movimientos en masa que desestabilizan los taludes y remueven grandes volúmenes de suelo, incrementando el aporte de sedimentos a los ríos y, por tanto, la erosión hídrica en las cuencas andinas (Macías et al., 2021; Peralta et al., 2022). A pesar de la importancia de este tema, los estudios sobre la erosión en Ecuador son limitados y suelen centrarse en áreas geográficas o factores de suelo aislados, lo que dificulta una comprensión amplia e integral de esta problemática ambiental (Párraga et al., 2023).

1.2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

La erosión del suelo en los países en desarrollo es un problema complejo que refleja la interrelación entre la presión demográfica, la pobreza, las dinámicas ambientales e institucionales. Por lo tanto, se ha convertido en un tema prioritario en la Agenda Ambiental Global, ya que su impacto directo en la sustentabilidad y el desarrollo socioeconómico afecta claramente a las comunidades en la productividad agrícola y alimentaria (Ananda & Herath, 2003). Esta situación ha generado prácticas insostenibles que podrían amenazar la seguridad humana y la sostenibilidad ambiental se verá comprometida en el próximo siglo poniendo en riesgo los cuerpos de agua debido a la sedimentación y generando la pérdida de productividad del suelo (Amundson et al., 2015).

Cuando se habla de erosión y cambio climático, se puede analizar su relación, ya que las variaciones en los patrones climáticos afectan directamente los procesos geomorfológicos, incluyendo la erosión hídrica, la sedimentación, la alteración de los suelos y el modelo de paisaje. El calentamiento global, impulsado por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, causa cambios significativos en los patrones de distribución de la temperatura y la precipitación, que modifican la dinámica geomorfológica (Gutiérrez-Elorza, 2006). Además, la erosión hídrica del suelo representa un desafío ambiental de gran alcance, ya que no solo implica la pérdida de la capa fértil del suelo, sino que también repercute negativamente en la calidad del agua, biodiversidad y la estabilidad general de los ecosistemas (Párraga et al., 2023).

El estudio desarrollado por Arias-Muñoz et al. (2023) determinó la distribución espacial de la erosión hídrica mediante la aplicación del modelo RUSLE en un entorno SIG en la cuenca

media-alta del río Mira, en Ecuador. En el estudio se encontró que la erosión varía entre 0 y 812,30 ton/ha/año, y su promedio es de 32,79 ton/ha/año. Además, el sobrepastoreo, la expansión agrícola y otras actividades antropogénicas en áreas vulnerables contribuyen a la degradación y pérdida de capacidad de retención de agua, la vulnerabilidad del suelo se ve intensificada por la deforestación, ya que la reducción de la cobertura vegetal disminuye su capacidad de protección y aumenta el riesgo de erosión.

La microcuenca del río Itambí, localizada en la zona ecuatorial de los Andes Ecuatorianos, forma parte integral del sistema de drenaje de la cuenca del río Ambí. Sin embargo, enfrenta serios problemas de erosión del suelo debido a la actividad agrícola y ganadera intensa en las áreas circundantes. Además, la construcción de infraestructuras, como caminos y canales de drenaje son problemas que con el paso del tiempo generan alteraciones en la productividad, consecuencia de esto los suelos se vuelven menos productivos afectando la seguridad alimentaria, el desarrollo de comunidades y la pérdida de biodiversidad de la microcuenca (Burneo & Gunkel, 2003).

El Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) del Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) de la Parroquia Rural de San Pablo se sustenta en el Objetivo 1, que busca conservar y proteger la biodiversidad y las nacientes de agua, mediante planes y programas ambientales de manera participativa. Este Objetivo está alineado con las políticas nacionales de conservación y sostenibilidad, promoviendo una gestión integral de los recursos naturales. Factores como la expansión de la frontera agrícola, las malas prácticas de conservación y el uso excesivo de agroquímicos han acelerado la contaminación y el deterioro ambiental, amenazando el equilibrio ecológico y la salud de los ecosistemas (GAD - San Pablo, 2015). En este contexto, la gestión participativa es fundamental para revertir la degradación de recursos, garantizando la protección ambiental y el bienestar socioeconómico de la parroquia.

En relación con los principios de la agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, específicamente en el Objetivo 15 que busca proteger y restaurar los ecosistemas terrestres, gestionando los recursos de manera sostenible para detener la pérdida de biodiversidad la degradación de los suelos y la disminución de la biodiversidad representan serios desafíos ambientales impactando el equilibrio ecológico como el bienestar de las comunidades que dependen de estos recursos (Organización De Las Naciones Unidas, 2015).

El presente estudio se alinea en la política 7.4 del Objetivo 9 del Plan de Desarrollo para el Nuevo Ecuador 2024 - 2025, enfocados en conservar, restaurar, proteger y hacer un uso sostenible de los recursos naturales, asegurando su disponibilidad para las presentes y futuras generaciones. La erosión del suelo es un proceso que compromete la calidad de la tierra y la productividad agrícola representando una amenaza significativa. Para abordar este desafío, el Gobierno Ecuatoriano ha diseñado medidas específicas orientadas a la reducción de la erosión y la restauración de zonas degradadas, con el propósito de mantener un territorio en condiciones óptimas para el año 2025 (Secretaría Nacional de Planificación, 2024). Este estudio se presenta como un aporte clave para alcanzar este Objetivo, reforzando la planificación territorial sostenible y garantizando la resiliencia de los recursos naturales y la seguridad alimentaria del Ecuador.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el riesgo de la erosión hídrica en la microcuenca del río Itambí 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 Itambí.
- Zonificar el riesgo de erosión hídrica en la microcuenca del río Itambí.
- Proponer estrategias de conservación del suelo para mitigar los efectos de erosión hídrica en la microcuenca del río Itambí.

1.3.3 Pregunta directriz de la investigación

¿Cuál es la pérdida de suelo causada por erosión hídrica de la microcuenca del río Itambí?

1.3.4 Hipótesis

Ho: Los valores estimados de producción de sedimentos por el modelo RUSLE no difieren significativamente de los valores observados en campo.

Ha: Los valores estimados de producción de sedimentos por el modelo RUSLE difieren significativamente de los observados en campo.

CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1 EROSIÓN DEL SUELO

La erosión del suelo es un proceso natural que se ha intensificado debido a las actividades antrópicas, especialmente la agricultura y ganadería. Este fenómeno consiste en la remoción de la capa superficial del suelo, rica en nutrientes y materia orgánica, mediante agentes como el agua y el viento. La actividad agrícola, al alterar la estructura del suelo y reducir la cobertura vegetal, ha incrementado las tasas de erosión más allá de los niveles naturales de formación de suelo. Además, este proceso tiene efectos negativos en los ecosistemas acuáticos y en la calidad del agua (Amundson et al., 2015).

2.1.2 Erosión Hídrica del Suelo

El incremento de la erosión hídrica es uno de los problemas ambientales en Ecuador, que afecta directamente a la productividad agrícola y la sostenibilidad de los ecosistemas. Este proceso se intensifica debido a prácticas inadecuadas del manejo de suelo, como la eliminación de la cobertura vegetal y mal manejo de suelos expuestos. La erosión del suelo no solo reduce la capa fértil, sino que también disminuye su capacidad de retención de agua (Espinosa, 2014). Eventos como los deslizamientos de tierra y lluvias intensas pueden alterar la dinámica del suelo, lo que contribuye a la erosión de las riberas y a la sedimentación en el lecho del río (Burneo & Gunkel, 2003). Estas dinámicas no solo comprometen la estabilidad de los ecosistemas, sino que también representan un desafío crítico para el desarrollo sostenible.

La erosión hídrica, en sus diversas formas tiene impactos ambientales, económicos y sociales. La erosión laminar provoca daños al paisaje, pérdida de tierras agrícolas y una notable reducción en la productividad, siendo fundamental implementar medidas de control y prácticas integradas a la conservación para mitigar sus efectos (Liu et al., 2012). Además, la erosión por surcos, común en regiones semiáridas afecta la productividad debido a los factores como la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, la estabilidad de las fuentes de agua y la tasa de infiltración (Fernández-Gómez et al., 2004). Al igual que, la erosión por cárcavas (barrancos), que implica la formación de surcos profundos debido a la acción concentrada de

agua de escorrentía, teniendo implicaciones geológicas que generan daños al medio ambiente (Li et al., 2019). En la Tabla 1 se muestran los tipos de erosión, características distintivas y medidas de control.

Tabla 1.

Tipos de erosión del suelo

Tipo de erosión	Definición	Factores clave	Medidas de control
Erosión laminar	Eliminación uniforme inicial del suelo	Precipitaciones, pendiente, vegetación	Cobertura vegetal, rugosidad de la superficie
Erosión de surcos	Pérdida de suelo en surcos agrícolas	Caudal de entrada, pendiente, tipo de suelo	Gestión adecuada del riego
Erosión en cárcavas (barrancos)	Formación de grandes canales	Precipitaciones, topografía, uso del suelo	Intervenciones estructurales, vegetación.

Nota. Adaptado de Fernández-Gómez et al. (2004), Li et al. (2019) y Liu et al. (2012).

2.1.3 Modelos de Erosión del Suelo

La modelación de la erosión del suelo abarca una amplia gama de enfoques que van desde métodos empíricos hasta modelos sofisticados y fundamentados. Entre los más comunes se encuentra la Ecuación Universal de Pérdida de suelo (USLE, por sus siglas en inglés) y su versión revisada RUSLE, que son ampliamente utilizados debido a su simplicidad, aunque presentan limitaciones de precisión en ciertos tipos de suelos, como los de meta - sedimentos. Modelos más complejos, como el Proyecto de Predicción de la Erosión Hídrica (WEPP, por sus siglas en inglés) (Croke & Nethery, 2006; Nearing, 2013) y el Modelo Topográfico (TOPOG, por sus siglas en inglés) (Croke & Nethery, 2006), permite una representación más detallada de los procesos hidrológicos y de erosión, pero requieren más datos y recursos para su implementación.

Asimismo, los Modelos de Evolución del Paisaje (LEM, por sus siglas en inglés), como el Modelo Celular de Evolución de Pendientes (CAESAR, por sus siglas en inglés) (Coulthard et al., 2012), y enfoques geoestadísticos híbridos, como el *Kriging* de Redes Neuronales Artificiales (ANNK, por sus siglas en inglés) (Mirzaee et al., 2020), ofrecen alternativas para evaluar la dinámica del terreno y la distribución espacial de la erosión. Sin embargo, existen

una serie de ventajas y desventajas de los modelos de erosión presentando evidencia de modelos más eficiente que se adapte a las necesidades de la investigación (Tabla 2).

Tabla 2.

Clasificación de modelos de erosión

Modelo	Tipo	Ventajas	Desventajas
Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (USLE/RUSLE)	Modelo Empírico	Sencillo, ampliamente utilizado	Simplificación de procesos complejos
Modelo Topográfico (TOPOG)	Modelo físico procesual	Eficaz en superficies alteradas	Limitada en la redistribución de sedimentos
Modelos de Evolución del Paisaje (LEM) Modelo Celular de Evolución de Pendientes y Ríos (CAESAR)	Modelo físico dinámico	Predicciones a largo plazo, desarrollo del paisaje	Requiere calibración, complejo
Geoestadística/Híbrida Kriging de Redes Neuronales Artificiales (ANNK)	Modelo Híbrido (empírico – estadístico)	Alta precisión de predicción	Requiere datos extensos

Nota. Adaptado de Coulthard et al. (2012), Croke & Nethery (2006), Yang (2006), Mirzaee et al. (2020) y Nearing (2013).

El modelo de Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada es una herramienta ampliamente utilizada para estimar la erosión del suelo causada por el agua. Este modelo cuenta con cinco factores principales que influyen en la pérdida de suelo: erosividad de la lluvia (R), erosionabilidad del suelo (K), longitud y pendiente de la ladera (LS), cobertura y manejo del suelo (C) y prácticas de conservación (P). El factor R representa la cantidad y la intensidad de la precipitación, mientras que K mide la susceptibilidad del suelo a la erosión, dependiendo de su textura y estructura. El factor LS combina la longitud de la pendiente y el grado de inclinación, lo que afecta la velocidad del escurrimiento de agua. El factor C evalúa el impacto de la cobertura vegetal y las prácticas de manejo en la protección del suelo, y el factor P considera las prácticas de conservación que pueda reducir la erosión (Darbayeva et al., 2020).

La integración de estos factores permite al modelo RUSLE proporcionar una estimación precisa de la pérdida de suelo.

2.1.4 Estrategias para Mitigar la Erosión del Suelo

Las estrategias para mitigar la erosión deben centrarse en el diseño de técnicas de rehabilitación, mitigación y prevención, así como en la resolución de problemas cualitativos y cuantitativos (Bermúdez & Díaz, 1998). Entre las estrategias más comunes destacan la cobertura vegetal, el manejo de la cobertura del suelo, el cultivo en terrazas y en contorno, así como la construcción de diques de tierra y roca (Chauhan et al., 2024; Ebabu et al., 2019; Girma et al., 2023; Liu et al., 2021). Estas estrategias contribuyen a la conservación y reducción de la erosión del suelo (Tabla 3). Además, se deben establecer sistemas de observación y de información ambiental, como la teledetección y el uso de Sistemas de Información Geográfica (Alizadeh et al., 2022), que permiten el análisis de los procesos de erosión. Apoyando a la toma de decisiones en la gestión del área de influencia.

Tabla 3.

Clasificación de estrategias para mitigar la erosión del suelo

Estrategia	Eficacia	Notas
Cobertura vegetal	Reduce significativamente la erosión, por ejemplo, la hierba de ganso de la India.	Eficaz en zonas semiáridas
Manejo de la cobertura del suelo	Reduce la escorrentía en un 48,5% y la pérdida de suelo en un 70,5%.	Los cultivos de cobertura no leguminosos son más efectivos
Cultivo en terrazas y en contorno	Reduce la escorrentía superficial y la producción de sedimentos.	Adecuado para terrenos agrícolas en pendiente.
Diques de tierra y piedra	Reduce la escorrentía y la pérdida de suelo, especialmente con el refuerzo del césped.	Eficaz en zonas de cultivo
Teledetección y SIG	Identifica áreas de alto riesgo de erosión.	Ayuda en la planificación e implementación de estrategias.

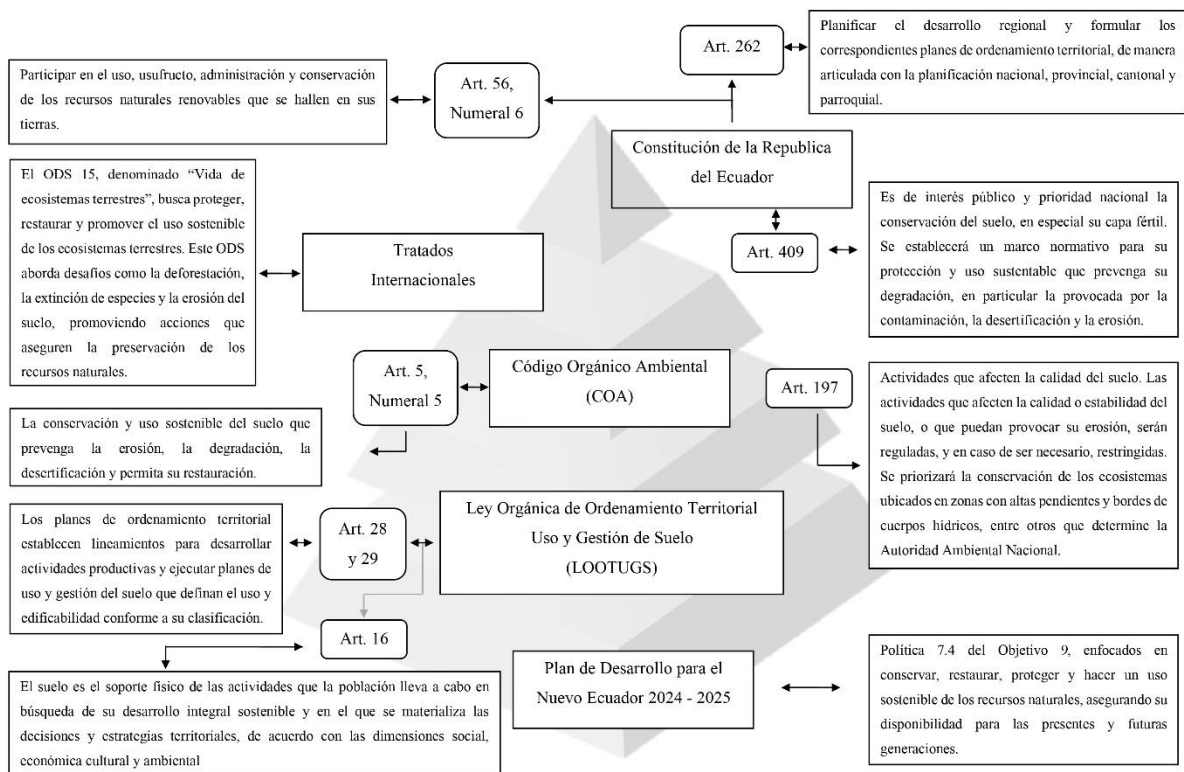
Nota. Adaptado de Alizadeh et al. (2022), Chauhan et al. (2024), Ebabu et al. (2019), Girma et al. (2023) y Liu et al. (2021).

2.2. MARCO LEGAL: BASE LEGAL DEL PRESENTE ESTUDIO

EL marco legal del presente estudio se sustenta en la Constitución de la República del Ecuador (2008), que garantiza los derechos ambientales y el manejo sustentable de recursos; los Acuerdos Internacionales (Agenda 2030), que promueven los Objetivos de Desarrollo Sostenible; Código Orgánico Territorial, Autónomo y Descentralizado (COOTAD), Código Orgánico del ambiente (COA) para la gestión local y control ambiental; y al Plan de Desarrollo para el Nuevo Ecuador 2024 – 2025 (Figura 1).

Figura 1.

Base legal del Trabajo de Integración Curricular - Pirámide de Kelsen



Nota. Adaptado de Asamblea Nacional (2016), Constitución de la República del Ecuador (2008) y Secretaría Nacional de Planificación (2024)

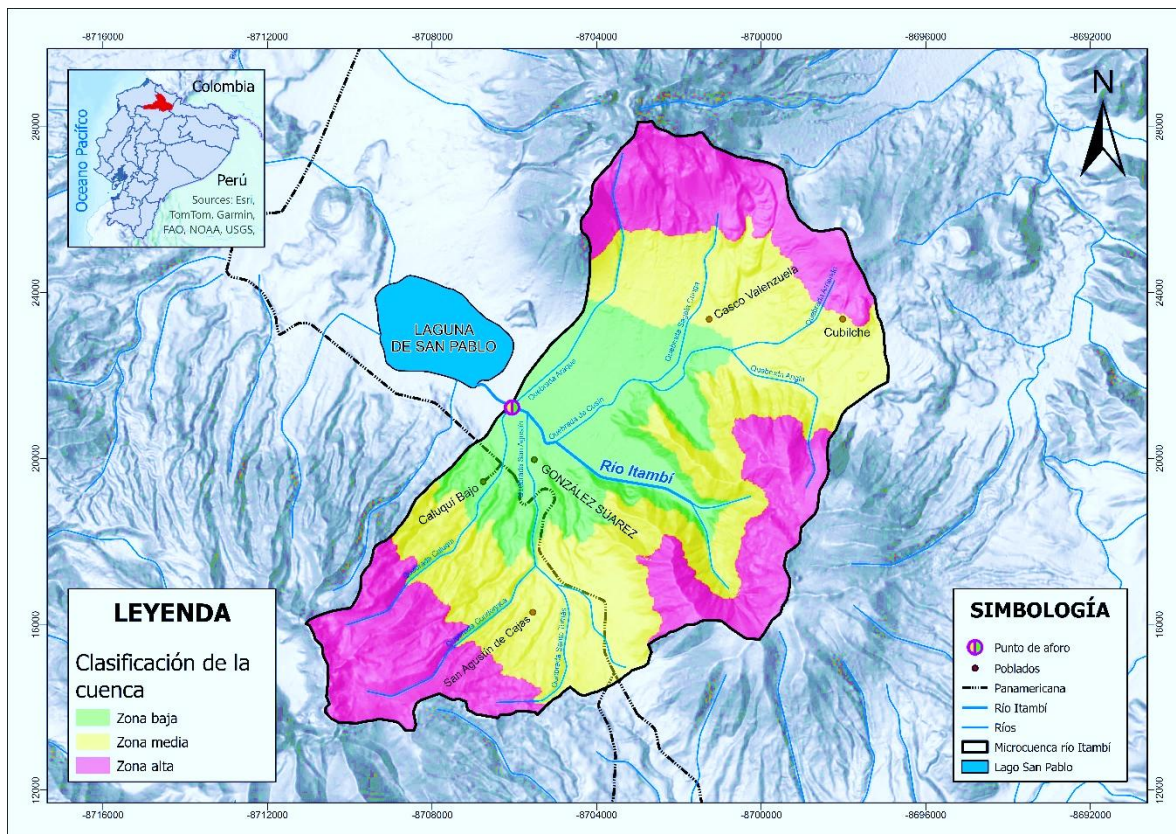
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La microcuenca del río Itambí, está ubicada al norte del Ecuador en la provincia de Imbabura en el cantón Otavalo (Figura 2). Esta microcuenca forma parte de la cuenca del río Ambí, que a su vez pertenece a la cuenca del río Mira. Sus cabeceras se localizan a 3 800 m s.n.m., en el volcán Cusín, el cual, junto con otros volcanes como el Cubilche, Imbabura y Mojanda, conforma el valle interandino del lago San Pablo (Gunkel, 2000). El río Itambí se origina como una pequeña cascada en la zona del páramo del Cusín y se caracteriza por su parte alta en la sierra volcánica por su gradiente superior al 70% (Burneo & Gunkel, 2003).

Figura 2.

Ubicación de la microcuenca del río Itambí



La microcuenca se localiza en el rango altitudinal de 2 600 hasta los 4 600 msnm, con una superficie de 10 824 ha. En la Tabla 4 se indica las coordenadas y altitud de los puntos extremos del perímetro de la microcuenca en el sistema de coordenadas WGS 1984 UTM 17S.

Tabla 4.

Límites de la microcuenca del río Itambí

Punto	X	Y	Altitud (m s.n.m.)
Norte	813953	10027805	4450
Sur	806646	10014032	3960
Este	817294	10016436	3790
Oeste	810179	10021820	2670

La microcuenca del río Itambí, se encuentra en las parroquias rurales de San Pablo, González Suárez y San Pedro de Pitaquí, se localiza en la proximidad del núcleo urbano de la ciudad de Otavalo, en la provincia de Imbabura, Ecuador, y forma parte de la cuenca del lago San Pablo o Imbakucha. Diversas actividades humanas, como la recreación, la ganadería, la agricultura y el crecimiento demográfico, ejercen una presión significativa sobre el ecosistema acuático (Ruales & Dávila, 2019). El clima se caracteriza por presentar temperaturas medias anuales entre 7 °C y 13 °C, con una precipitación media anual de 800 a 1 300 mm y una evaporación media anual de 858 mm. La época seca se extiende desde junio a septiembre, mientras que la lluviosa va de octubre hasta mayo. El caudal medio anual del río Itambí varía entre 1,3 y 1,5 m³/s (Espinosa, 2023).

3.1.1 Enfoque del Estudio

El estudio tiene un enfoque cuantitativo, ya que se basa en la recolección y análisis de datos numéricos que permiten describir, explicar y predecir fenómenos medibles asociados a la erosión hídrica (Sampieri & Mendoza, 2018). Este enfoque permite aplicar técnicas estadísticas y modelación espacial para establecer relaciones entre las variables que componen el modelo RUSLE, cuantificando la pérdida de suelo en ton/ha/año. Además, proporciona la base para la validación de resultados mediante herramientas como la regresión lineal y el análisis estadístico geoespacial, lo que fortalece la rigurosidad científica del estudio.

3.1.2 Tipo de Estudio

Según Mao & Huo (2023), el tipo de estudio es descriptivo, ya que se orienta a caracterizar y documentar los procesos de erosión hídrica presentes en la microcuenca del río

Itambí. Se centra en analizar cómo se manifiestan estos procesos en función de los factores biofísicos del territorio, sin manipular las variables estudiadas. La descripción se realiza con base en información espacial y temporal sobre el recurso suelo, permitiendo identificar zonas críticas de pérdida de suelo y establecer patrones de distribución.

3.1.3 Diseño de Estudio

El diseño metodológico del estudio es de tipo mixto, combinando un enfoque no experimental transversal descriptivo y una fase experimental orientada a la validación del modelo (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018). En la fase no experimental, no se manipulan las variables, sino que se analizan los factores climáticos, edáficos, topográficos y de cobertura del suelo tal como se presentan en el ambiente natural de la microcuenca. Esto corresponde al proceso de simulación de la erosión hídrica mediante el modelo RUSLE, empleando información geoespacial. La fase experimental se desarrolló durante la validación del modelo, donde se efectuaron muestreos directos en el cauce del río Itambí para obtener datos reales de sedimentos en suspensión y comparar estos valores con los resultados del modelo RUSLE (Mao & Huo, 2023). Esta fase permitió contrastar de manera empírica la precisión del modelo bajo las condiciones actuales de la microcuenca.

3.1.4 Morfometría de la Microcuenca del río Itambí

Los parámetros morfométricos permiten analizar cuantitativamente las características físicas de una cuenca, como su forma, relieve y drenaje, esenciales para entender su dinámica hidrológica y geomorfológica. En la microcuenca del río Itambí, estos parámetros, detallados en la Tabla 5, incluyen el área, perímetro, longitud axial, ancho de la microcuenca, índice de compacidad y el factor forma, entre otros.

Tabla 5.

Características físicas de la microcuenca del río Itambí

PARÁMETROS DE FORMA		
PARÁMETRO	CÁLCULO	INTERPRETACIÓN
Área	En la tabla de atributos: A = 108,24 km	SEGÚN Aguirre (2007), POR CRITERIO DE ÁREA: < 4.000 Has: Drenaje menor 4.000 – 15.000 ha: Microcuenca

	A = 10824,5 ha	15.000 – 100.000 ha: Subcuenca 100.000 – 300.000 ha: Cuenca >300.000 Has: Sistema hidrográfico De acuerdo con el área calculada se clasifica como: MICROCUEENCA
Perímetro	P = 48,97 km	< 25 km: Pequeño 25 – 100 km: Medio 100 – 500 km: Grande >500 km: Muy grande De acuerdo con el perímetro calculado se clasifica como: MEDIO
Longitud axial	La = 8,21 km	La longitud axial es la distancia máxima medida desde el punto de salida hacia la parte más distante de la cuenca, siguiendo la dirección del río principal
Ancho promedio	Ap = 13,18 km	El ancho promedio es la distancia medida en sentido perpendicular a la longitud axial. La longitud axial y el ancho promedio forman el rectángulo equivalente de la cuenca
Altitud mínima	Hmín = 2688 msnm	La cota mínima se encuentra en el punto de salida de la cuenca
Altitud máxima	Hmáx = 4533 msnm	La cota máxima se encuentra en la parte más alta de la cuenca
Coeficiente de compacidad	$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	Compara la forma de la cuenca con la de una circunferencia.
	Kc = 1,37	
Factor forma	Ff = 0,62	Intenta medir cuan cuadrada (alargada) puede ser la cuenca. Una cuenca con un factor de forma bajo, esta menos sujeta a crecientes que una de la misma área y
Field Calculator		

Kc	Clasificación
1 a 1,25	Casi redonda a oval-redonda
1,25 a 1,5	Oval redonda a oval-oblonga
1,5 a 1,75	oval oblonga a rectangular oblonga
>1,75	Rectangular

Según el cálculo, la cuenca se clasifica como: **OVAL REDONDA A OVAL – OBLONGA**

Tabla 7.7. Clasificación del factor de forma.

Kf	Característica
<1	Tiende a ser alargada, baja susceptibilidad a las avenidas
1	Cuadrada
>1	Tiende a ser achatada, tendencia a ocurrencia de avenidas

mayor factor de forma.

Según el cálculo, la cuenca tiene una forma: **TIENDE A SER ALARGADA**

PARÁMETROS DE RELIEVE		
PARÁMETRO	CÁLCULO	INTERPRETACIÓN
Altitud media	$H_{med} = 3194,11 \text{ m}$	La altitud media corresponde a una cuenca de montaña.
Desnivel	$De = H_{m\acute{a}x} - H_{m\acute{i}n}$ $De = 1845 \text{ msnm}$	El desnivel de la cuenca o variación de altitud es de: 3413 msnm
Pendiente media	$P_{med} = 33,52 \%$	0 - 5%: Relieve plano 5 - 12%: Relieve ligeramente ondulado 12 - 25%: Relieve ondulado 25 - 50%: Relieve montañoso 50 - 70%: Relieve muy montañoso >70%: Relieve escarpado De acuerdo con el valor calculado, la cuenca tiene: Relieve montañoso
PARÁMETROS HIDROLÓGICOS		
PARÁMETRO	CÁLCULO	INTERPRETACIÓN
Longitud del cauce principal	$L_{cp} = 6,25 \text{ km}$	< 10 km es longitud pequeña 10 - 50 km es longitud media > 50 km es longitud grande El cauce principal tiene una longitud: LONGITUD MEDIA
Tiempo de concentración	$0.0195 \times ((6254,85)^3 / (2780 - 2687))^{0.385}$ $T_c = 82.56 \text{ min}$ $T_c = 1,37 \text{ h}$	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.
Drenajes	Método Strahler	Drenaje orden 3

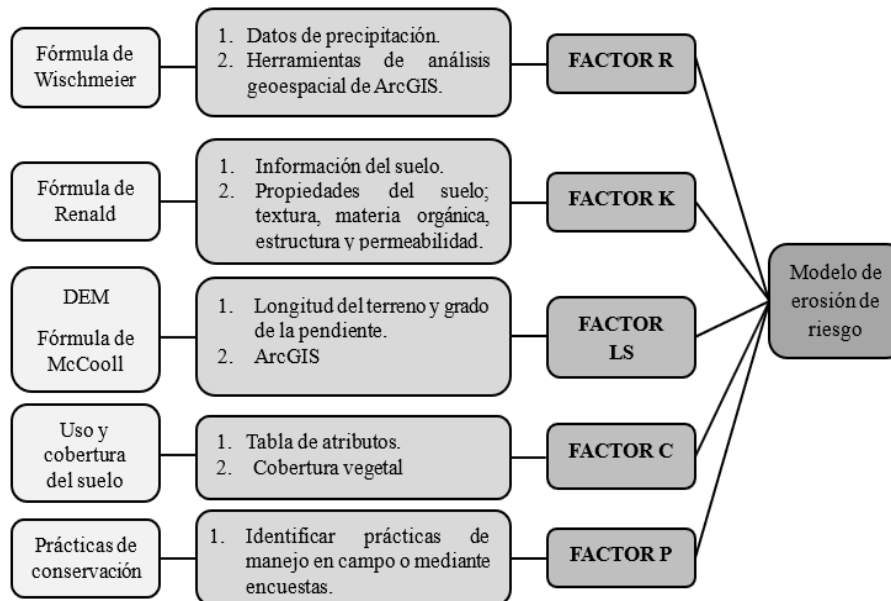
3.2. MÉTODOS DEL ESTUDIO

Los métodos empleados en el trabajo de integración curricular se detallan en el proceso metodológico, que incluyen las técnicas y procedimientos relacionados con la erosión del suelo, la cual está influenciada por la erosividad de la lluvia, ya que precipitaciones más intensas generan mayores niveles de desgaste del terreno. Para cuantificar este fenómeno, se

utilizó la ecuación RUSLE (Wischmeier & Smith, 1978), donde el enfoque metodológico se ilustra en la Figura 3. Este modelo permite evaluar la erosión hídrica del suelo de manera precisa, considerando la relación directa entre la intensidad de la precipitación y la magnitud del impacto erosivo.

Figura 3.

Esquema metodológico de la ecuación RUSLE



3.2.1 Determinación de los Factores Climáticos y Biofísicos

Se realizó la caracterización detallada de la microcuenca del río Itambí, evaluando parámetros como área, perímetro, longitud axial, factor forma y tipo de drenaje. Adicionalmente, se analizó el impacto de la erosión hídrica en el área mediante la aplicación de la ecuación RUSLE, utilizando datos recopilados de la estación hidrológica del INAMHI (H - 026 ITAMBÍ EN LAGO SAN PABLO). Para este análisis, se emplearon herramientas de SIG, lo que permitió generar entidades geográficas y elaborar cartografía temática. Dicha cartografía permitió identificar las zonas más vulnerables a la erosión hídrica y proporcionó información clave para la gestión ambiental de la microcuenca. El aforo realizado en el río Itambí el 30 de noviembre, a las 11:11 h, permitió obtener un caudal promedio de 1,53 m³/s, valor que se utilizó únicamente como referencia del comportamiento del flujo.

3.2.2 Modelo Matemático RUSLE

El modelo RUSLE es un modelo empírico reconocido para calcular la pérdida de suelo por procesos de erosión. Este modelo constituye una mejora del modelo USLE y considera una serie de factores que permiten estimar la tasa promedio anual de erosión del suelo, resultado de la acción de las lluvias y del escurrimiento superficial. En este estudio, para determinar los factores de riesgo asociados a la erosión hídrica, se empleó el modelo matemático RUSLE (Ecuación 1), desarrollado inicialmente por Wischmeier y Smith (1978). Este enfoque fue clave para modelar tanto el escurrimiento como la erosión hídrica en la microcuenca del río Itambí.

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (\text{Ec. 1})$$

La Tabla 6 presenta los factores que componen el modelo RUSLE utilizados en este estudio para evaluar la erosión hídrica en la microcuenca.

Tabla 6.

Factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada

Indicador	Descripción	Unidad de medida
A	Pérdida de suelo por erosión hídrica	(ton/ha/año)
R	Erosividad de la lluvia	(MJ·mm)/(ha·año)
K	Erodabilidad del suelo	(ton·ha·h) /(ha·MJ·mm)
L	Factor de longitud del terreno	(adimensional)
S	Factor pendiente del terreno	(adimensional)
C	Cobertura y manejo de la vegetación	(adimensional)
P	Prácticas de conservación	(adimensional)

3.2.2.1 Factor de Erosividad de la Precipitación (R)

El índice de erosividad de la lluvia, representado por el factor R, evalúa la intensidad y duración de las precipitaciones que contribuyen a la erosión del suelo. El cálculo requiere un análisis detallado de datos climáticos históricos, generalmente de un periodo de 20 a 25 años (De Santos Loureiro & De Azevedo Coutinho, 2001; Wischmeier & Smith, 1978). Este indicador es esencial para comprender la relación entre lluvias intensas y el aumento en la pérdida de suelo, demostrando que la erosión es mayor cuando la fuerza de las precipitaciones

aumenta (Rosales, 2020). Para calcular el factor R, se aplicó la Ecuación 2 propuesta por Wischmeier & Smith (1978).

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \cdot 10^{(1.5 \log_{10}(p_i^2 P) - 0.08188)} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

R (x, y) es el factor R (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ yr⁻¹) en el tamaño de celda (x, y),

p_i = precipitación mensual (mm)

p = precipitación anual (mm).

Para el cálculo de este factor se empleó información del INAMHI (Tabla 7), que influye los valores de precipitación de 4 estaciones meteorológicas (INAMHI, 2019).

Tabla 7.

Estaciones meteorológicas y pluviométricas período 2010-2021

Nombre	Código	Tipo
Ibarra Aeropuerto	M053	AR
Otavalo	M105	CP
Atuntaqui	M021	PV
Cotacachi	M317	PV

Donde:

PV: Estación Pluviométrica

CP: Estación Climatológica Principal

AR: Estación Aeropuerto

3.2.2.2 Factor de Erodabilidad del Suelo (K)

El factor K, propuesto por Wischmeier & Smith (1978), refleja la susceptibilidad de la erosión del suelo. El cálculo se basa en las propiedades edáficas; textura del suelo, materia orgánica, estructura y permeabilidad, siguiendo los lineamientos descritos por Renard et al. (1997). Se aplicó la información cartográfica de tipos de suelo de la microcuenca. Finalmente se aplicó la Ecuación 3. El detalle de los resultados del análisis físico de las muestras de suelo por zona (alta, media y baja) se presenta en el Anexo 1.

$$K_{RUSLE} = f_{sand} \cdot f_{cl-si} \cdot f_{orgc} \cdot f_{hisand} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

K_{USLE} : erodabilidad del suelo del modelo USLE;

f_{sand} : factor de contenido de arena;

f_{cl-si} : factor de contenido de arcilla y limo;

f_{orgc} : factor de contenido de carbono orgánico;

f_{hisand} : factor de altos contenidos de arena.

3.2.2.3 Factor Topográfico (LS)

El factor topográfico (LS) representa el efecto combinado que refleja el impacto de la longitud de la pendiente (L) y su inclinación (S) en la pérdida de suelo (Moore & Wilson, 1992), este factor con las dos características del terreno influye conjuntamente en los procesos de erosión. Según Maetens et al. (2012), tanto el aumento en la inclinación como en la longitud de la pendiente se incrementa la erosión hídrica. El factor LS fue calculado utilizando un DEM con una resolución de 30 metros, obtenido a través del portal web *Earth Explorer*. En este análisis, se empleó la Ecuación 4 propuesta por Renard et al. (1997).

$$LS : \left(\frac{Flow\ accumulation * cell\ size}{22,13} \right)^{0.4} \left(\frac{Sin\ Slope}{0,0896} \right)^{1,3} \quad (Ec. 4)$$

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 (30 m), 22,13: constante de la longitud

Sin Slope: es el seno de la pendiente en radianes.

3.2.2.4 Factor Cobertura del Suelo (C)

EL factor C mide la relación entre la pérdida de suelo y los diferentes tipos de cobertura vegetal (Wischmeier & Smith, 1978). En la microcuenca del río Itambí, se realizó un muestreo al azar para identificar el uso y la cobertura del suelo. Este estudio incluye comprobaciones de campo para clasificar 6 tipos de cobertura vegetal y se georreferenció mediante 514 puntos de muestreo en coordenadas UTM, generados mediante un muestreo aleatorio y posteriormente verificados en campo. De estos puntos, 385 se utilizaron para crear el modelo lo que corresponde aproximadamente 75% de la base de datos, mientras que el 25 % corresponde a

los 129 restantes para la validación del modelo (López de Ullibarri & Pita, 1999). Para determinar la exactitud de una clasificación supervisada, en teledetección se utiliza el índice Kappa. Este indicador evalúa la precisión y confiabilidad de las clasificaciones realizadas al comparar cada pixel con una referencia de verdad conocida (Arenas et al., 2011).

La clasificación supervisada de la cobertura del suelo presentó una exactitud global de 97,52 % y un índice Kappa de 0,97, lo que indica un nivel de acuerdo “casi perfecto” entre la clasificación y los datos de referencia (Anexo 12). La exactitud del productor para las seis clases de cobertura varió entre 93,10 % y 100 %, mientras que la exactitud del usuario varió entre 88,46 % y 100 %. A cada clase de cobertura se le asignaron los siguientes valores (Tabla 8), donde los valores más altos corresponden a coberturas con menor protección del suelo frente a la erosión hídrica.

Tabla 8.

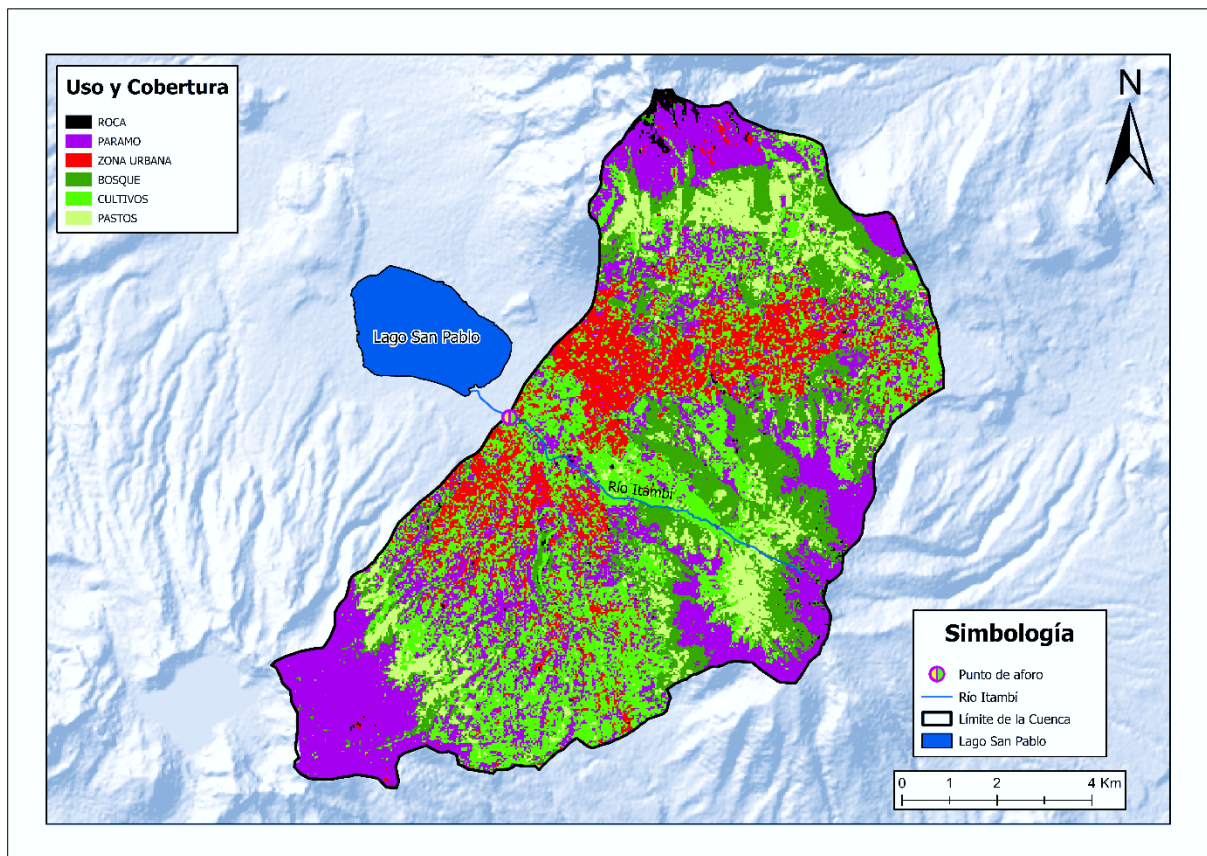
Valores del Factor C

Clases	Factor C
Roca	0
Zona urbana	0
Bosque	0,01
Páramo	0,04
Cultivos	0,35

Nota. Adaptado de (Arias-Muñoz et al., 2023)

Figura 4.

Uso y Cobertura de la microcuenca del río Itambí



3.2.2.5 Factor Prácticas de Conservación (P)

El Factor P representa las prácticas de conservación y se definió entre la erosión bajo prácticas específicas de manejo y la erosión en condiciones donde el flujo sigue la pendiente natural del terreno (Rosales, 2020). Los valores del factor P evalúan la efectividad de las prácticas de conservación del suelo en la reducción de la erosión. Los valores varían entre 0 y 1, donde un valor de 0 representa prácticas de conservación efectivas que minimizan la pérdida de suelo, mientras que un valor de 1 indica la ausencia de dichas prácticas (Vijith et al., 2018).

3.2.3 Simulación de la Erosión Hídrica aplicando el modelo RUSLE

El modelo RUSLE fue aplicado tras la estimación individual de los factores que conforman la ecuación, utilizando los factores que integran el modelo RUSLE. Cada uno de

estos factores fue analizado siguiendo las metodologías recomendadas para caracterizar las condiciones específicas de la microcuenca del río Itambí. Posteriormente, se realizó la multiplicación de estos factores, lo que permitió generar un mapa vectorial que muestra la distribución espacial de la tasa de erosión hídrica, expresada en ton/ha/año para la microcuenca.

3.2.4 Validación del Modelo Hidrográfico RUSLE

En este estudio, se realizó la validación del modelo RUSLE mediante la fórmula presentada en el estudio de Ebrahimzadeh et al. (2018), la cual permite estimar la producción de sedimentos (*Sediment Yield*) según la Ecuación 5. Esta producción se refiere a la cantidad de sedimentos que se acumulan al final de la pendiente o en la salida de las cuencas hidrográficas

$$SY = A \times SDR \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

S_Y = producción total de sedimentos (mm)

A = pérdida anual del suelo (mm)

SDR = cantidad estimada de suelo erosionado (mm)

El valor SY se obtiene a partir de la recopilación de datos en campo y de los simulados por el modelo RUSLE. En campo, se estimó SY mediante el cálculo de la Concentración de Sólidos Suspendidos (CSS) en el río Itambí y su relación con el caudal medio anual del río. El valor SY se obtiene a partir de la recopilación de datos en campo y de los simulados por el modelo RUSLE. En campo, se estimó el SY mediante el cálculo de la Concentración de Sólidos Suspendidos (CSS) en el río Itambí y su relación con el caudal medio anual del río. Para determinarla, se realizaron 12 muestreos de agua en el cauce del río Itambí, en la estación pluviométrica, con tres repeticiones por campaña de muestreo para garantizar la precisión y la consistencia en la cuantificación de la CSS (Anexo 16). A partir de los valores de CSS y del caudal registrado se calculó la producción de sedimentos observada, considerada en este estudio como S_{Y_obs} , que posteriormente se comparó con los valores de SY estimados por el modelo, constituyendo la base del proceso de validación (Figura 4). Además, se obtuvieron los valores de SY simulados mediante las ecuaciones 5 y 6; esta última permite determinar la

cantidad de suelo erosionado en función de la longitud de la pendiente (Tsegaye & Bharti, 2021).

$$SDR = 0,5656 \cdot S^{-0,11} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

0,5656 = constante adimensional

S = superficie de la microcuenca (km²)

-0,11 = exponente que expresa la relación inversa entre el tamaño de la cuenca y el SDR.

Finalmente se compararon los valores simulados de la producción de sedimentos (SY) y los valores observados obtenidos en campo (Anexo 13), a partir de las 12 muestras (Tabla 8). Para este análisis se aplicaron los indicadores PBias y RMSE, de acuerdo con las Ecuaciones 7 y 8, con el fin de evaluar el sesgo y la precisión del modelo, respectivamente, según lo establecido por (Moriassi et al., 2015). Los valores negativos de PBias reflejan una sobreestimación y los positivos una subestimación del modelo, mientras que valores de RMSE cercanos a cero indican un buen ajuste entre los valores simulados (SY_{sf}) y los observados (SY_{rg}). Según Moriassi et al. (2015) el desempeño de un modelo de sedimentos a escala de cuenca puede considerarse satisfactorio, cuando el sesgo porcentual PBIAS se mantiene dentro de ±55 %.

$$PBias = \frac{SY_{ob} - SY_{cal}}{SY_{ob}} \quad (\text{Ec. 7})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum SY_{sf} - SY_{rg}}{n}} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

SY_{cal} = sedimentos calculados en ton/ha/año

SY_{ob} = sedimentos observados en ton/ha/año

SY_{sf} = Sedimentos calculados por el modelo (ton/ha/año)

SY_{rg} = Sedimentos observados o registrados (ton/ha/año)

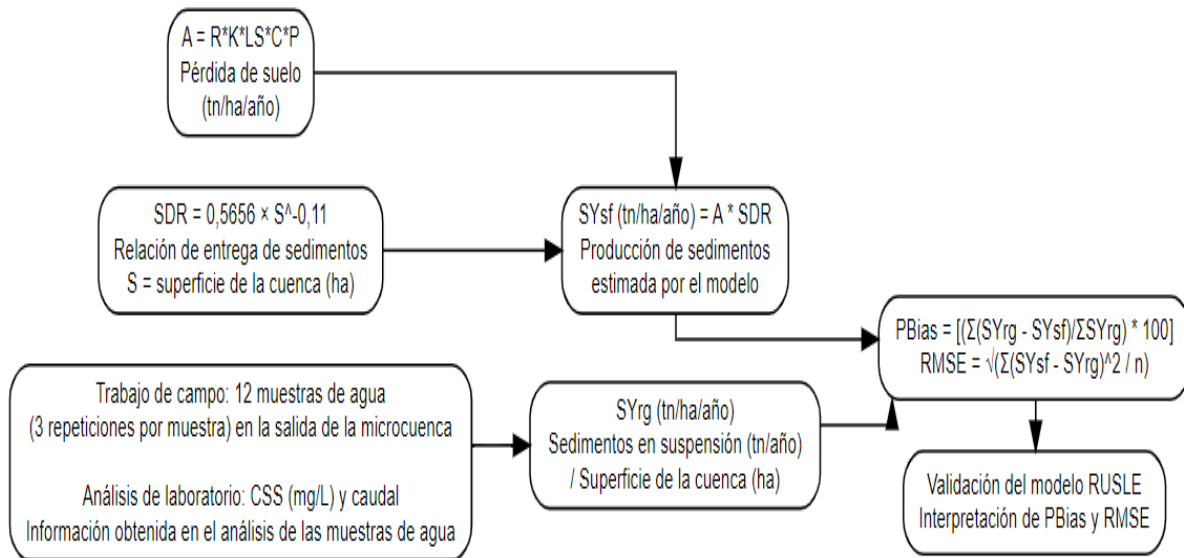
n = Numero total de observaciones utilizadas en comparación

∑(SY_{sf}-SY_{rg}) = Suma de los cuadrados de las diferencias entre valores calculados y observados

En la Figura 5 se presenta un esquema gráfico de la aplicación y validación del modelo RUSE

Figura 5.

Esquema metodológico de la validación del modelo RUSLE



Nota. Adaptado de Rodríguez & Carvajal (2024).

3.3. ESTRATEGIAS DE MANEJO DE RECURSO SUELO

El análisis de áreas susceptibles a la erosión en la microcuenca del río Itambí se realizó mediante una Matriz FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas), herramienta que permitió identificar las Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas del territorio relacionadas con el manejo del recurso suelo. Este análisis facilitó la identificación de las principales presiones antrópicas, del estado actual del suelo y de las respuestas potenciales mediante estrategias de conservación orientadas a reducir la degradación y fortalecer la sostenibilidad del ecosistema (Nikulin & Becker, 2015). La información del uso potencial del suelo, los conflictos de uso, las clases agrológicas y la zonificación del riesgo de erosión obtenida con el modelo RUSLE se sintetizó en la matriz FODA, identificando Fortalezas, Debilidades, Oportunidades y Amenazas de la microcuenca. A partir de dicha matriz se construyó posteriormente la matriz de estrategias, combinando los elementos FO, FA, DO y DA, que se presenta en la Tabla 14.

Para formular las estrategias de manejo del recurso suelo, se realizó un análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) de la microcuenca del río Itambí. Este análisis se planteó con un enfoque holístico, integrando los resultados del modelo RUSLE con otras características biofísicas y de uso del territorio. En primer lugar, se elaboró un mapa de uso potencial del suelo, reclasificando las unidades de capacidad de uso en función de sus limitaciones físicas (pendiente, profundidad efectiva, textura y pedregosidad) y de su aptitud para actividades agrícolas, pecuarias, forestales y de protección. En segundo lugar, se construyó el mapa de conflictos de uso del suelo, mediante la superposición entre el uso actual (obtenido de la clasificación de coberturas) y el uso potencial; cada unidad espacial se clasificó en categorías de uso adecuado, subuso o sobreuso, según la coincidencia o no del uso actual con la capacidad del suelo. Finalmente, se incorporó el mapa de clases agrológicas, que permitió diferenciar las clases II a VIII y las áreas de protección, de acuerdo con sus restricciones para el uso agrícola y su susceptibilidad a la erosión.

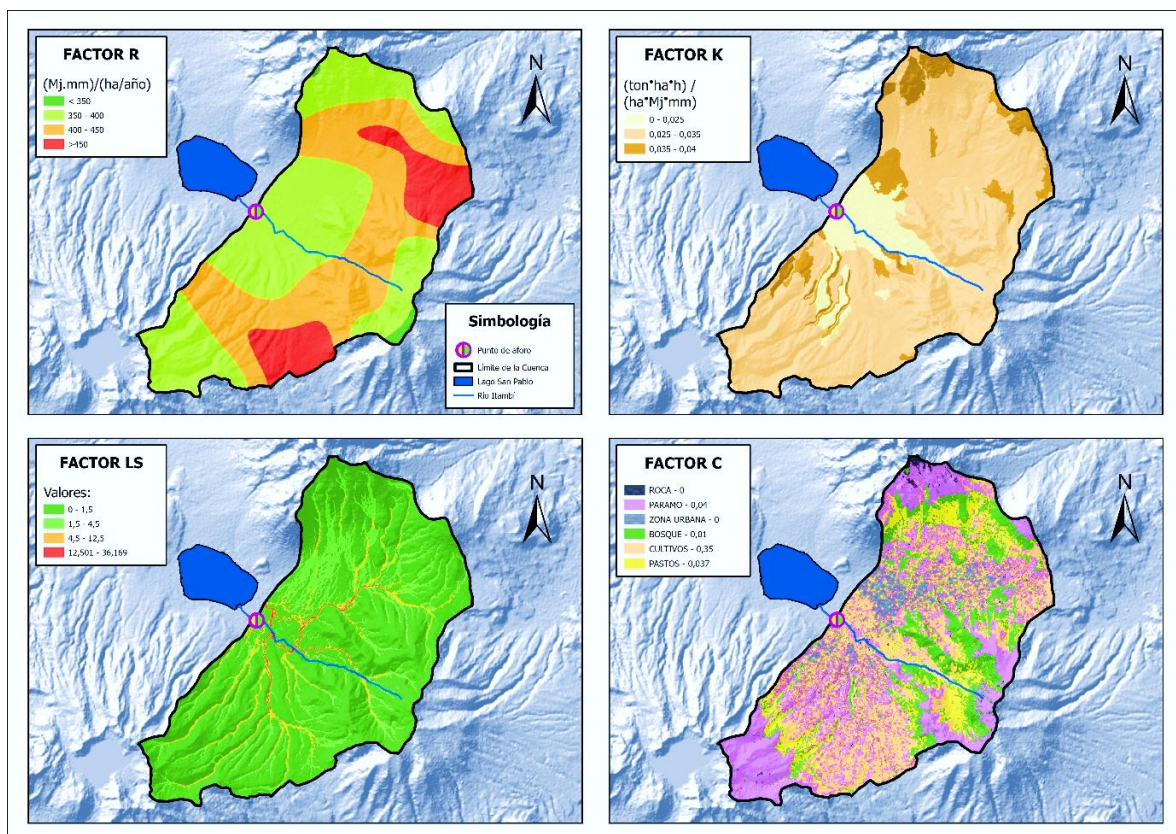
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Determinación de la pérdida de suelo por erosión hídrica

Los valores de cada factor que integra el modelo se indican en la Figura 6.

Figura 6.

Factores del Modelo RUSLE



• Factor de Erosividad de lluvia (R)

El Anexo 2 muestra la distribución de erosividad de lluvia sobre el suelo, expresado en $(MJ \cdot mm)/(ha \cdot año)$. Con base en la aplicación de la fórmula propuesta por Wischmeier (1978) y en el análisis de los datos obtenidos se presenta la erosividad de la lluvia clasificada en cuatro categorías que van de baja a muy alta, las áreas con valores menores a 350 $(MJ \cdot mm)/(ha \cdot año)$ corresponden a baja erosividad, asociada a lluvias de baja intensidad; entre 350 a 400 $(MJ \cdot mm)/(ha \cdot año)$ erosividad moderada y los valores superiores a 450 representan muy alta erosividad, evidenciando sectores con lluvias intensas y elevado potencial

de erosión hídrica. Los valores más altos de erosividad, superiores a $450 (MJ \cdot mm)/(ha \cdot año)$ (muy alta), se concentran principalmente en el sector oriental de la cuenca y en áreas localizadas hacia el sur. Estas zonas corresponden a sectores con mayor intensidad de lluvias, lo que incrementa el riesgo de procesos erosivos, mientras que los valores más bajos $350 (MJ \cdot mm)/(ha \cdot año)$ presentan precipitaciones de menor intensidad, reduciendo así el potencial de erosión hídrica.

- **Factor de Erodabilidad de suelo (K)**

Este factor refleja la susceptibilidad de los suelos a la erosión hídrica, los valores obtenidos varían entre 0 y $0,040 ton \cdot ha \cdot h / (ha \cdot MJ \cdot mm)$, mostrando una distribución espacial heterogénea (Anexo 3). Este factor se clasificó en tres categorías, baja (0 a 0,025), media (0,025 a 0,035) y alta (0,035 a 0,040). En la mayor parte de la microcuenca estos valores corresponden a una erodabilidad natural, los valores más bajos predominan en las zonas altas, donde los suelos presentan mayor cohesión y contenido de materia orgánica, la zona media y baja están asociados a suelos con textura más fina, el valor obtenido de erodabilidad se encuentra dentro del rango considerado muy bajo a moderado, de acuerdo con investigaciones en otras cuencas ubicadas en la zona Andina del Ecuador (Macías et al., 2021; Peralta et al., 2022).

- **Factor Topográfico (LS)**

Los valores del factor LS más bajos se concentran en rangos de 0 a 1,5 y de 1,5 a 4,5; los cuales corresponden principalmente a zonas planas o de ligera pendiente, donde la susceptibilidad a la erosión es mínima y la dinámica del suelo tiende a la acumulación de sedimentos. En cambio, los valores intermedios, que van de 4,5 a 13,5, se asocian con pendientes moderadas donde la erosión comienza a intensificarse (Anexo 4). Esta tendencia coincide con lo señalado por Moore & Wilson (1992), quienes destacan que la disminución de la pendiente reduce la velocidad del flujo. Además, los valores más elevados, entre 12,5 y 36 se localizan en las áreas de mayor pendiente y relieve montañoso, representando las zonas más propensas de la microcuenca por su alta vulnerabilidad al desprendimiento de partículas de suelo, pérdida de materia orgánica y transporte de sedimentos durante eventos de lluvia

intensa. Esta condición coincide con lo señalado por Renard et al. (1997) quienes destacan que en zonas con alta vulnerabilidad es prioritario regular y promover la restauración del suelo.

- **Factor de Cobertura de Suelo (C)**

El factor C refleja la influencia directa de la cobertura vegetal y el uso del suelo en la protección contra los procesos erosivos, constituyendo uno de los parámetros más modificables por las actividades antrópicas (Anexo 5). A partir de la clasificación de usos del suelo y la asignación de valores específicos, se obtuvo que las superficies con valor 0 (zonas urbanas y afloramiento de roca) no contribuyen de manera directa a la erosión, debido a la ausencia de suelo o a procesos de impermeabilización. El páramo presentó un valor de 0,04, caracterizándose por una baja erosividad natural, aunque vulnerable a perturbaciones externas. El bosque alcanzó un valor de 0,01, siendo la cobertura con mayor capacidad de protección frente al impacto de la lluvia y la escorrentía superficial. Los cultivos registraron un valor de 0,35, evidenciando la mayor susceptibilidad a la erosión, asociada a prácticas de deforestación, compactación del suelo y disminución de la cobertura protectora. Los pastos alcanzaron un valor de 0,037, presentando una condición intermedia de riesgo.

Los resultados obtenidos a partir de la aplicación del marco metodológico propuesto por Arias-Muñoz et al. (2023) evidencian patrones espaciales claramente diferenciados en la cobertura del suelo. Se observó que las áreas agrícolas ocupan extensas superficies en el centro y sur de la cuenca, mientras que las coberturas de páramo predominan en las zonas altas del norte y oeste. Esta configuración refleja que el uso agrícola intensivo en sectores con pendientes medias y altas constituye un factor crítico en la aceleración de la pérdida de suelo, especialmente cuando interactúa con condiciones de alta erosividad (factor R) y (factor LS).

- **Factor de Prácticas de Conservación (P)**

En la cuenca del río Itambí no se identificaron prácticas de conservación, por lo que se asignó un valor de $P = 1$, lo que representa la ausencia total de medidas de manejo edáfico (Mahala, 2018; Vijith et al., 2018). Bajo esta condición se construye un escenario base que refleja la vulnerabilidad intrínseca del territorio frente a la erosión. Esta condición se refleja en la Sierra ecuatoriana, donde se reportan malas prácticas agrícolas y deforestación, factores que han reducido la cobertura vegetal y aumento de la erosión. La evidencia presentada resulta

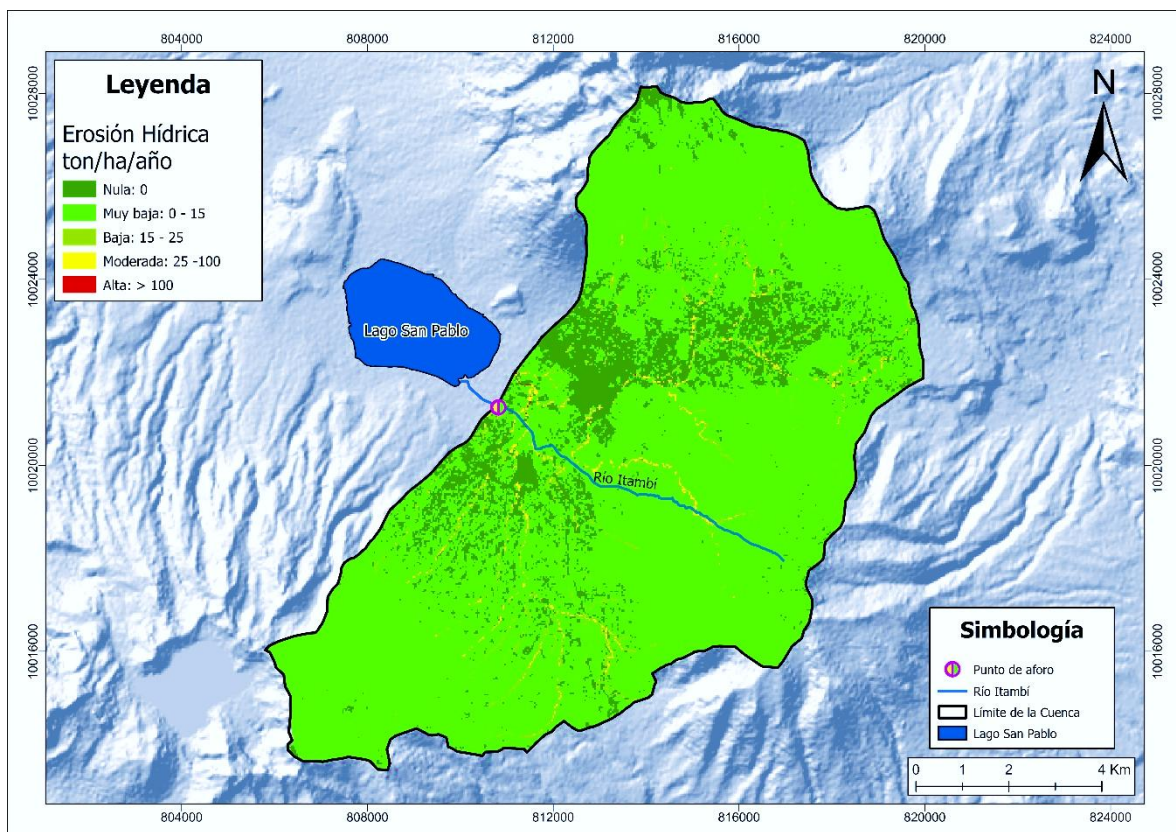
relevante para comprender la magnitud del problema ya que los autores documentan que en diversas microcuencas altoandinas la pérdida de cobertura vegetal no solo se asocia a la expansión agrícola, sino también al abandono de técnicas tradicionales de manejo del suelo (Haro et al., 2024).

4.2. Simulación de la erosión

Los valores de erosión hídrica estimados en la microcuenca se distribuyen en un rango de 0 a 100 ton/ha/año (Figura 7), evidenciando diferentes niveles de susceptibilidad. La categoría predominante es la erosión muy baja, que incluye el 84,91% de la microcuenca (9194,42 ha), seguida por la categoría nula, con un 12,78% (1383,48 ha). Las categorías de erosión baja y moderada ocupan porcentajes reducidos, correspondientes al 1,34% y 0,93%, respectivamente, mientras que la erosión alta representa únicamente el 0,01% del territorio (1,35 ha). Este patrón confirma que la mayor parte de la microcuenca presenta una susceptibilidad mínima a los procesos erosivos, aunque existen áreas puntuales con pendientes pronunciadas donde se concentran los niveles más elevados de pérdida de suelo.

Figura 7.

Susceptibilidad de la Erosión Hídrica de la microcuenca del río Itambí



4.3. Validación del Modelo RUSLE

La estimación del suelo erosionado (SDR) en la microcuenca del río Itambi alcanzó un valor de 0,203, lo que indica que aproximadamente el 20,3% del sedimento generado por la erosión, mientras que la producción simulada de sedimentos (SY) fue de 3,1 ton/ha/año. A partir del caudal y la concentración de sólidos suspendidos tomados en campo, se calculó la producción de sedimentos, es decir, la concentración de sólidos suspendidos multiplicada por el caudal dio como resultado un SY de 3,16 ton/ha/año. Este valor evidencia una adecuada concordancia entre los valores simulados y los observados (Tabla 9), lo que valida la confiabilidad del modelo aplicado. De forma similar Gunkel (2003) reportó en el Lago San Pablo tasas de sedimentación cercanas a 3,5 mm/año, asociadas a la continua entrada de sedimentos finos provenientes de la escorrentía agrícola, evidenciando que los procesos de pérdida de suelo y el transporte de sedimentos se encuentran dentro de los rangos naturales, aunque su persistencia a largo plazo podría afectar la calidad y disponibilidad del agua.

El indicador de sesgo (Pbias) calculado en la validación del modelo presenta una ligera sobreestimación con un valor de -14,62% lo que se considera un resultado muy bueno dentro de los criterios propuestos por Moriasi et al. (2015), quienes señalan que los valores dentro del rango de $< \pm 15$ indican una simulación precisa y confiable. En cuanto al error cuadrático medio (RMSE) se obtuvo un valor de 0,14, lo cual refleja una alta exactitud del modelo RUSLE en la estimación de la erosión hídrica en la microcuenca del río Itambí (Anexo 16). Los valores del RMSE próximos a cero demuestran un ajuste adecuado entre los datos simulados y observados, validando la capacidad predictiva del modelo para representar los procesos erosivos (Singh et al., 2005).

Tabla 9.

Sedimentos en suspensión (SY Observados y Simulados) ton/ha/año

Nro de Muestra	SY Observados	SY Simulado
Muestra 1	0,229	0,254
Muestra 2	0,243	0,254
Muestra 3	0,214	0,254
Muestra 4	0,212	0,254
Muestra 5	0,226	0,254
Muestra 6	0,208	0,254

Muestra 7	0,231	0,254
Muestra 8	0,235	0,254
Muestra 9	0,225	0,254
Muestra 10	0,224	0,254
Muestra 11	0,245	0,254
Muestra 12	0,212	0,254

4.4. Zonificación del riesgo de erosión hídrica

De acuerdo con la clasificación establecida, la mayor extensión territorial presenta erosión muy baja (8 240,9 ha), seguida de áreas con erosión nula (1 462,23 ha) y baja (592,24 ha). Las zonas con erosión moderada y alta abarcan aproximadamente 500 ha, representan áreas con procesos activos de degradación del suelo y requieren medidas prioritarias de manejo. Estas áreas se asocian a pendientes montañosas y usos antrópicos intensivos, como pastoreo continuo o deforestación parcial, los cuales incrementan la susceptibilidad del suelo a la pérdida de su capa fértil.

La erosión presenta una relación directa con la pendiente y el uso de suelo, concentrándose los valores medios y altos (25 a 100 ton/ha/año) en sectores de pendiente pronunciada y coberturas vegetales reducidas, lo que coincide con lo señalado por Koirala et al. (2019), quienes destacan que en regiones andinas los procesos erosivos pueden alcanzar entre 514 a 873 ton/ha/año debido a las condiciones topográficas y climáticas. Estos datos se confirman con el estudio de Arias-Muñoz et al. (2023) con valores de 812,30 ton/ha/año en la cuenca media alta del río Mira, confirmando que las condiciones topográficas y climáticas de las zonas andinas propician procesos erosivos intensos.

En la microcuenca del río Itambí se refleja cinco rangos de erosión hídrica, que varían desde erosión nula (0 ton/ha/año) hasta erosión alta (>100 ton/ha/año). Esta clasificación permite reconocer distintos niveles de afectación del recurso suelo y su relación con las condiciones biofísicas del territorio. Los valores más altos se encuentran en sectores con pendientes pronunciadas, los rangos que predominan corresponden a erosión nula y muy baja, que en conjunto abarcan más del 85% del territorio alrededor de 80833 ha. Este comportamiento hace referencia a los factores moderados del modelo RUSLE, la Tabla 10 no solo cuantifica la extensión de cada categoría, sino que permite priorizar intervenciones en las áreas de erosión moderada y alta.

Tabla 10.

Superficie según niveles de erosión hídrica en la microcuenca del río Itambí

Erosión hídrica	Valores (ton/ha/año)	Área (ha)	Características
Nula	0	1383,48	Zonas no susceptibles al proceso erosivo como embalses, zonas urbanas, entre otros.
Muy baja	0 - 15	9194,42	Zonas con niveles erosión muy bajos y pérdidas de suelo tolerables.
Baja	15 – 25	144,81	Zonas con niveles de erosión bajos y pérdidas de suelo que pueden ser tolerables.
Moderada	25 - 100	100,44	Zonas con procesos erosivos leves, existe erosión, aunque no es apreciable a simple vista.
Alta	>100	1,35	Zonas con pérdida de suelo poco tolerables.
	Total:	10824,50	

El valor promedio de erosión estimado para el área de estudio es de 1,89 ton/ha/año, lo que corresponde a la categoría de erosión muy baja. Este resultado refleja que la mayor parte de la microcuenca del río Itambí mantienen procesos erosivos mínimos y pérdidas de suelo dentro de límites tolerables, lo cual indica una estabilidad edáfica. La magnitud de este valor se explica por la interacción de factores biofísicos y antrópicos. De acuerdo con (Koirala et al., 2019), estos factores influyen directamente en la capacidad del suelo para resistir la acción erosiva del agua, especialmente en zonas montañosas, aunque persisten áreas localizadas que requieren seguimiento y manejo preventivo para evitar el incremento de las tasas de erosión.

4.5. Propuesta de estrategias de conservación del suelo

Las estrategias orientadas a la prevención y control de la erosión hídrica en la microcuenca del río Itambí, área caracterizada por su topografía montañosa con pendientes pronunciadas, donde el riesgo de pérdida de suelo se incrementa significativamente. La estrategia se orienta a fortalecer la función protectora de los bosques de la parte alta de la microcuenca mediante acciones de manejo silvicultura y conservación, complementando estas intervenciones con la construcción focalizada de estructuras de contención y control sedimentario únicamente en las zonas clasificadas con niveles moderados y altos de erosión. Con ello se busca evitar el desprendimiento y transporte de sedimentos hacia el cauce del río

Itambí, contribuyendo además a disminuir la carga sedimentaria que llega al afluente del Lago San Pablo

4.5.1 Importancia de las Estrategias de Conservación

Los resultados obtenidos mediante el modelo RUSLE indican que, si bien el 84,91 % de la microcuenca presenta erosión muy baja y el 12,78 % erosión nula, existen áreas puntuales ubicadas en laderas medias y altas que alcanzan valores de 25 a más de 100 ton/ha/año, clasificadas como zonas de erosión moderada y alta. Estas áreas coinciden con sectores donde la pendiente es pronunciada y el uso del suelo está asociado a actividades agrícolas y de pastoreo, lo que incrementa la degradación del suelo y la exportación de sedimentos hacia el cauce del río Itambí.

En este contexto, la implementación de estrategias de conservación es fundamental para reducir la pérdida de suelo en los sectores críticos identificados, evitar procesos de inestabilidad y disminuir la carga sedimentaria que finalmente llega al cauce principal. Asimismo, las estrategias permiten mantener la funcionalidad del suelo en zonas con uso agrícola y proteger las áreas de páramo y bosque que actualmente controlan gran parte de la escorrentía superficial. Por lo tanto, las medidas propuestas responden directamente a la distribución espacial del riesgo erosivo identificado en la microcuenca y buscan fortalecer su resiliencia ambiental y productiva.

4.5.2 Análisis (FODA)

Se analizaron de manera holística las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas. Por ello, además de evaluar la erosión del suelo e identificar las zonas más propensas al riesgo de erosión, también se identificaron características complementarias de la cuenca, como el uso potencial del suelo y los conflictos. El mapa de uso potencial del suelo (Figura 8) representa la distribución de las distintas categorías, como la agrícola, pecuaria, forestal, de protección y de conservación. Se observa que gran parte del territorio presenta aptitud forestal y de conservación, especialmente en las zonas medias y bajas de la microcuenca, donde las pendientes moderadas y las condiciones edáficas favorecen la cobertura vegetal permanente. Las áreas agrícolas y pecuarias se concentran en las zonas planas del sector centro y norte, donde las características topográficas permiten el desarrollo de actividades productivas. Las

áreas de protección se sitúan en las zonas con mayor pendiente y en las cabeceras de la microcuenca, donde se recomienda mantener la cobertura natural para evitar procesos erosivos y conservar la estabilidad del suelo.

El análisis del uso potencial del suelo muestra una distribución diferenciada de las funciones territoriales (Tabla 12), donde las áreas agrícolas alcanzan el 14,06 % y representa zonas con condiciones favorables para la producción sostenible debido a suelos fértiles y pendientes moderadas; las áreas destinadas a conservación, con 13,85 % corresponden a sectores ecológicamente sensibles que requieren mantener procesos naturales y servicios ecosistémicos fundamentales. El uso forestal, que contempla el 8,28 % se concentra en zonas aptas para manejo de reforestación orientada a la protección del suelo y mejora de la conectividad ecológica, las áreas de uso pecuario con 19,20 % muestra una importante presencia de pastos naturales, siendo necesarias prácticas adecuadas para evitar degradación del suelo. Finalmente, el uso de protección, que constituye la mayor superficie con 44,61 % integra ambientes de alta fragilidad ecológica, zonas de regulación hídrica y pendientes pronunciadas donde se prioriza la preservación y restauración ambiental.

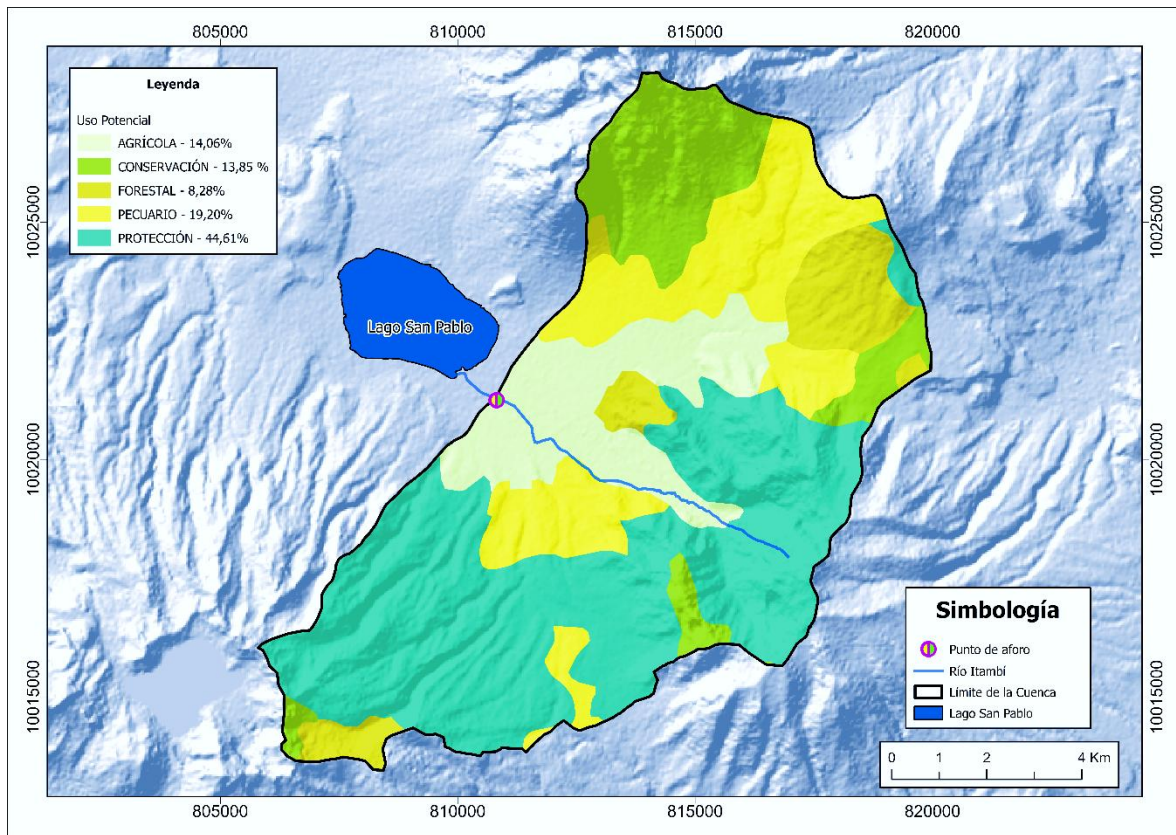
Tabla 11.

Distribución del Uso Potencial del Suelo

Uso Potencial	Área ha	Porcentaje (%)
Agrícola	1521,924	14,06
Conservación	1499,169	13,85
Forestal	896,1793	8,28
Pecuario	2078,381	19,20
Protección	4828,909	44,61
Total:	10824,52 ha	100%

Figura 8.

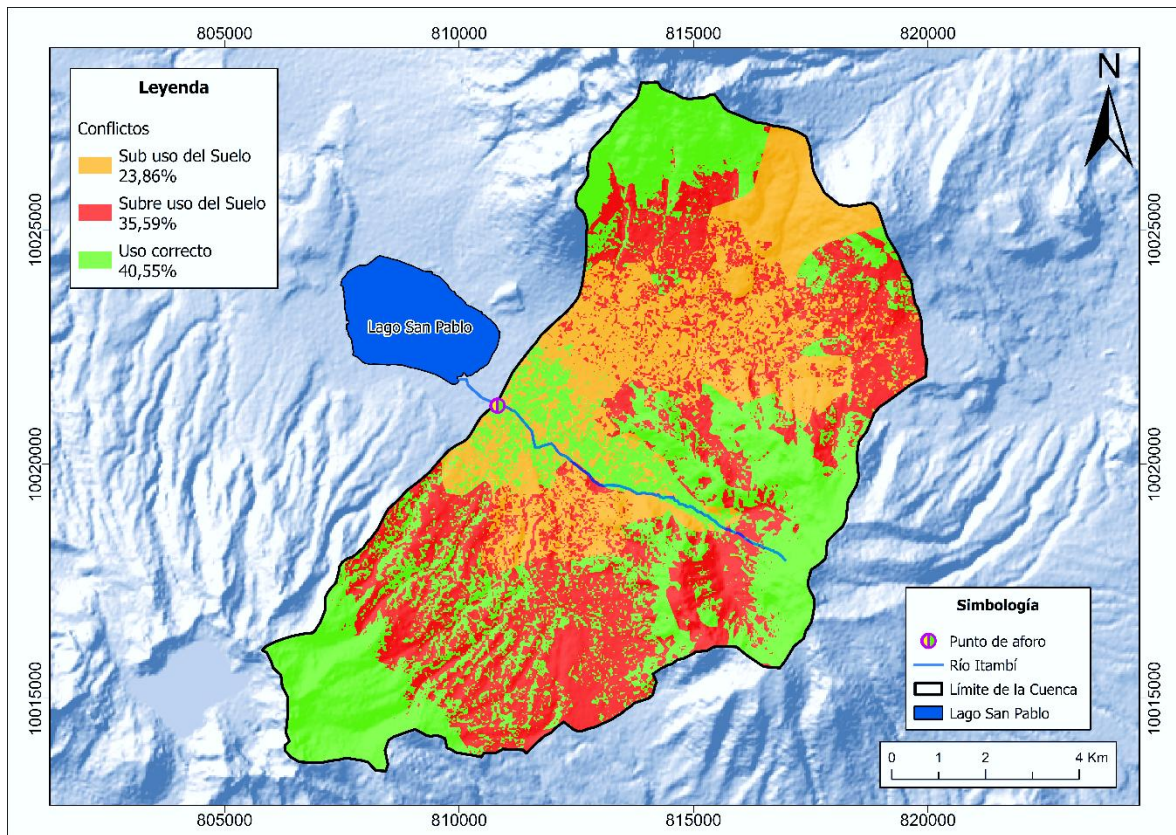
Uso Potencial del Suelo



El mapa de conflictos de uso del suelo (Figura 9) evidencia las discrepancias entre el uso actual y el uso potencial del suelo, clasificadas en tres categorías: uso correcto, sobreuso y subuso del suelo. Los resultados muestran que predomina el sobreuso, localizado principalmente en el centro y oriente de la microcuenca, donde se desarrollan actividades agrícolas o pecuarias en terrenos con aptitud forestal o de protección, lo que incrementa el riesgo de erosión y degradación del suelo. Las áreas de uso correcto al occidente, cerca del Lago San Pablo y en sectores bajos, donde el uso actual coincide con la capacidad del suelo. El subuso se presenta al norte, en zonas con potencial productivo no aprovechado.

Figura 9.

Conflictos de Uso de Suelo



La Tabla 12 del análisis de los conflictos de uso del suelo muestra que el sub uso comprende 23,86 % evidenciando áreas cuyo potencial productivo y ecológico no está siendo aprovechado plenamente, lo que indica oportunidades para mejorar la productividad mediante prácticas sostenibles y una planificación adecuada. El sobre uso del suelo, con 35,59 % representa la segunda mayor proporción e identifica zonas sometidas a una presión superior a su capacidad de soporte, generando riesgos de degradación, erosión y pérdida de funcionalidad ecológica, esta situación requiere la implementación de estrategias de manejo, restauración y reconversión productiva. El uso correcto, con 40,55 % constituye la mayor superficie del territorio evaluado y refleja un equilibrio entre el uso actual y la aptitud natural del suelo, mostrando una gestión adecuada que garantiza estabilidad ecológica y sostenibilidad en las actividades desarrolladas.

Tabla 12.

Distribución de los Conflictos de Uso del Suelo

Conflictos	Área ha	Porcentaje
Sub uso del Suelo	2581,86	23,86
Subre uso del Suelo	3852,27	35,59
Uso correcto	4390,39	40,55
Total:	10824,52 ha	100%

La microcuenca del río Itambí cuenta con siete clases agrológicas (II, III, IV, V, VI, VII, VIII), además de un área clasificada como no aplicable (Tabla 13). Conocer esta clasificación resulta fundamental para una adecuada planificación del uso de suelo, ya que permite orientar las actividades productivas según la limitación y capacidad de cada tipo de terreno, para promover un manejo sostenible de los recursos y evitando su degradación, en concordancia con los principios propuestos por Klingebiel & Montgome (1961). Esta distribución evidencia la necesidad de aplicar estrategias diferenciadas de manejo y conservación, que permita aprovechar el potencial productivo del suelo sin comprometer su estabilidad ecológica. En la Figura 10 se muestra la distribución de las clases agrológicas del suelo presentes en la microcuenca del río Itambí.

Figura 10.

Clases Agrológicas de la microcuenca

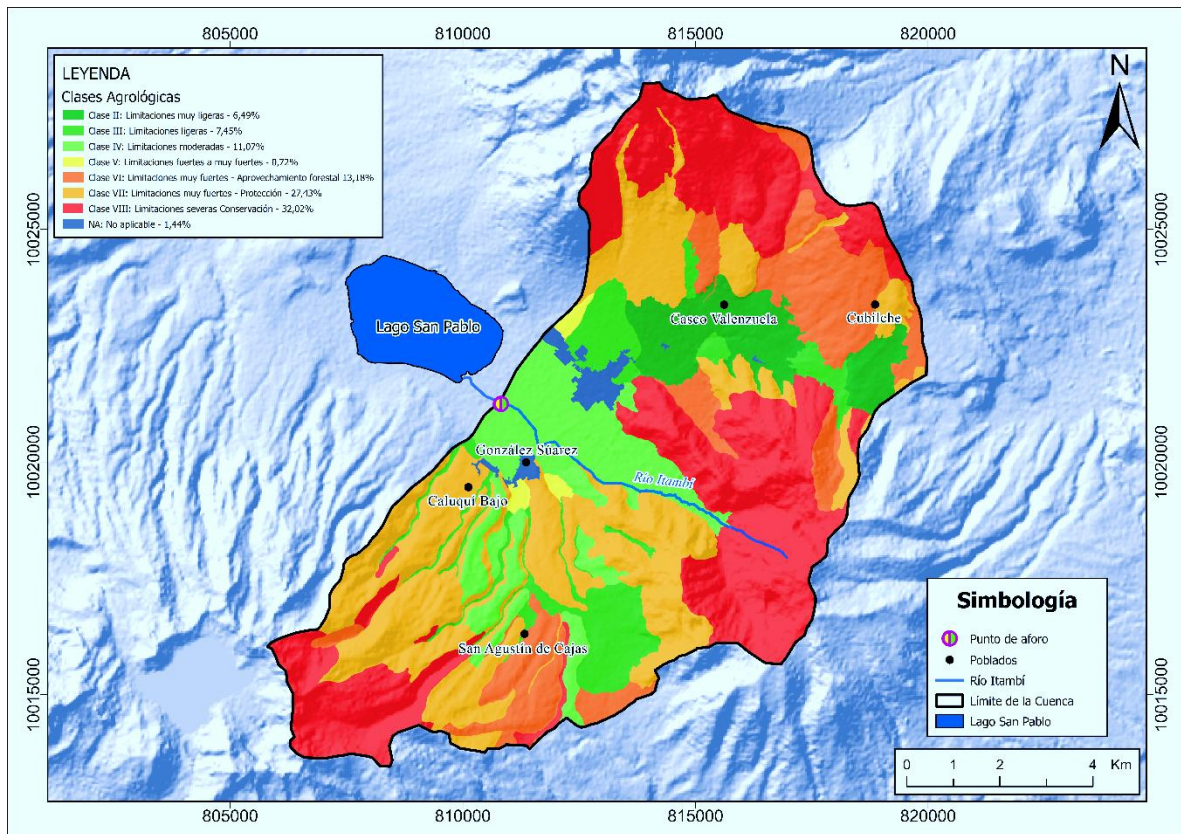


Tabla 13.
Clases agrológicas de la microcuenca del río Itambí

Limitaciones	Clases	Característica	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Limitaciones moderadas	II	Riesgo de erosión moderada	702,69	6,49
Importantes limitaciones	III	Altos riesgos de erosión	828,21	7,65
Limitaciones permanentes y severas	IV	Intensa erosión	1198,38	11,07
Limitaciones fuertes y permanentes	V	Ligero riesgo de erosión	77,12	0,72
Limitaciones muy fuertes	VI	Riesgo de erosión importante	1427	13,18
Limitaciones Permanentes y severas	VII	Severa erosión	2969,19	27,43
Limitaciones extremas	VIII	Zona de protección	3466,68	32,02
Limitaciones extremas	No aplicable	No aplicable	155,25	1,44
		Total:	10824,52 ha	100%

Finalmente, en la Tabla 14 se presentan en detalle las Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (FODA) identificadas en la microcuenca del río Itambí, que inciden en la implementación de las estrategias de conservación.

Tabla 14.

Matriz FODA del área de estudio

Fortalezas	Oportunidades
F1: El 85% del territorio presenta erosión nula o muy baja, lo que evidencia estabilidad edáfica y protección natural del suelo.	O1: Las zonas estables (erosión nula y muy baja) permiten implementar acciones preventivas de conservación.
F2: Amplias zonas con cobertura de páramo y bosque (valores $C = 0,01-0,04$) que actúan como protección natural frente a la erosión.	O2: Sectores con aptitud forestal pueden ser restaurados para fortalecer la resiliencia del paisaje.
F3: Sectores con aptitud forestal y agrológica que favorecen actividades de conservación y restauración (clases II y III).	O3: La existencia de coberturas densas permite ampliar barreras naturales sin afectar la funcionalidad productiva.
F4: Coincidencia entre uso actual del suelo y su aptitud en zonas altas, lo que reduce riesgos de degradación.	O4: La validación del modelo multivariado permite identificar científicamente los factores de mayor impacto para orientar medidas específicas.
Debilidades	Amenazas
D1: El 32,02% del territorio presenta limitaciones extremas, asociado a alta pendiente y suelos frágiles (clase VIII).	A1: Expansión agrícola hacia zonas no aptas (clases VI–VIII) incrementa la erosión hídrica.
D2: Existencia de erosión moderada y alta en ~500 ha (25–100+ ton/ha/año), incrementando la degradación del suelo.	A2: Alta susceptibilidad en sectores con pendiente pronunciada ($LS > 13$).
D3: Erodabilidad media–alta (0,025–0,040) en la zona media y baja, favoreciendo el desprendimiento de partículas.	A3: Disminución de la cobertura vegetal por deforestación o uso intensivo puede aumentar la erosión.
D4: Ausencia de prácticas de conservación ($P = 1$), aumentando la vulnerabilidad del sistema.	A4: Sectores con erosividad alta (>450 MJ·mm/ha·año) incrementan el riesgo de pérdida de suelo durante eventos de lluvia intensa.

4.5.3 Diseño de Estrategias

En la microcuenca del río Itambí se identificó un mal manejo del suelo, lo que ha provocado el desprendimiento de partículas y el deterioro de los ecosistemas. Frente a esta situación, se proponen tres estrategias de manejo vinculadas a los niveles de erosión identificados en la microcuenca, aplicando la metodología FODA para orientar la planificación (Tabla 15).

Tabla 15.

Matriz de estrategias FA, FO, DO y DA derivadas del análisis FODA de la microcuenca del río Itambí

Tipo	Combinación	Estrategia derivada
FA	F2 + A1	Fortalecer los muros naturales forestales para reducir el impacto de la expansión agrícola.
FA	F3 + A2	Restauración forestal en zonas de alta pendiente para amortiguar riesgos de erosión severa.
FO	F1 + O1	Implementar medidas de conservación preventiva en zonas estables para evitar degradación futura.
FO	F2 + O3	Aumentar franjas de protección ecológica aprovechando la cobertura existente.
DO	D2 + O2	Restaurar zonas con erosión moderada/alta usando aptitud forestal identificada.
DO	D3 + O4	Reordenamiento del uso del suelo en áreas con conflicto, basado en evidencias multivariadas.
DA	D1 + A1	Restringir el uso agrícola en zonas de limitación extrema (>32%) para evitar erosión severa.
DA	D4 + A3	Implementar prácticas obligatorias de conservación en suelos de erodabilidad moderada y alta.

Nota: Las combinaciones F, D, O y A corresponden a las Fortalezas, Debilidades, Oportunidades y Amenazas identificadas en la matriz FODA de la microcuenca del río Itambí.

- **Estrategia 1: Fortalecimiento de muros naturales forestales en la microcuenca del río Itambí**

Ubicación: Sector Pijal alto

Justificación

El análisis espacial de erosión muestra que gran parte de las pendientes de la microcuenca presentan cobertura boscosa, lo cual cumple la función de muros naturales al estabilizar el suelo, reducir la velocidad del escurrimiento y disminuir significativamente la pérdida de sedimentos. Esta estrategia se enfoca en reforzar la función protectora de los bosques existentes como barreras naturales (Figura 11).

Objetivo general

Disminuir el transporte de sedimentos al río Itambí mediante el fortalecimiento de la cobertura boscosa como muro natural.

Meta

Controlar el aporte de sedimentos al río Itambí mediante acciones integradas de control, protección y manejo sostenible del territorio.

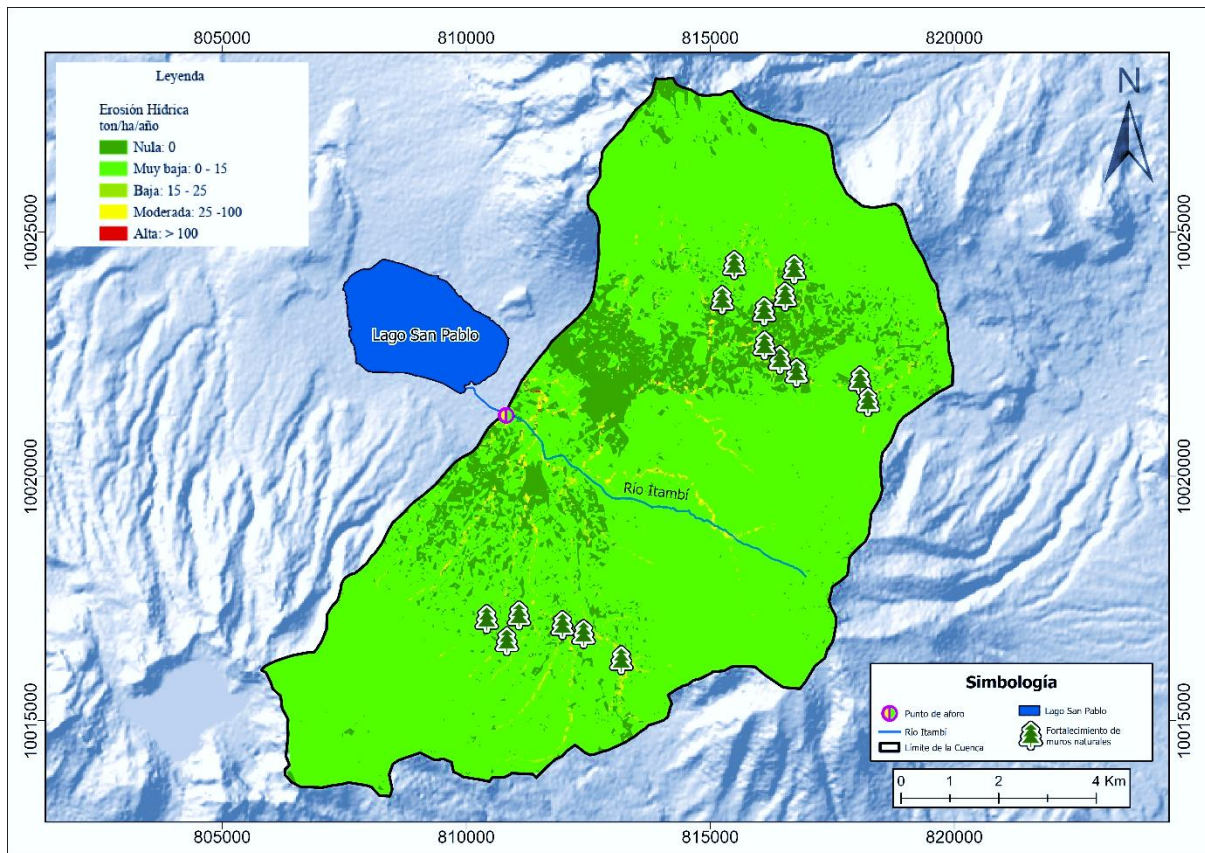
Tabla 16.

Programa de fortalecimiento de muros naturales forestales

Actividades	Indicadores	Medios de verificación	Alcance	Responsables
Identificación de pendientes con cobertura forestal.	Mapa de cobertura vegetal.	Informe técnico, fotografías.	Zonas con pendientes dentro de la microcuenca del río Itambí.	GAD parroquial, técnicos agroambientales.
Enriquecimiento forestal.	N° de especies identificadas.	Registros de visita, fichas de campo.	Pendientes con cobertura forestal.	Gad parroquial, comunidades.
Implementación de prácticas de conservación de suelo.	Reducción de escorrentía.	Fotografías comparativas, fichas de monitoreo.	Franjas de protección.	GAD parroquial, técnicos.
Monitoreo de estabilidad de barreras naturales	Variación en cobertura.	Informes de campo, base de datos.	Taledes intervenidos.	Comunidades, universidades.

Figura 11.

Ubicación geográfica de la estrategia 1



Nota: Estrategia FA (Fortalezas–Amenazas), derivada de la combinación F2 (cobertura forestal protectora) y A1 (riesgo de expansión agrícola en zonas sensibles).

- **Estrategia 2: Construcción focalizada de estructuras de contención en zonas moderadas de erosión de la microcuenca del río itambí**

Ubicación: Sector Araque alto

Justificación

El análisis espacial de erosión evidencia que los sectores clasificados como moderados presentan pérdida de suelo asociada al escurrimiento superficial, lo que incrementa el aporte de sedimentos hacia el cauce principal. Construir estructuras de control en estas áreas permite interrumpir el transporte de sedimentos, estabilizar el terreno y reducir el arrastre hacia el afluente del Lago San Pablo (Figura 12).

Objetivo general

Construcción de estructuras de contención y estructuras de control sedimentario en los sectores de mayor erosión.

Meta

Reducir la inestabilidad de las pendientes y el arrastre de sedimentos mediante la construcción focalizada de obras de contención y medidas complementarias de control y manejo del suelo.

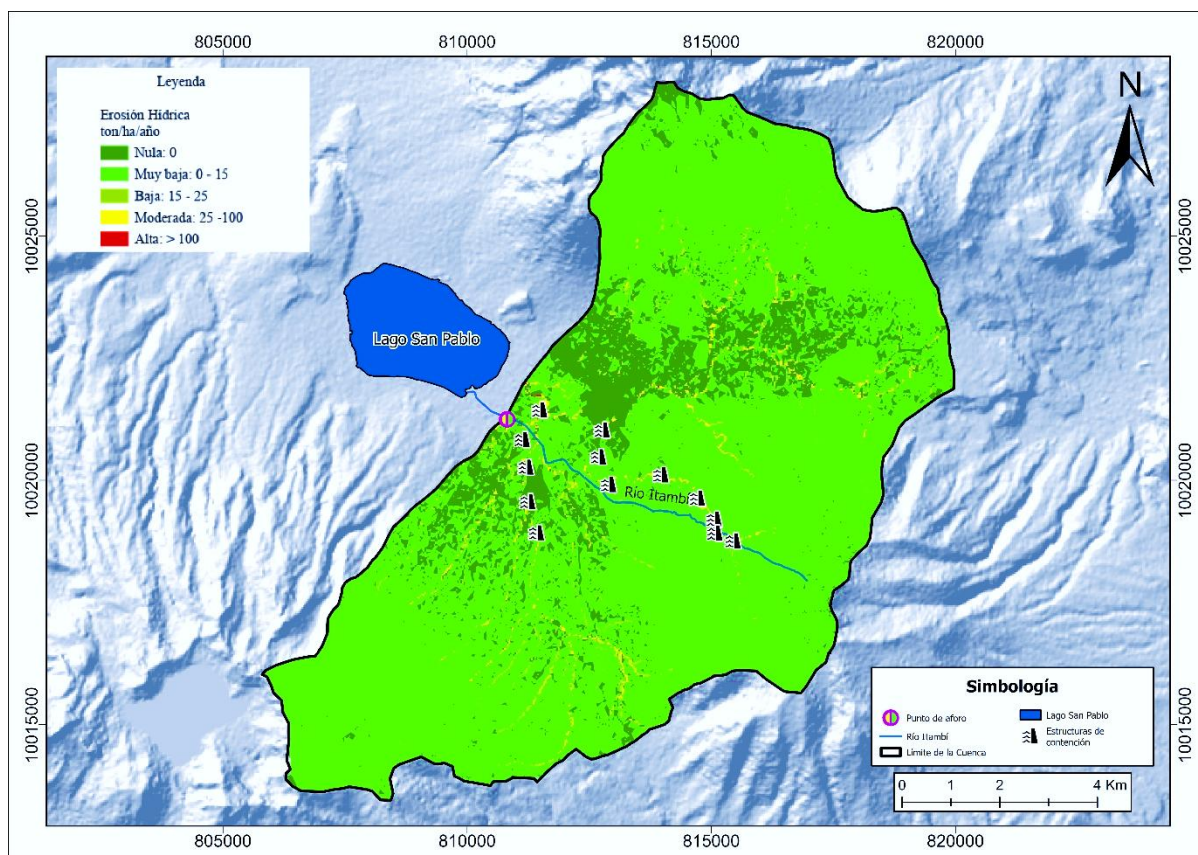
Tabla 17.

Programa de construcción de estructuras de contención en zonas moderadas

Actividades	Indicadores	Medios de verificación	Alcance	Responsables
Identificación de zonas de erosión moderada.	Número de puntos evaluados, mapa de erosión hídrica	Informes técnicos, mapas temáticos.	Pendientes con erosión moderada.	GAD parroquial, técnicos agroambientales.
Diseño de estructuras (zanjas de infiltración)	Número de diseños aprobados.	Actas de aprobación.	Sitios priorizados.	Gad parroquial, comunidades.
Construcción de las estructuras de retención y control sedimentario.	Numero de zonas intervenidas.	Listado de estructuras, fotografías.	Bordes de talud	GAD parroquial, técnicos
Monitoreo del comportamiento de las estructuras.	Número de monitoreo.	Registro de visitas, fotografías.	Sectores intervenidos.	Comunidades, universidades

Figura 12.

Ubicación geográfica de la estrategia 2



Nota: Estrategia DO (Debilidades–Oportunidades), derivada de la combinación D2 (zonas con erosión moderada/alta) y O2 (sectores con aptitud para procesos de restauración y manejo).

- **Estrategia 3: Mejorar la estructura y capacidad de infiltración del suelo mediante sistemas agroforestales**

Ubicación: Sector Araque bajo

Justificación

El análisis espacial de la erosión hídrica y de los conflictos de uso del suelo evidencia que en el sector Araque bajo se concentran parcelas agrícolas con erosión alta (>100 ton/ha/año) en una superficie aproximada de 1,35 ha, asociadas a pendientes medias y altas y a prácticas de manejo poco conservacionistas. Estas condiciones favorecen el escurrimiento superficial, la pérdida de la capa fértil y el aumento del aporte de sedimentos al río Itambí y,

posteriormente, al lago San Pablo. Frente a este escenario, la implementación de sistemas agroforestales (por ejemplo, franjas de árboles y arbustos nativos en contorno, cercas vivas y bandas rompeviento asociadas a cultivos anuales o pastos) permite incrementar la cobertura permanente del suelo, mejorar la estructura y la infiltración, reducir la velocidad del flujo superficial y diversificar la producción. La estrategia se focaliza en estas 1,35 ha críticas y en sus áreas adyacentes, donde la combinación de uso agrícola y alta erosión hace prioritaria la adopción de sistemas agroforestales como medida de conservación del suelo (Figura 13).

Objetivo general

Disminuir la erosión hídrica mediante el fortalecimiento de la estructura del suelo y el aumento de su capacidad de infiltración, mediante la implementación de sistemas agroforestales adaptados a la zona.

Meta

Aumentar la capacidad y estabilidad del suelo mediante la implementación de sistemas agroforestales en zonas agrícolas con erosión alta, reduciendo la erosión hídrica y el transporte de sedimentos al río Itambí.

Tabla 18.

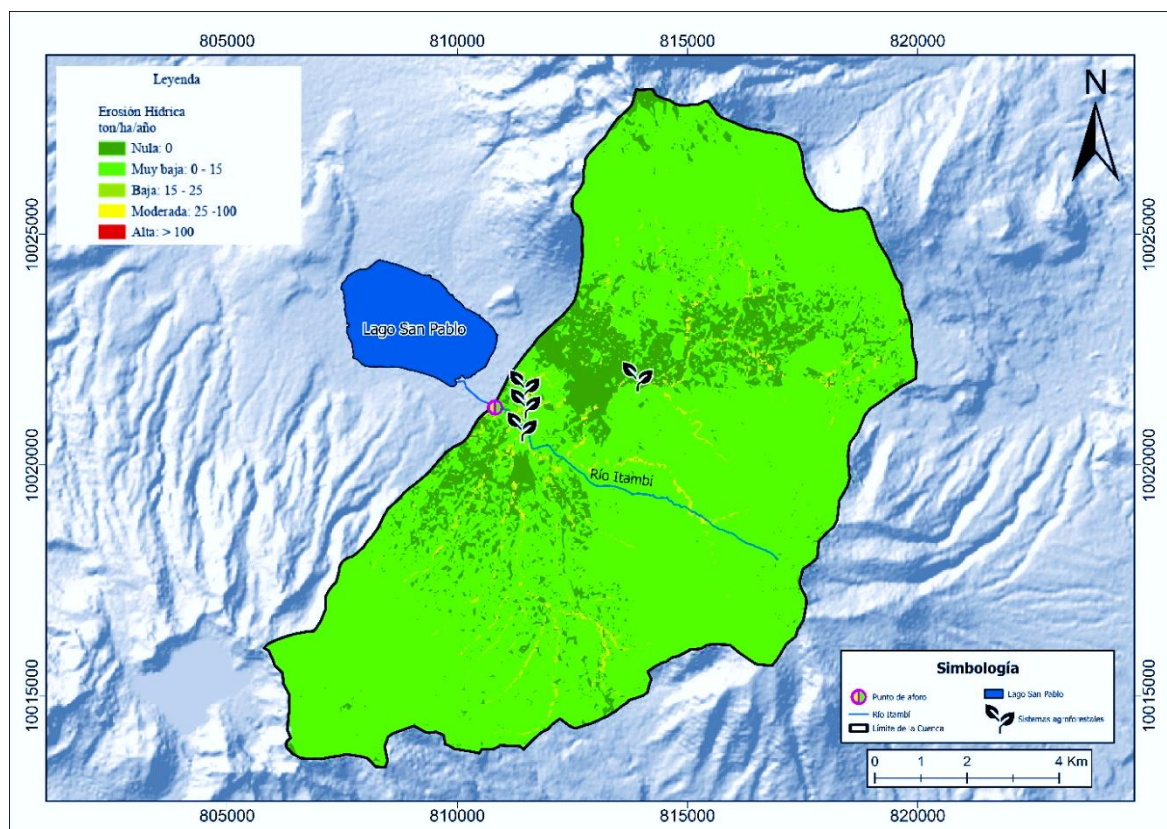
Programa para mejorar la estructura y capacidad de infiltración

Actividades	Indicadores	Medios de verificación	Alcance	Responsables
Identificación de suelos agrícolas con mayor erosión y aptitud para sistemas agroforestales.	Mapa de cobertura, mapa de erosión hídrica y áreas priorizadas para agroforestería.	Informes de campo, mapas temáticos.	Zonas agrícolas con erosión alta.	GAD parroquial, técnicos agroambientales.
Diseño participativo del sistema agroforestal en	Lista de especies agroforestales seleccionadas; número de parcelas diseñadas.	Plan de manejo, fichas técnicas de especies.	Parcelas priorizadas por diagnóstico	Gad parroquial, comunidades.

parcelas demostrativas				
Establecimiento e implementación de franjas y parcelas agroforestales.	Número de parcelas/franjas agroforestales establecidas;	Registro de siembra, fotografías.	Parcelas y franjas intervenidas.	GAD parroquial, técnicos
Monitoreo de infiltración, estabilidad del suelo y desempeño del sistema agroforestal.	Número de monitoreos realizados; resultados de infiltración y estabilidad del suelo.	Pruebas de infiltración, fotografías comparativas.	Sectores intervenidos.	Comunidades, universidades

Figura 13.

Ubicación geográfica de la estrategia 3



Nota: Estrategia DA (Debilidades–Amenazas), derivada de la combinación D3 (conflictos de uso en áreas agrícolas con erosión) y A3 (pérdida de cobertura vegetal que incrementa la erosión).

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

La aplicación del modelo RUSLE integrado a los Sistemas de Información Geográfica permitió evaluar de forma robusta el riesgo de erosión hídrica en la microcuenca del río Itambí, mostrando que la erosión es muy baja (1,89 ton/ha/año) pero con una clasificación de pérdida superiores a 100 ton/ha/año en zonas de pendientes pronunciadas que comprometen la estabilidad edáfica. La combinación de factores climáticos, edáficos, topográficos y de cobertura vegetal, junto con la validación estadística del modelo (PBIAS = -14,62% y RMSE = 0,14), confirman que la aproximación metodológica es adecuada para el diagnóstico del riesgo y constituye una base técnica para priorizar intervenciones de conservación.

La cuantificación de la pérdida de suelo demuestra que la microcuenca del río Itambí presenta, en términos globales, tasas de erosión muy bajas (promedio 1,89 ton/ha/año), lo que indica condiciones edáficas relativamente estables y pérdidas dentro de rangos tolerables para la mayoría del territorio. Sin embargo, la presencia de áreas con erosión moderada (25–100 ton/ha/año) y alta (>100 ton/ha/año), aunque espacialmente restringidas (alrededor de 100,44 ha y 1,35 ha respectivamente), pone en evidencia sitios críticos de degradación asociados a pendientes pronunciadas y coberturas agropecuarias con prácticas de manejo poco conservacionistas.

El diagnóstico de riesgo, complementado con el análisis de conflictos de uso del suelo y de las clases agrológicas, permitió definir medidas de mitigación orientadas a los sectores más vulnerables. A partir de esta integración de información se plantean tres estrategias principales: el fortalecimiento de los muros naturales forestales (bosques), la construcción focalizada de estructuras de contención en áreas con erosión moderada y la implementación de sistemas agroforestales. Estas estrategias se diseñaron bajo un enfoque preventivo y de manejo integral del territorio, con el fin de reducir la pérdida de suelo y el aporte de sedimentos hacia el río Itambí.

La pérdida de suelo causada por erosión hídrica en la microcuenca del río Itambí se caracteriza por una tasa media anual muy baja de 1,89 ton/ha/año, lo que indica que, en términos globales, la mayor parte del territorio presenta condiciones edáficas relativamente

estables y pérdidas dentro de rangos tolerables. Sin embargo, la zonificación del riesgo mostró áreas susceptibles con erosión moderada (25–100 ton/ha/año) y alta (>100 ton/ha/año), que abarcan aproximadamente 100,44 ha y 1,35 ha, respectivamente, localizadas principalmente en laderas medias y altas con uso agrícola y pastizales. Estas zonas constituyen lugares críticos de degradación del suelo, donde la combinación de pendientes pronunciadas y prácticas de manejo poco conservacionistas incrementa significativamente la pérdida de suelo y deben ser priorizadas en las acciones de conservación.

La comparación entre la producción de sedimentos simulada por el modelo y la observada a partir de la carga sólida del INAMHI determinó un PBIAS de -14,62 % y un RMSE de 0,14, valores que se encuentran dentro de los rangos de desempeño satisfactorio propuestos para modelos de sedimentos. Esto indica que no existen diferencias significativas entre los valores de SY estimados por el modelo RUSLE y los observados en campo, por lo que el modelo puede considerarse estadísticamente confiable para representar la producción de sedimentos en la microcuenca, lo que confirma la aceptación de la hipótesis nula formulada.

5.2. Recomendaciones

Fortalecer la base de datos ambientales asociada a los factores climáticos, topográficos y de cobertura vegetal, debido a que estos elementos son determinantes en el modelo de la erosión hídrica. Una mejora en la disponibilidad y calidad de esta información permitirá incrementar la precisión del modelo RUSLE en futuras investigaciones.

Aplicar de manera prioritaria todas las estrategias de conservación identificadas en el estudio donde las zonas de erosión tienen por categoría moderada y alta ubicadas en las zonas de Araque alto, Araque bajo y Pijal alto

Los resultados de la investigación deben ser socializados e incorporados como insumo técnico en la actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) de la parroquia San Pablo y del cantón Otavalo. La información cartográfica servirá de base para orientar el uso del suelo y definir políticas locales de restauración.

Aplicar un seguimiento periódico para evaluar la efectividad de las estrategias implementadas junto con la actualización de datos sobre erosión y ajustar medidas de manejo según condiciones climáticas y antrópicas.

REFERENCIAS

- Alizadeh, M., Zabihi, H., Wolf, I. D., Langat, P. K., Pour, A. B., & Ahmad, A. (2022). Remote sensing technique and ICONA based-GIS mapping for assessing the risk of soil erosion: A case of the Rudbar Basin, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 81(21). <https://doi.org/10.1007/S12665-022-10634-Z>
- Amundson, R., Berhe, A. A., Hopmans, J. W., Olson, C., Sztein, A. E., & Sparks, D. L. (2015). Soil and human security in the 21st century. *Science*, 348(6235). https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1261071/ASSET/B26B4A15-8B7A-4343-9A7E-905AFB9848F4/ASSETS/GRAPHIC/348_1261071_FA.JPEG
- Ananda, J., & Herath, G. (2003). Soil erosion in developing countries: a socio-economic appraisal. *Journal of Environmental Management*, 68(4), 343–353. [https://doi.org/10.1016/S0301-4797\(03\)00082-3](https://doi.org/10.1016/S0301-4797(03)00082-3)
- Arias-Muñoz, P., Saz, M. A., & Escolano, S. (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. <https://doi.org/10.14198/INGEO.22390>
- Armando Vázquez-Valencia, R., García-Almada, R. M., El, P., De, A., Sustentabilidad, L. A., El, E. N., & De Cihuatlán, M. (2018). Indicadores PER y FPEIR para el análisis de la sustentabilidad en el municipio de Cihuatlán, Jalisco, México. *Cathi.Uacj.Mx*, 27(53–1), 1–26. <https://doi.org/10.20983/noesis.2018.3.1>
- Asamblea Nacional. (2016). *Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión De Suelo*. <https://www.gob.ec/regulaciones/ley-organica-ordenamiento-territorial-uso-gestion-suelo>.
- Azouma, O. Y. (2010). Design of a ploughshare without mouldboard: An alternative solution to the no-tillage in tropical zone. *Indian Journal of Science and Technology*, 3(3), 238–242. <https://doi.org/10.17485/ijst/2010/v3i3/29689>
- Bermúdez, F. L., & Díaz, A. R. (1998). Erosión y Desertificación: Implicaciones Ambientales y Estrategias de Investigación. *Papeles de Geografía*, 28. <https://revistas.um.es/geografia/article/view/45421>
- Burneo, P. C., & Gunkel, G. (2003). Ecology of a high Andean stream, Rio Itambi, Otavalo, Ecuador. *Limnologica*, 33(1), 29–43. [https://doi.org/10.1016/S0075-9511\(03\)80005-1](https://doi.org/10.1016/S0075-9511(03)80005-1)
- Chauhan, C., Singh, M., Vinayak, A. B., & Uday, K. V. (2024). Quantification of the effectiveness of mitigation measures on erosion potential of soil with image analysis.

- Journal of Soils and Sediments*, 24(1), 98–110. <https://doi.org/10.1007/S11368-023-03598-5>
- Concepción Espinosa Manosalvas. (2023). *Lineamientos para el manejo del recurso hídrico de las zonas potenciales con aptitud de riego, cuenca hidrográfica del río Itambí, Provincia de Imbabura*.
- Constitución de la República del Ecuador. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*.
- Coulthard, T. J., Hancock, G. R., & Lowry, J. B. C. (2012). Modelling soil erosion with a downscaled landscape evolution model. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(10), 1046–1055. <https://doi.org/10.1002/ESP.3226>
- Croke, J., & Nethery, M. (2006). Modelling runoff and soil erosion in logged forests: Scope and application of some existing models. *CATENA*, 67(1), 35–49. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2006.01.006>
- Darbayeva, T., Ramazanova, N., Chashina, B., Berdenov, Zh., Mendybayev, E., Wendt, J. A., & 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(SI)), 396–404. [https://doi.org/10.22438/jeb/41/2\(SI\)/JEB-18](https://doi.org/10.22438/jeb/41/2(SI)/JEB-18)
- De Santos Loureiro, N., & De Azevedo Coutinho, M. (2001). A new procedure to estimate the RUSLE EI30 index, based on monthly rainfall data and applied to the Algarve region, Portugal. *Journal of Hydrology*, 250(1–4), 12–18. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00387-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00387-0)
- Durán Zuazo, V. H., Rodríguez Pleguezuelo, C. R., Rodríguez, B. C., Ruiz, B. G., Gordillo, S. G., Sacristán, P. C., Tavira, S. C., & García-Tejero, I. F. (2019). Agricultura subtropical en terrazas: estrategias sostenibles para la conservación del suelo. *Libro de Restauración y Gestión de La Salud Del Suelo*, 231–278. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8570-4_7
- Ebabu, K., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., ... E. A.-S. of the T., & 2019, undefined. (2019). Effects of land use and sustainable land management practices on runoff and soil loss in the Upper Blue Nile basin, Ethiopia. *ElsevierK Ebabu, A Tsunekawa, N Haregeweyn, E Adgo, DT Meshesha, D Aklog, T MasunagaScience of the Total Environment, 2019•Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718332455>
- Ebrahimzadeh, S., Motagh, M., Mahboub, V., & Mirdar Harijani, F. (2018). An improved RUSLE/SDR model for the evaluation of soil erosion. *Environmental Earth Sciences*, 77(12), 1–17. <https://doi.org/10.1007/S12665-018-7635-8/FIGURES/11>

- Espinosa, S. (2014). La erosión en Ecuador, un problema sin resolver. *Dialnet.Unirioja.EsJ EspinosaSiembra*, 2014•dialnet.Unirioja.Es. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8234808.pdf>
- Fernández-Gómez, R., Mateos, L., & Giráldez, J. V. (2004). Furrow irrigation erosion and management. *Irrigation Science*, 23(3), 123–131. <https://doi.org/10.1007/s00271-004-0100-3>
- GAD - San Pablo. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia San Pablo*.
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., & Comerma, J. (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1001699/1/ATLASLAC.pdf>
- Girma, R., Moges, A., Land, C. F., & 2023, undefined. (2023). Integrated modeling of land degradation dynamics and insights on the possible future management alternatives in the Gidabo river basin, Ethiopian rift valley. *Mdpi.ComR Girma, A Moges, C FürstLand*, 2023•mdpi.Com. <https://www.mdpi.com/2073-445X/12/9/1809>
- Gómez, M. S. (2017). Aplicación de la metodología FPEIR al diagnóstico ambiental de los procesos de degradación de suelos por erosión en el departamento de Casanare. *Repository.Unimilitar.Edu.CoMD Gómez Salcedorepository.Unimilitar.Edu.Co*. <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/16476>
- González, M. J., Marauri, P., Merino Juncadella, A., & Edeso Fito, J. M. (1997). Determinación de la tasa de erosión hídrica en función del manejo forestal: la cuenca del río Santa Lucía (Gipuzkoa). *Lurralde: Investigación y Espacio*, ISSN 0211-5891, No 20, 1997, Págs. 67-104, 20(20), 67–104. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=300964>
- Gunkel, G. (2003). Limnología de un Lago Tropical de Alta Montaña, en Ecuador: características de los sedimentos y tasa de sedimentación. *Revista de Biología Tropical*, 51(2), 381–390. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442003000200010&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Gutiérrez-Elorza, M. (2006). *Erosión e Influencia del Cambio Climático The influence of Climatic Change on Erosion*.
- Haro, R., Espinosa, J., Moreno, V., Suango, V., Haro, R., Espinosa, J., Moreno, V., & Suango, V. (2024). Estimación de la erosión de la Sierra centro y norte del Ecuador, utilizando geoinformación. *Siembra*, 11. [https://doi.org/10.29166/siembra.v11i3\(Especial\)](https://doi.org/10.29166/siembra.v11i3(Especial))
- Hernández-Sampieri, R., & Christian Paulina Mendoza Torres, D. (2018). *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN: LAS RUTAS CUANTITATIVA, CUALITATIVA Y MIXTA*.

- INAMHI. (2019). *Catálogo de Datos Abiertos*.
<https://datosabiertos.gob.ec/dataset/?organization=instituto-nacional-de-meteorologia-e-hidrologia-inamhi>
- Islam, Md. R., Jaafar, W. Z. W., Hin, L. S., Osman, N., & Karim, Md. R. (2020). Development of an erosion model for Langat River Basin, Malaysia, adapting GIS and RS in RUSLE. *Applied Water Science*, 10(7), 165. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01185-4>
- Javier, C., & Martínez, V. (2025). *Prácticas de conservación para suelos degradados: contribución para mejorar su calidad, productividad, mitigar el cambio climático y la seguridad alimentaria, en Paraguay*. <https://hdl.handle.net/10347/40216>
- José Fernández Párraga, A. I., Alexander Rodríguez Tejena, Á. I., & Alfredo Delgado Gutiérrez III, D. (2023). Análisis de la distribución espacial de la erodabilidad del suelo en la cuenca del Río Esmeraldas-Ecuador. *Polo Del Conocimiento: Revista Científico - Profesional, ISSN-e 2550-682X, Vol. 8, No. 2 (febrero 2023), 2023, Págs. 82-95, 8(2), 82-95*. <https://doi.org/10.23857/pc.v8i2>
- Klingebiel and Montgome, A. P., & Kellooo, C. E. (1961). *LAND CAPABILITY CLASSIFICATION FOREWORD*.
<http://www.edafologia.net/evaluacion/tema2/agrologicas.htm>
- Koirala, P., Thakuri, S., Joshi, S., & Chauhan, R. (2019). Estimation of Soil Erosion in Nepal Using a RUSLE Modeling and Geospatial Tool. *Geosciences 2019, Vol. 9, Page 147, 9(4), 147*. <https://doi.org/10.3390/GEOSCIENCES9040147>
- León, G. S. De. (2011). Estimación de la Erosión Hídrica y su relación con el uso de suelo en la Cuenca del Río Cahoacán, Chiapas, México. *Aqua-LAC*, 3(1), 45–54. <https://doi.org/10.29104/PHI-AQUALAC/2011-V3-1-06>
- Li, Z., Qin, W., Qi, Z., Shang, G., Ma, Q., Guo, Q., & Yin, Z. (2019). Remote sensing analysis on gully morphology and spatial distribution in rolling hilly region and mountainous and hilly region of Northeast China. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 35(14), 133–140. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2019.14.017>
- Liu, B., Xie, Y., Li, Z., Liang, Y., Zhang, W., Fu, S., Yin, S., Wei, X., Zhang, K., Wang, Z., Liu, Y., Zhao, Y., & Guo, Q. (2020). The assessment of soil loss by water erosion in China. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(4), 430–439. <https://doi.org/10.1016/J.ISWCR.2020.07.002>
- Liu, J., Wang, Z., Gao, S., & Zhang, K. (2012). Experimental study on hydro-dynamic mechanism of sheet erosion processes on loess hillslope. *Nongye Gongcheng*

- Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 28(7), 144–149.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2012.07.024>
- Liu, R., Thomas, B., Shi, X., Zhang, X., Wang, Z., Catena, Y. Z., & 2021, undefined. (2021). Effects of ground cover management on improving water and soil conservation in tree crop systems: A meta-analysis. *ElsevierR Liu, BW Thomas, X Shi, X Zhang, Z Wang, Y ZhangCatena*, 2021•Elsevier.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816220306354?casa_token=A5y9aagCUEEAAAAA:MkviA-iwghI60g3Q3IPeyoRq-by1fkuCVxndCqIvkvURyrhvhxdMqVM9oRw2kfYT2RVVhry9ZQ
- López, H., Menes, M., Mota, J., ... E. S.-T., & 2003, undefined. (2023). Integración de la EUPS a un SIG para estimar la erosión hídrica del suelo en una cuenca hidrográfica de Tepatitlán, Jalisco, México. *Redalyc.Org*. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57315595010.pdf>
- Macías, L., Loor, D., Ortiz-Hernández, E., Casanova, G., & Delgado, D. (2021). Comparative Analysis of Soil Slope Stability, Using Dynamic and Pseudo-static Methods on the Garrapata - Santa Maria Road, Manabi Province, Ecuador. *Proceedings of the 1st International Conference on Water Energy Food and Sustainability (ICoWEFS 2021)*, 505–515. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75315-3_55
- Maetens, W., Vanmaercke, M., Poesen, J., Jankauskas, B., Jankauskiene, G., & Ionita, I. (2012). Effects of land use on annual runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean. *Http://Dx.Doi.Org/10.1177/0309133312451303*, 36(5), 599–653.
<https://doi.org/10.1177/0309133312451303>
- Mahala, A. (2018). Soil erosion estimation using RUSLE and GIS techniques—a study of a plateau fringe region of tropical environment. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(13), 1–18. <https://doi.org/10.1007/S12517-018-3703-3/METRICS>
- Mao, Z., & Huo, W. (2023). Descriptive Study. In *Textbook of Clinical Epidemiology: for Medical Students* (pp. 37–60). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3622-9_3
- Mirzaee, S., Ghorbani-Dashtaki, S., & Kerry, R. (2020). Comparison of a spatial, spatial and hybrid methods for predicting inter-rill and rill soil sensitivity to erosion at the field scale. *CATENA*, 188, 104439. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2019.104439>
- Moore, I. D., & Wilson, J. P. (1992). Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 47(5), 423–428. <https://www.jswnonline.org/content/47/5/423>

- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/TRANS.58.10715>
- Nearing, M. A. (2013). Soil Erosion and Conservation. *Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity: Second Edition*, 365–378. <https://doi.org/10.1002/9781118351475.CH22>
- Organización De Las Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible | Programa De Las Naciones Unidas Para El Desarrollo*. <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>
- Peralta, G. V. V., Calderón, D. R. V., Rangel, J. A. M., & Paz, J. R. G. (2022). Medidas de prevención ante riesgos de erosión y fenómenos de remoción en masa. Área de incidencia “Ciudad Arcángel”, cantón Ibarra, Ecuador. *SATHIRI*, 17(1), 268–287. <https://doi.org/10.32645/13906925.1115>
- Renard, K., Foster, G., Weesies, G., McCool, D., & Yoder, D. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=cQEUAAAAYAAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=Renard,+K.,+Foster,+G.,+Weesies,+G.,+McCool,+D.,+%26+Yoder,+D.+\(1997\).+Predicting++soil+erosion+by+water:+a+guide+to+conservation+planning+with+the+R+evised++54++Universal+Soil+Loss+Equation+\(RUSLE\).+In+Agricultural+Handbook+No.+703+\(p.+404\).&ots=HDMjne5yRd&sig=zpDLdDdE_qyKv_uEf7b-24fwu2M](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=cQEUAAAAYAAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=Renard,+K.,+Foster,+G.,+Weesies,+G.,+McCool,+D.,+%26+Yoder,+D.+(1997).+Predicting++soil+erosion+by+water:+a+guide+to+conservation+planning+with+the+R+evised++54++Universal+Soil+Loss+Equation+(RUSLE).+In+Agricultural+Handbook+No.+703+(p.+404).&ots=HDMjne5yRd&sig=zpDLdDdE_qyKv_uEf7b-24fwu2M)
- Rodríguez Tituaña, A. M., & Carvajal Caluguillin, M. M. (2024). *Modelamiento de la erosión hídrica en la Cuenca Hidrográfica del Río Ambi*. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/16666>
- 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*. UNIGIS.
- RUALES MESTANZA, M. E. D. L. N. J. (2019). *Efectos del cambio del uso del suelo sobre el servicio ecosistémico hídrico de provisión en la microcuenca del río Itambi*.
- Secretaría Nacional de Planificación. (2024). *Plan de Desarrollo para el Nuevo Ecuador 2024-2025 – Secretaría Nacional de Planificación*. <https://www.planificacion.gob.ec/plan-de-desarrollo-para-el-nuevo-ecuador-2024-2025/>
- Singh, J., Knapp, H. V., Arnold, J. G., & Demissie, M. (2005). Hydrological modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(2), 343–360. <https://doi.org/10.1111/J.1752->

1688.2005.TB03740.X;JOURNAL:JOURNAL:17521688;WGROU:STRING:PUBLIC
ATION

- Tsegaye, L., & Bharti, R. (2021). Soil erosion and sediment yield assessment using RUSLE and GIS-based approach in Anjeb watershed, Northwest Ethiopia. *SN Applied Sciences*, 3(5), 1–19. <https://doi.org/10.1007/S42452-021-04564-X/TABLES/10>
- Vijith, H., Hurmain, A., & Dodge-Wan, D. (2018). Impacts of land use changes and land cover alteration on soil erosion rates and vulnerability of tropical mountain ranges in Borneo. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 12, 57–69. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2018.09.003>
- Viney, N., & Sivapalan, M. (1999). A conceptual model of sediment transport: application to the Avon River Basin in Western Australia. *Wiley Online LibraryNR Viney, M Sivapalan Hydrological Processes, 1999•Wiley Online Library*. [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19990415\)13:5%3C727::AID-HYP776%3E3.0.CO;2-D](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/(SICI)1099-1085(19990415)13:5%3C727::AID-HYP776%3E3.0.CO;2-D)
- Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J., & Melillo, J. M. (1997). Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science*, 277(5325), 494–499. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.277.5325.494>
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*.
- Yang, J. (2006). Predicting soil erosion rates of smallwatersheds in the Wolong area based on USLE and GIS. *Journal of Tsinghua University*.

ANEXOS

Anexo 1. Análisis de muestras de suelo tomadas en la zona alta, media y baja de la cuenca

LABONORT		
LABORATORIOS NORTE		
Juan Hernández y Jaime Roldos(M.Mayorista) Ibarra-Ecuador. Telf. cel. 0999591050		

REPORTE ANÁLISIS DE TEXTURA

DATOS DEL PROPIETARIO NOMBRE : CHRISTIAN E. SANTANDER CIUDAD : Otavalo TELÉFONO : 0981464556 E-MAIL : santanderc1223@gmail.com

DATOS DE LA PROPIEDAD PROVINCIA : Imbabura CANTÓN : Otavalo PARROQUIA : San Pablo SITIO : Cuenca Hidrográfica Itambi

DATOS DE MUESTRA SITIO : Cuenca Hidrográfica Itambi MUESTRA : Suelos

DATOS DE LABORATORIO No REPORTE : R 12085- 86-87 No MUES.LAB.: L 12085- 86-87 FECHA DE INGRESO : 2025 02 24 FECHA DE REPORTE : 2025 02 26
--

RESULTADOS:

MUESTRA	# CAMPO	% ARENA	% LIMO	% ARCILLA	CLASE TEXTURAL
12085	Cuenca Baja	49,20	40,00	10,80	FRANCO
12086	Cuenca Media	51,60	35,60	12,80	FRANCO
12087	Cuenca Alta	45,20	38,00	16,80	FRANCO

Métodos :

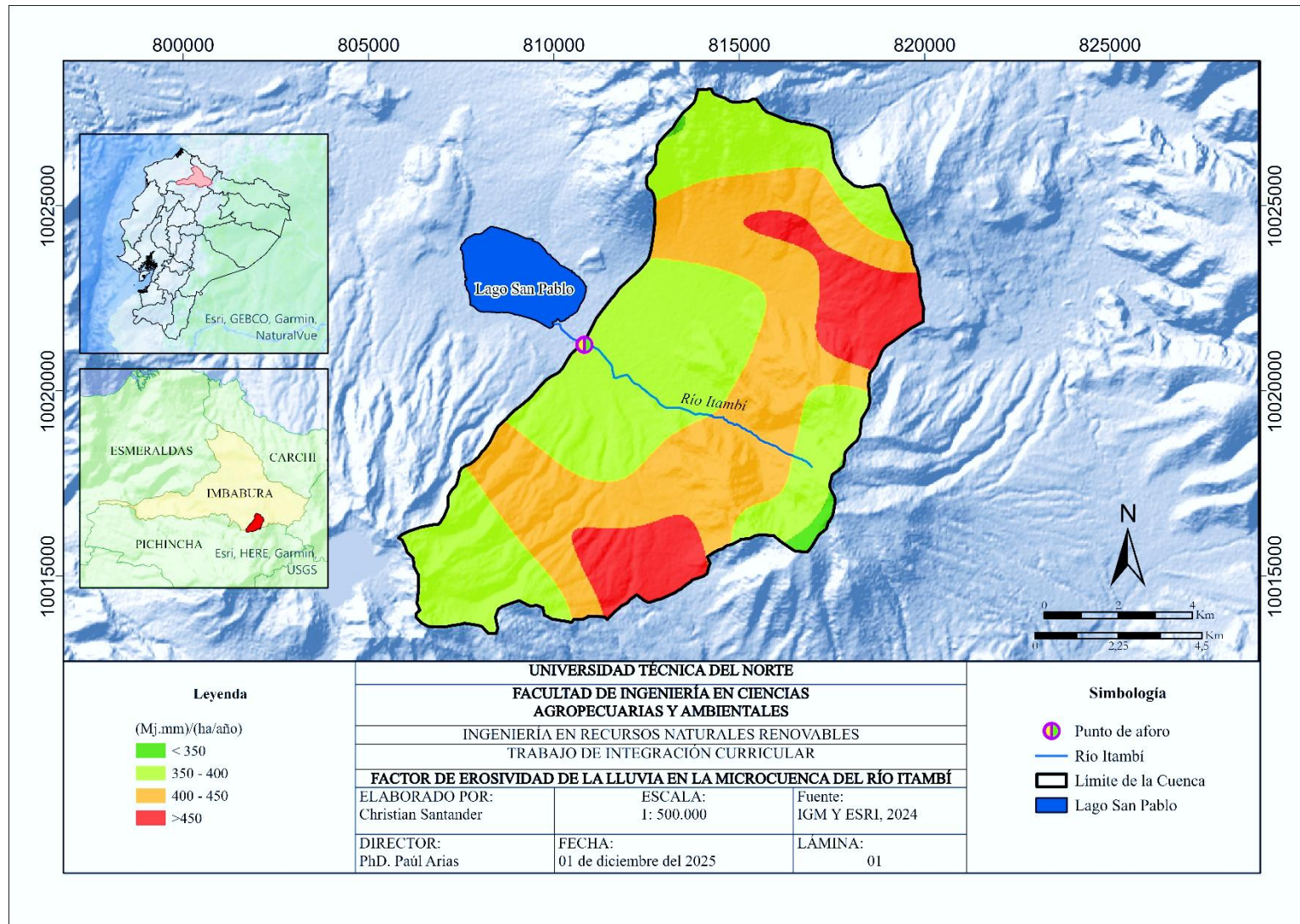
Textura: Bouyoucos(análisis granulométrico por densimetría).


Dr. Quím. Edison M. Miño M.
RESPONSABLE DE LABONORT



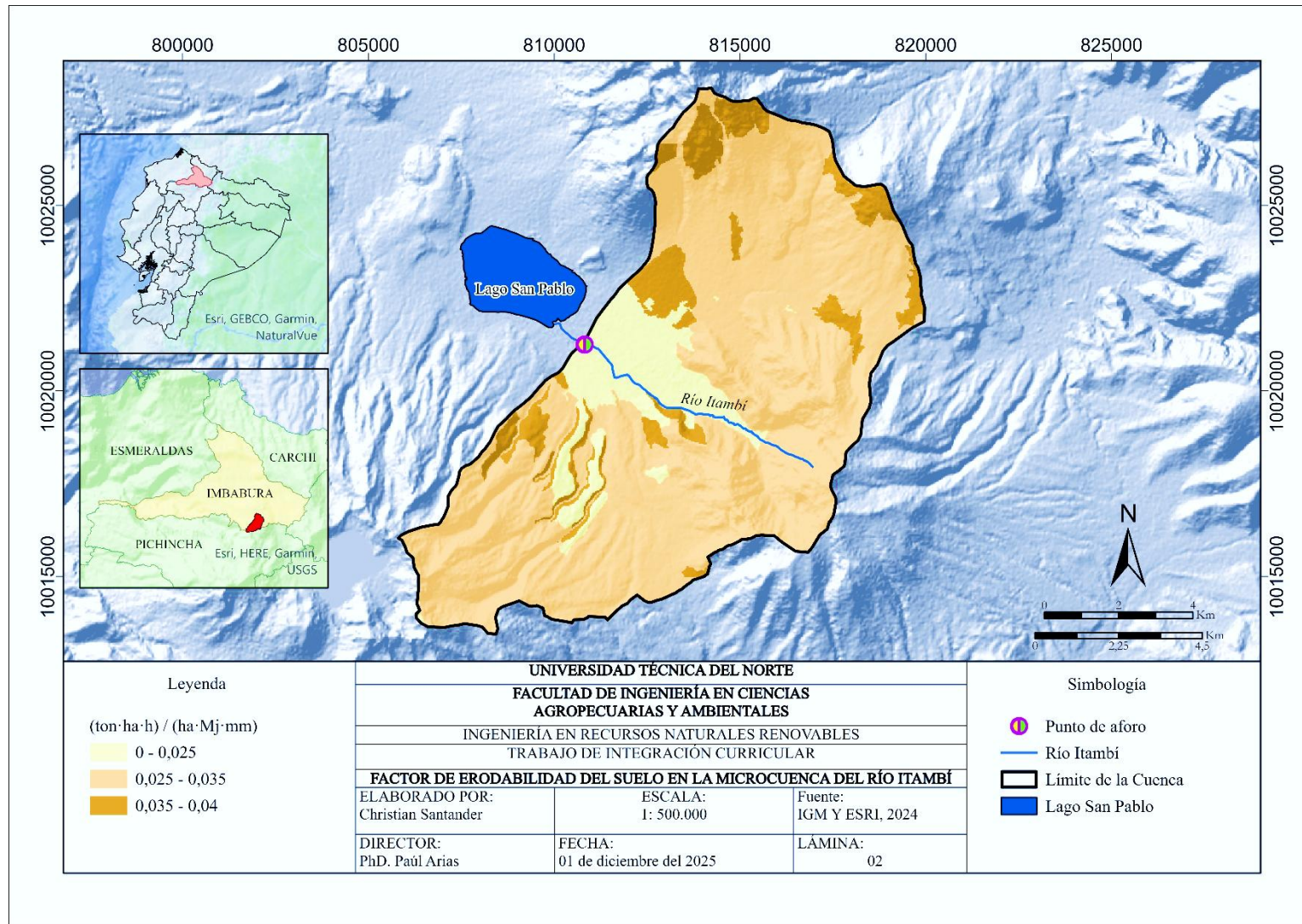
Anexo 2.

Distribución espacial del Factor R



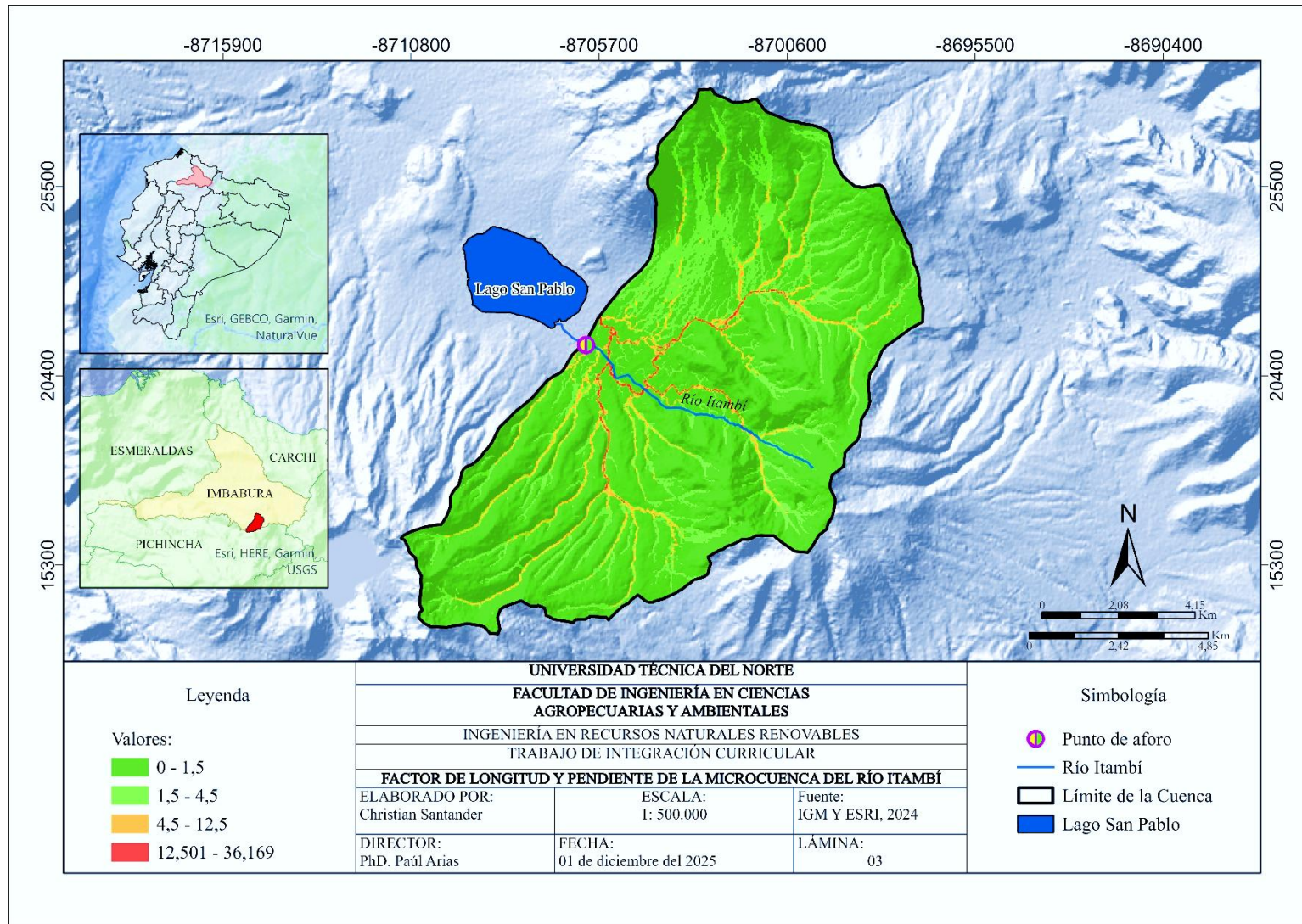
Anexo 3.

Distribución espacial del Factor K



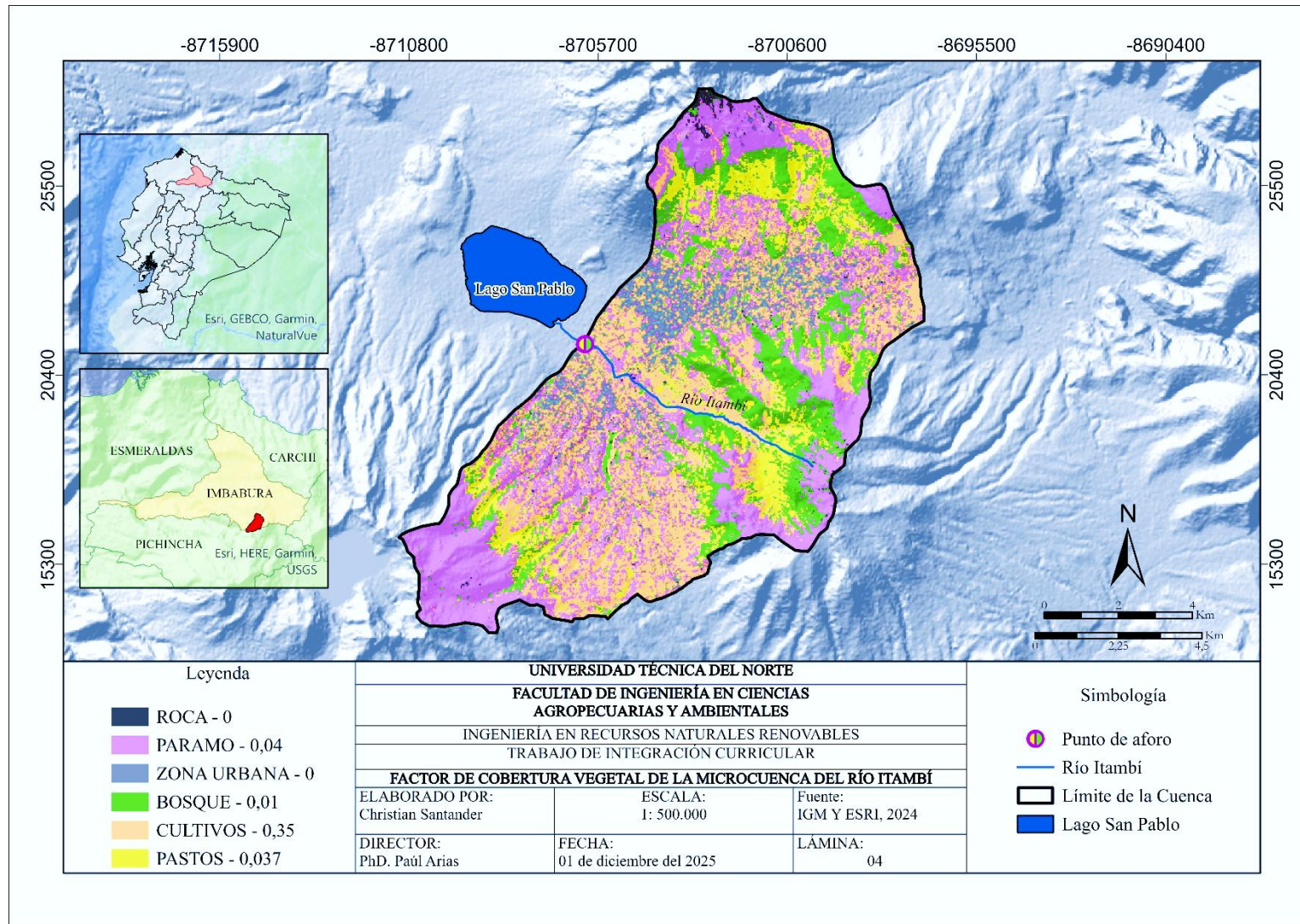
Anexo 4.

Distribución espacial del Factor LS



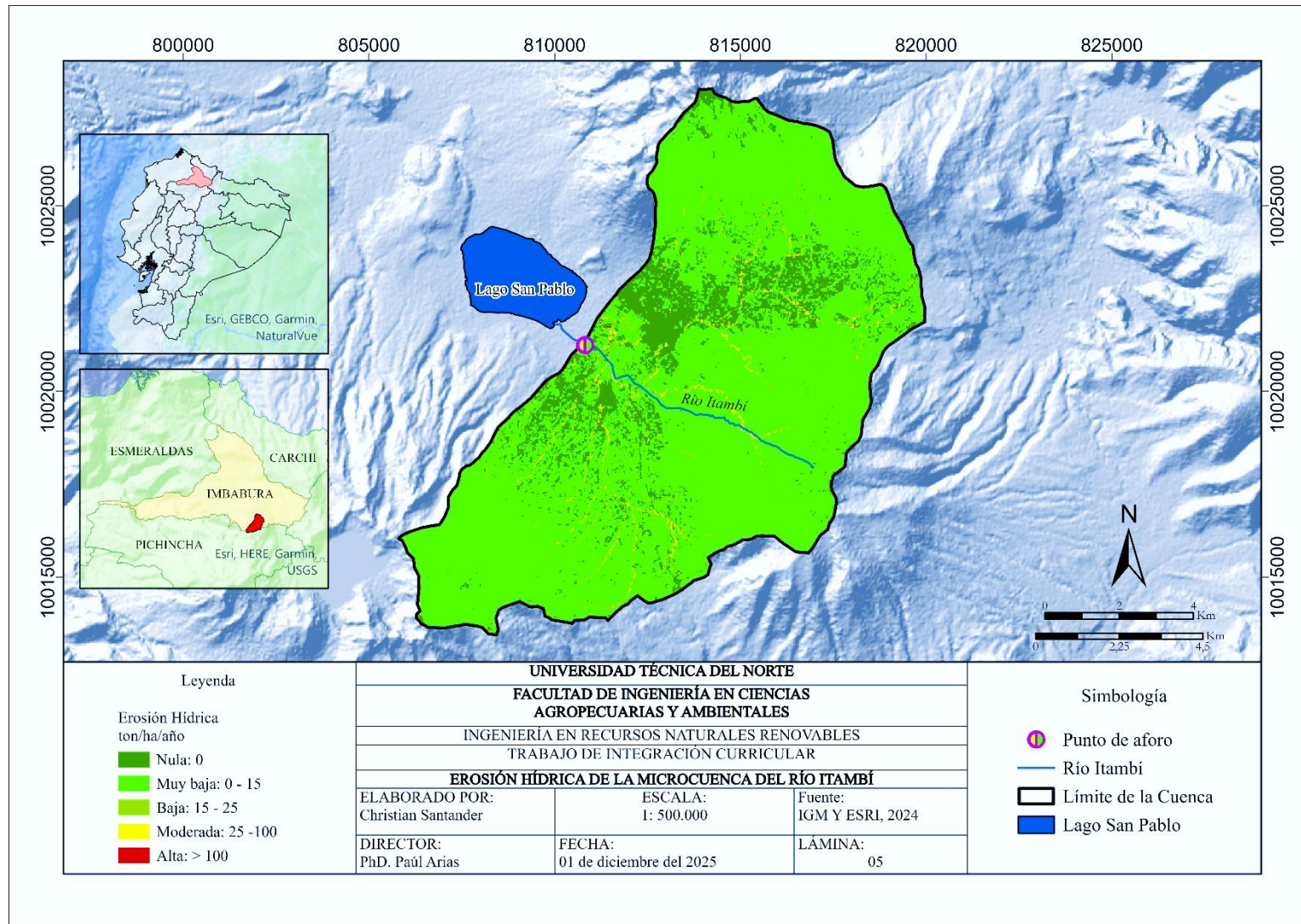
Anexo 5.

Distribución espacial del Factor C



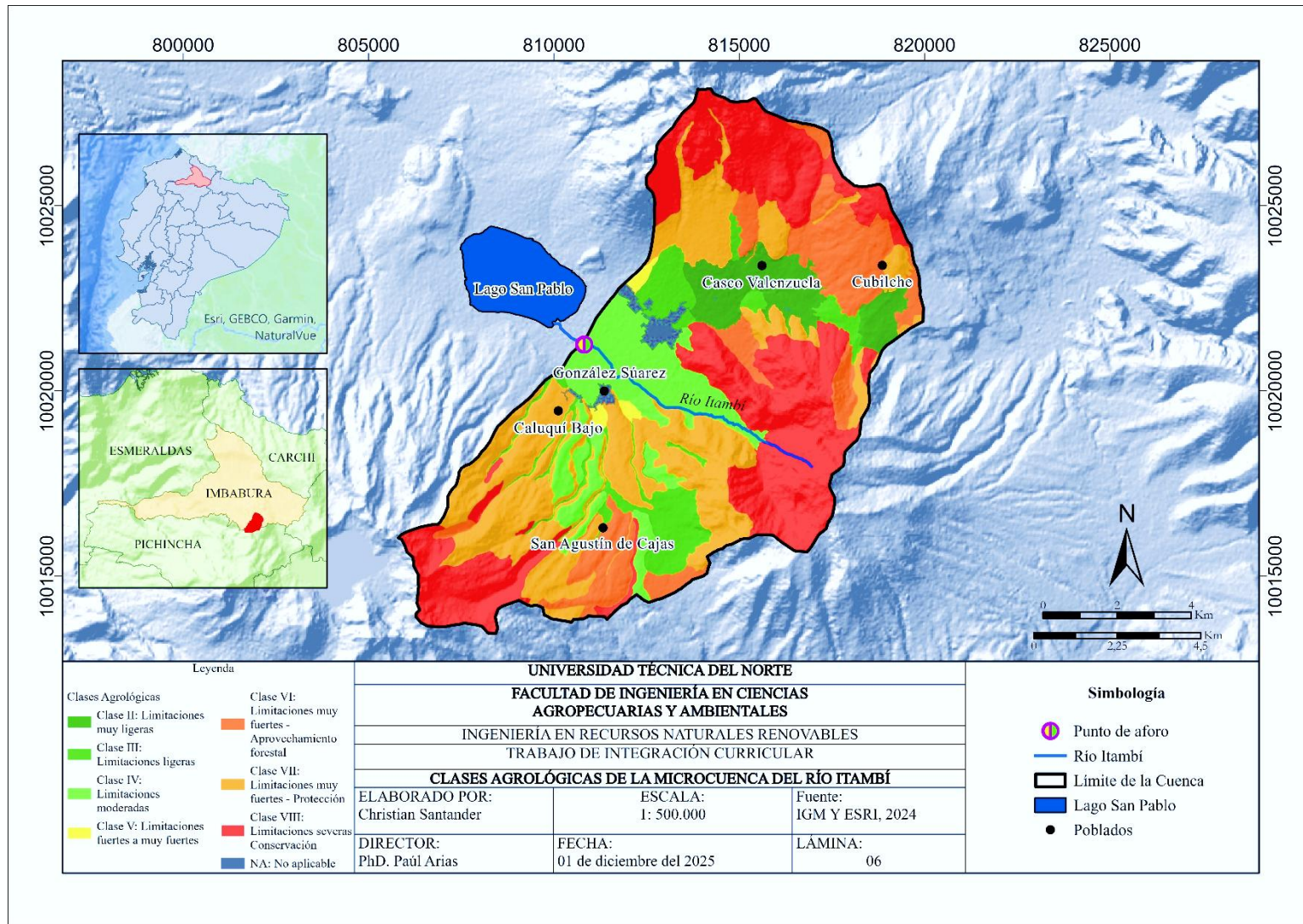
Anexo 6.

Distribución espacial de la erosión hídrica



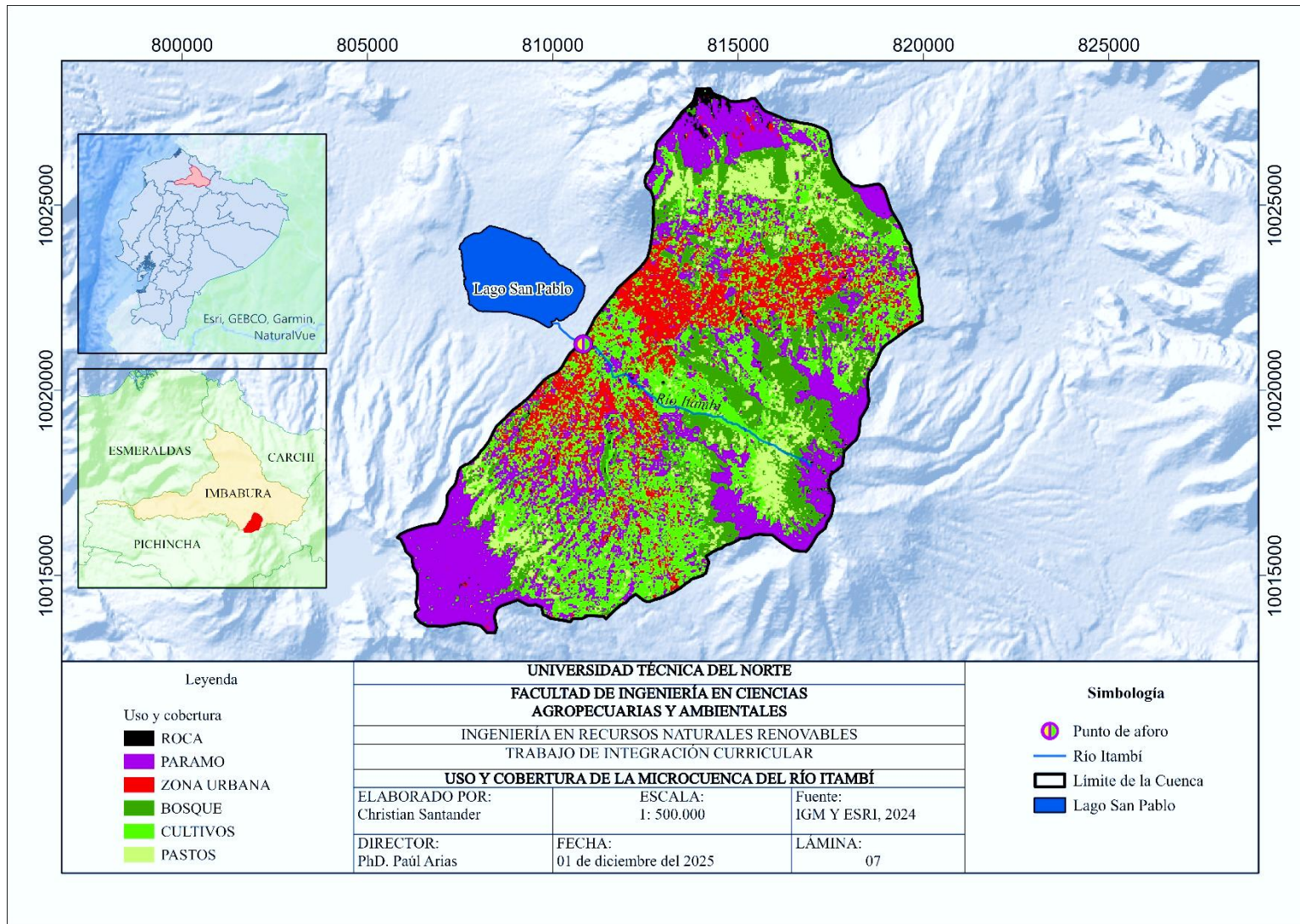
Anexo 7.

Distribución de las clases agrológicas en la microcuenca



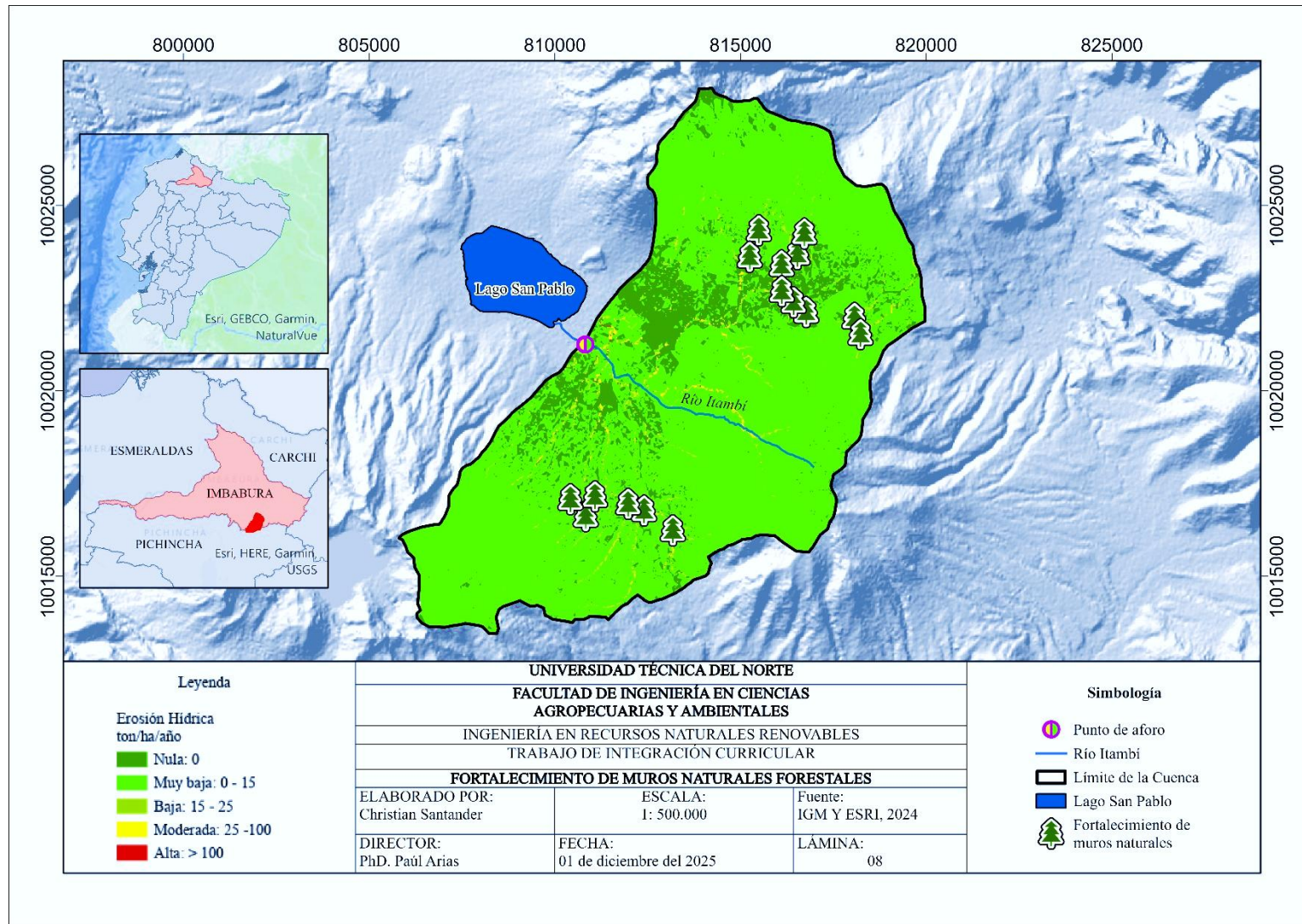
Anexo 8.

Uso y cobertura de la microcuenca



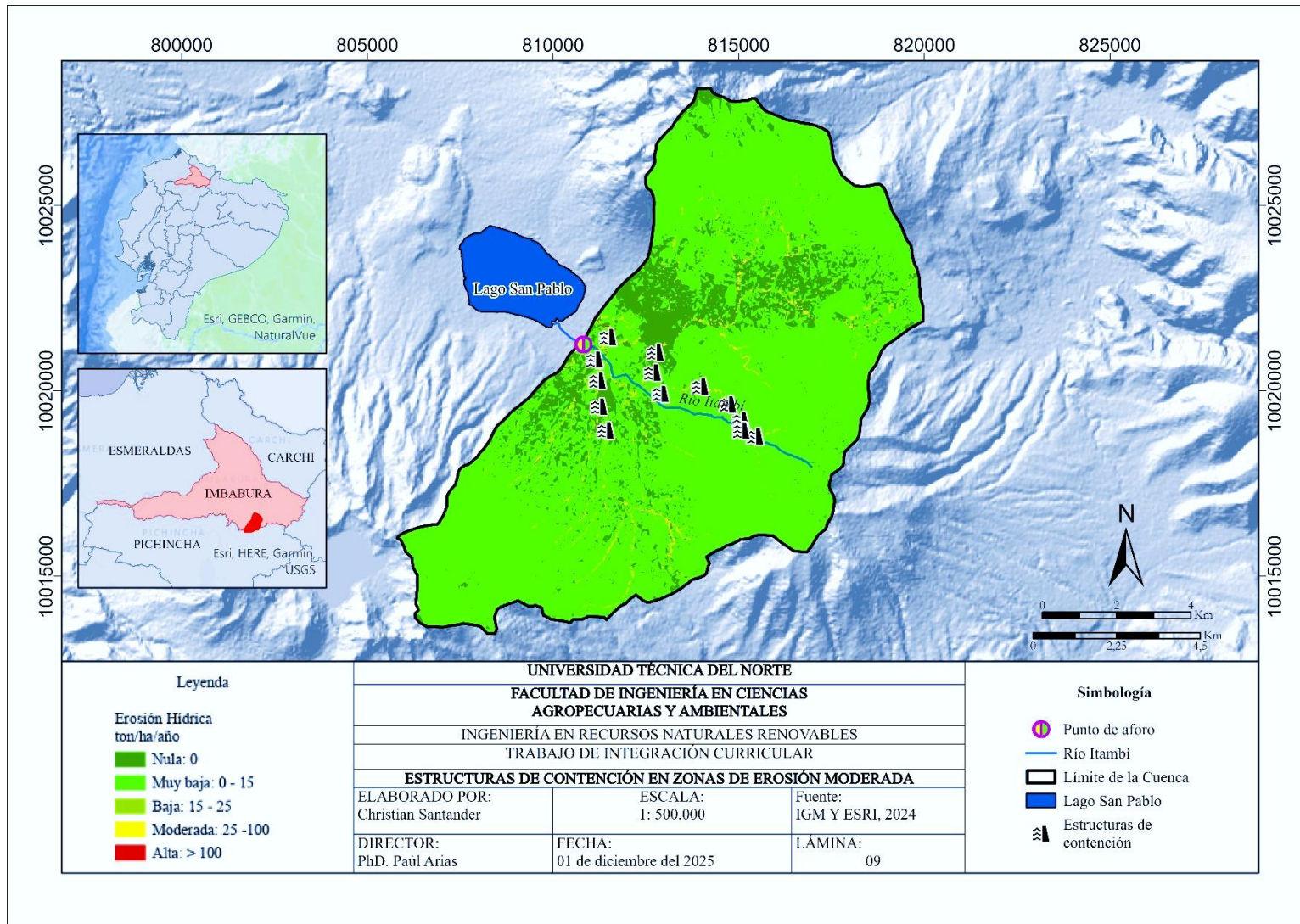
Anexo 9.

Fortalecimiento de Muros Naturales Forestales



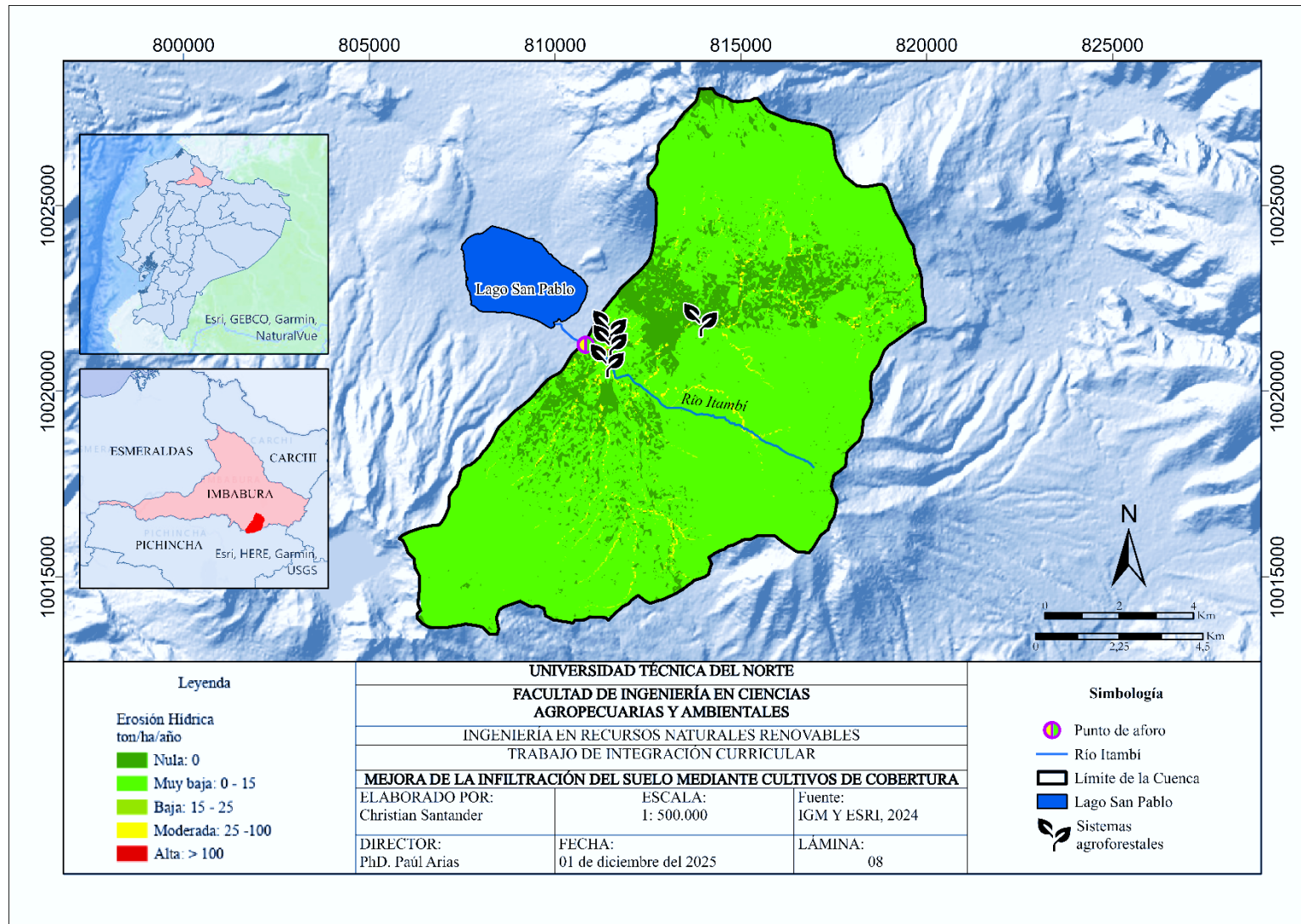
Anexo 10.

Estructuras de contención en zonas de erosión moderada



Anexo 11.

Mejora de la infiltración del suelo mediante cultivos de cobertura



Anexo 12.

Matriz de Confusión y Coeficiente Kappa

Confusion matrix online calculator

Draw confusion matrix for classes.

		Truth data							
		Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5	Class 6	Classification overall	User's accuracy (Precision)
Classifier results	Class 1	<input type="text" value="27"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="27"/>	<input type="text" value="100%"/>
	Class 2	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="27"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="27"/>	<input type="text" value="100%"/>
	Class 3	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="27"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="27"/>	<input type="text" value="100%"/>
	Class 4	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="27"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="27"/>	<input type="text" value="100%"/>
	Class 5	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="23"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="26"/>	<input type="text" value="88.462%"/>
	Class 6	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="26"/>	<input type="text" value="27"/>	<input type="text" value="96.296%"/>
	Truth overall	<input type="text" value="27"/>	<input type="text" value="29"/>	<input type="text" value="27"/>	<input type="text" value="29"/>	<input type="text" value="23"/>	<input type="text" value="26"/>	<input type="text" value="161"/>	
Producer's accuracy (Recall)	<input type="text" value="100%"/>	<input type="text" value="93.103%"/>	<input type="text" value="100%"/>	<input type="text" value="93.103%"/>	<input type="text" value="100%"/>	<input type="text" value="100%"/>			

Overall accuracy (OA):

Kappa¹:

2007 by Marco Vanetti

¹See: 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 13.

Fotografías de las salidas de campo para toma de muestras de agua en el río Itambí



Anexo 14.

Fotografías de salidas de campo para toma de muestras de suelo



Anexo 15.

Fotografías del análisis del agua en el laboratorio de Química de la UTN



Anexo 16.

Cálculo del RMSE para la validación del modelo RUSLE

Microcuenca	Densidad_Aparente	World_Soil	Y Observado	Y simulado	Yobs-Ysimu	(Ysimu-Yobs)^2
Itambí	1,52	1,34	1,52	1,34	0,18	0,0324
Itambí	1,46	1,23	1,46	1,23	0,23	0,0529
Itambí	1,2	1,26	1,2	1,26	-0,06	0,0036
Itambí	1,3	1,2	1,3	1,2	0,1	0,01
Itambí	1,43	1,21	1,43	1,21	0,22	0,0484
Itambí	1,12	1,22	1,12	1,22	-0,1	0,01
Itambí	1,1	1,23	1,1	1,23	-0,13	0,0169
Itambí	1,23	1,19	1,23	1,19	0,04	0,0016
Itambí	1,13	1,24	1,13	1,24	-0,11	0,0121
			11,49		0,37	0,1879
RMSE	0,144491445					

Anexo 17.

Resultados del análisis del agua, valores del SYrg y del SYsg

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)
1.53	10824.5	0.07966863	2.512.429.916	0.232	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.082526517	260.255.624	0.240	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.0736695	2.323.241.352	0.215	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.07886691	2.487.146.874	0.230	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.10211526	3.220.306.839	0.298	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.06919425	2.182.109.868	0.202	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.07083288	2.233.785.704	0.206	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.07988436	2.519.233.177	0.233	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.06941763	218.915.438	0.202	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.06679827	2.106.550.243	0.195	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.06496839	2.048.843.147	0.189	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.08703099	2.744.609.301	0.254	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.07962885	2.511.175.414	0.232	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.07080228	2.232.820.702	0.206	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.08256645	2.603.815.567	0.241	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.07847064	2.474.650.103	0.229	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.06916977	2.181.337.867	0.202	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.0667692	2.105.633.491	0.195	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.07884396	2.486.423.123	0.230	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.0720783	2.273.061.269	0.210	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.0869958	2.743.499.549	0.253	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.06493473	2.047.781.645	0.189	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.10207089	3.218.907.587	0.297	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.07469919	2.355.713.656	0.218	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.0722925	227.981.628	0.211	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.07935498	2.502.538.649	0.231	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.07970688	2.513.636.168	0.232	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.08705088	2.745.236.552	0.254	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.06952167	2.192.435.385	0.203	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.07378731	2.326.956.608	0.215	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.0826353	2.605.986.821	0.241	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.10213056	322.078.934	0.298	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.06720066	2.119.240.014	0.196	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.0650097	2.050.145.899	0.189	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.0785808	2.478.124.109	0.229	0.20	1.25	0.254
1.53	10824.5	0.07474968	2.357.305.908	0.218	0.20	1.25	0.254