INSTITUTO TECNOLOGICO AGROPECUARIO SAN ANDRES



“APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA USLE PARA LA EVALUAR LA EROSIÓN DEL SUELO EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO SOLA”

POSTULANTE: JAIME PAUL OJALVO LOPEZ

DOCENTE GUIA: ING. JUAN CARLOS VEGA VEGA

Trabajo de grado presentado a consideración del INSTITUTO TECNOLÓGICO AGROPECUARIO DE “SAN ANDRÉS” como requisito para optar el “Grado Académico de Técnico Superior en Gestión de Agua y Riego” (Con mención en sistema de riego y drenaje).

TARIJA – BOLIVIA

2023

DEDICATORIA:

A mí mismo,

Por mi constancia, dedicación y espíritu inquebrantable por este logro es el fruto de mi esfuerzo y determinación. Agradecerme a mí mismo por nunca rendirme y seguir adelante. Este trabajo está dedicado a mí persona, como símbolo de superación personal y perseverancia para seguir adelante.

Jaime Paul Ojalvo Lopez

PENSAMIENTO

"El camino hacia el éxito está lleno de obstáculos, pero son esas pruebas las que nos hacen más fuertes."

- **Maestro Roshi DB**

AGRADECIMIENTOS:

A mi padre y hermanos, quienes han sido el faro de mi vida y mi constante apoyo en este viaje.

A mis compañeros de vida, cuyos recuerdos y apoyo han llenado mi corazón de gratitud.

A todos aquellos que, con palabras de aliento y actos amables, me impulsaron a seguir avanzando, les agradezco de todo corazón.

Y un agradecimiento muy especial hasta el cielo para mi madre que a pesar de no tenerla presente físicamente a mi lado, pero sé que está ahí apoyándome en todo.

INSTITUTO TECNOGOLICO AGROPECUARIO
“SAN ANDRES”

RECTOR:

Lic. William Vaquera

ADMINISTRADORA:

Lic. Gladis Gomes Mamani

CARRERA:

GESTION DE AGUA Y RIEGO

DOCENTES:

PhD. M.Sc. Ing. Armando Schmidt Gómez

PhD. M.Sc. Ing. Carlos Vacaflores Rivero

M.Sc. Ing. Ariel Soto Choque

M.Sc. Ing. Eduardo Miranda Encinas

Ing. Juan Carlos Vega Vega

TRIBUNAL

Ing. Juan Carlos Vega Vega

DOCENTE GUIA

TRIBUNAL 1

TRIBUNAL 2

TRIBUNAL 3

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I: INTRODUCCION
1.1 Diagnóstico y Justificación....1
1.1.1 Diagnostico....1
1.1.1.1 Ubicación Del Proyecto....1
1.1.1.2 Relación Con El Entorno De Paisaje....1
1.1.1.3 Forma Y Topográfica....1
1.1.1.4 Hidrografía....1
1.1.1.5 Parámetros Morfométricos De La Cuenca....2
1.1.2 Justificación....3
1.1.2.1 Justificación Social....3
1.1.2.2 Justificación Científica....3
1.1.2.3 Justificación Económica....4
1.1.2.4 Justificación Personal....4
1.2 Planteamiento y Formulación del Problema Técnico/Tecnológico....5
1.2.1 Planteamiento del Problema....5
1.2.2 Formulación del Problema....6
1.3 Objetivos General y Especifico....6
1.3.1 Objetivo General....6
1.3.2 Objetivos Específicos....6
1.4 Enfoque Metodológico....6
1.4.1 Tipo de Estudio....6
1.4.1.1 Descriptivo....6
1.4.1.2 Explicativo....7
1.4.2 Tipo de Investigación....7
1.4.2.1 Descriptivo:....7

1.4.2.2 Explicativo: 7
1.4.3 Fuentes de Información 8
1.4.3.1 Fuente Primaria: 8
1.4.3.2 Fuente Secundaria 8
1.4.4 Métodos 9
1.4.4.1 Métodos teóricos: 9
1.4.4.2 Métodos empíricos: 10
1.4.5 Procedimientos 11
1.4.6 Medios 12
2.1 ¿Qué es la erosión del suelo? 13
2.2 Mecanismos Y Factores De La Erosión 13
2.3 La Erosión Hídrica 14
2.4 Los Cinco Factores Responsables De La Erosión Hídrica Del Suelo 15
2.4.1 Precipitación (R) 15
2.4.2 Erodabilidad del Suelo (K) 15
2.4.3 Longitud de la Pendiente (LS) 15
2.4.4 Cubierta y Prácticas de Conservación (C) 15
2.4.5 Erosión Prevista (P) 16
2.5 Efectos de la erosión e importancia de su estudio 16
2.6 Toma De Conciencia Ante La Erosión Hídrica Del Suelo 17
2.7 Modelos Matemáticos Para Estimar La Erosión 17
2.8 La Ecuación Universal De Pérdida De Suelo (USLE) 18
2.9 Factor Erosividad de la lluvia (R) 19
2.10 Factor Erodabilidad Del Suelo (K) 20
2.11 Factor Topográfico (LS) 21
2.12 Factor Cobertura De Suelo (C) 21

2.13 Factor Prácticas De Conservación Del Suelo (P) 22
2.14 El Papel De Los SIG En Los Estudios De Erosión. 23
3.1 Pruebas realizadas 25
3.1.1 Factor de R 25
3.1.1.1 Selección de Estaciones Meteorológicas aplicando Polígonos de Thiessen 25
3.1.1.2 Calculo de las precipitaciones medias mensuales 25
3.1.1.3 Aplicación de la fórmula Fournier para el cálculo de R en cada estación meteorológica 29
3.1.1.4 Cargado de los valores de R dentro de ArcGIS 30
3.1.1.5 Herramienta IDM Para Realizar La Interpolación De Los Valores R 31
3.1.1.6 Ráster De Factor R 31
3.1.2 Factor K 32
3.1.2.1 Mapa de Suelos de Bolivia 32
3.1.2.2 Recorte Del Mapa De Uso De Suelo Del Tamaño De La Cuenca 33
3.1.2.3 Herramienta Clip Para El Recorte De La Cuenca Sobre El Mapa De Uso De Suelos De Bolivia 34
3.1.2.4 Obtención del valor en el mapa de suelos 35
3.1.2.5 Cargado de los valores K en Arcgis 36
3.1.2.6 Herramienta Polygon To Raster 36
3.1.3 Factor LS 37
3.1.3.1 Herramienta Slope 37
3.1.3.2 Calculo del Factor F con la herramienta Ráster Calculator 38
3.1.3.3 Calculo del Factor M con la herramienta Raster Calculator 39
3.1.3.4 Herramienta Flow Accumulation 40
3.1.3.5 Calculo del Factor L con la herramienta Raster Calculator 41
3.1.3.6 Calculo del Factor S con la herramienta Raster Calculator 42

3.1.3.7 Calculo del Factor LS con la herramienta Raster Calculator 43
3.1.4 Factor C.....44
3.1.4.1 Cargado de las Bandas 4 y 5 dentro de ArcGIS 44
3.1.4.2 Herramienta Ráster Calculator Para La Combinación De Bandas ...45
3.1.4.3 Modificación De La Clasificación Del Raster De Combinado De Bandas 46
3.1.4.4 Herramienta Reclassify 47
3.1.4.5 Raster to Polygon.....48
3.1.4.6 Uso de la tabla para la clasificación de Uso de Suelo 49
3.1.4.7 Herramienta Feature to Raster.....50
3.1.5 Factor P 51
3.1.6 Calculo de la Erosión A 52
3.1.6.1 Herramienta Faster Calculator 52
3.1.7 Análisis de Resultados 54
4.1 Conclusiones 56
4.2 Recomendaciones 56
Bibliografía 58
Anexos .....

INDICE TABLAS

Tabla 1 Precipitaciones De La Estación "San Andres" 26
Tabla 2 Precipitaciones De La Estación "Pinos Sub" 27
Tabla 3 Precipitaciones De La Estación "Campanario" 28
Tabla 4 Precipitaciones Medias Mensuales 29
Tabla 5 Calculo Del Valor R En Las Estaciones Meteorológicas 29
Tabla 6 Calculo del factor K 35
Tabla 7 Tabla de rangos de perdida de suelos 53
Tabla 8 Categoría De La Erosión Y Porcentaje De Área 54

INDICE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Valores de R cargado dentro ArcGIS 30
Ilustración 2 Herramienta IDW 31
Ilustración 3 Ráster del Factor R 31
Ilustración 4 Mapa de uso de suelos de Bolivia 32
Ilustración 5 Cuenca delimitada sobre montada en el mapa de uso de suelos de Bolivia 33
Ilustración 6 Herramienta Clip para el recorte de la cuenca sobre el mapa de uso de suelos de Bolivia 34
Ilustración 7 Recorte De Uso De Suelo De Bolivia Del Tamaño De La Cuenca 34
Ilustración 8 Cargado de los valores de K obtenidos en ArcGIS 36
Ilustración 9 Herramienta Polygon To Raster Para La Conversión Del Shape A Ráster 36
Ilustración 10 Ráster Del Factor K 37
Ilustración 11 Herramienta Slope Para Generar El Shape De Pendientes Para El Factor LS 37
Ilustración 12 Ventana Del Raster Calculator Para Obtener El Factor F 38
Ilustración 13 Ráster del Factor F 39
Ilustración 14 Ventana Del Raster Calculator Para Obtener El Factor M 39
Ilustración 15 Ráster del Factor M 40
Ilustración 16 Ventana de la herramienta flow accumulation 40
Ilustración 17 Ráster del Flow Accumulation 41
Ilustración 18 Ventana Del Raster Calculator Para Obtener El Factor L 41
Ilustración 19 Raster Del Factor L 42
Ilustración 20 Ventana Del Raster Calculator Para Obtener El Factor S 42
Ilustración 21 Ráster Del Factor S 43
Ilustración 22 Ventana Del Raster Calculator Para Obtener El Factor S 43
Ilustración 23 Ráster Del Factor LS 44
Ilustración 24 Cargado de bandas 4 y 5 en ArcGIS 44
Ilustración 25 Ventana Del Ráster Calculator Para el Combinado de bandas 45
Ilustración 26 Ráster de la combinación de bandas 46

Ilustración 27 Ventana De Properties Para La Modificación de los de clasificación del ráster de combinado de bandas..... 46
Ilustración 28 Ráster De La Nueva Clasificación Del Combinado De Bandas 47
Ilustración 29 Ventana de la herramienta Reclassify 47
Ilustración 30 Ráster de combinado de bandas con la nueva reclasificación 48
Ilustración 31 Ventana de la herramienta Raster to Polygon 48
Ilustración 32 Shape creado con la herramienta Raster to polygon 49
Ilustración 33 Tabla de uso de suelo 49
Ilustración 34 Asignación De Los Valores Aplicando La Tabla De Uso De Suelo ... 50
Ilustración 35 Ventana de la herramienta Feature to Raster 50
Ilustración 36 Ráster del factor C..... 51
Ilustración 37 Ventana De Raster Calculator Para El Cálculo De La Erosión 53
Ilustración 38 Ráster De Erosión 54

INDICE GRAFICOS

Gráfico 1 Porcentaje de Erosión..... 55

INDICE ANEXOS

Mapa 1 Mapa de Ubicación i
Mapa 2 Mapa de las Comunidades ii
Mapa 3 Mapa Fisiográfico iii
Mapa 4 Mapa Topográfico iv
Mapa 5 Mapa Hidrográfico v
Mapa 6 Mapa de Pendientes vi
Mapa 7 Mapa Morfométrico vii
Mapa 8 Mapa De Polígonos De Thiessen viii
Mapa 9 Mapa De Factor R ix
Mapa 10 Mapa De Factor K x
Mapa 11 Mapa De Factor LS xi
Mapa 12 Mapa Factor C xii
Mapa 13 Mapa de Erosión xiii
Mapa 14 Mapa De La Erosión Y Las Comunidades xiv

RESUMEN

La pérdida de suelo debido a la erosión hídrica ha surgido como un desafío medioambiental crítico a nivel global, ocasionando una disminución significativa en la productividad y biodiversidad de los suelos en todo el mundo. Los suelos en el departamento de Tarija, específicamente a lo largo del río Sola, en la provincia Cercado, dentro del cantón Lazareto, presentan un escenario que refleja estos problemas de manera única debido a las características de su relieve, clima y tipos de suelo.

Este estudio busca redefinir el enfoque al analizar la erosión en la cuenca del río Sola. Para ello, se implementa la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Se explora tanto la erosión efectiva, con el propósito de comprender la evolución de este fenómeno.

La metodología consistió en la generación de capas ráster para cada factor influyente en la metodología USLE, con la posterior multiplicación de estas capas para formar mapas representativos de los niveles erosivos en cada uno de los escenarios. A través de este enfoque, se logra visualizar con precisión los posibles riesgos de erosión en la cuenca del río Sola, abarcando las comunidades de Calderillas, Calderillas Chica que están dentro de la cuenca, y las comunidades de San Pedro de Sola, San Andrés, Pantipampa y Bella Vista Ubicadas aledañas al punto de desfogue de la cuenca.

Además, este estudio profundiza en los patrones de uso del suelo en las áreas más vulnerables a la erosión. Los resultados destacan que, si bien la erosión efectiva en la región es considerable, la presencia de una cubierta vegetal saludable ha contribuido a reducir la erosión real en muchas áreas. Sin embargo, se identifican zonas específicas donde la erosión aún es relevante y podría tener un impacto perjudicial en la productividad del terreno.

Cabe mencionar que este estudio no solo proporciona una visión actualizada y enriquecida de la erosión en la cuenca del río Sola, sino que también aporta un componente crucial al medir y analizar cuantitativamente la cantidad anual de sedimentos generados por este sistema fluvial. La relevancia de esta investigación se enmarca no solo en la conservación del suelo y el agua, sino también en la gestión sostenible de los recursos naturales en una región caracterizada por su diversidad geográfica y ambiental.

INTRODUCCION

La interacción dinámica entre el medio ambiente y la actividad humana plantea desafíos fundamentales para la sostenibilidad de nuestros recursos naturales. En el corazón de esta interrelación, la cuenca del río Sola en el Departamento de Tarija, con su rica biodiversidad y su importancia para las comunidades locales, se convierte en el enfoque primordial de un proyecto de grado que aborda uno de los desafíos más apremiantes.

La erosión del suelo, como fenómeno global, presenta implicaciones significativas en la productividad agrícola, la calidad del agua y la sostenibilidad a largo plazo. En este contexto, la Metodología Universal de Pérdida de Suelo (USLE) brilla como una herramienta esencial para comprender y mitigar este proceso. Esta metodología, respaldada por su enfoque sistemático y preciso, se combina con las ventajas tecnológicas de ArcGIS, un Sistema de Información Geográfica líder, para investigar en profundidad los patrones de erosión en la cuenca del río Sola.

Este proyecto tiene como objetivo principal evaluar la erosión del suelo en la cuenca del río Sola, proporcionando un análisis detallado y cuantitativo. A través de la aplicación de la Metodología USLE en ArcGIS, se pretende identificar áreas críticas y estimar el nivel de erosión presente en diferentes zonas de la cuenca. Esta investigación se rige no solo como un esfuerzo por cuantificar un fenómeno crucial, sino también como un llamado a la acción en favor de la conservación del suelo y la gestión sostenible de los recursos naturales.

Con el telón de fondo de la cuenca del río Sola en el Departamento de Tarija, este proyecto de grado combina una metodología rigurosa, tecnología avanzada y una perspectiva ambiental para ofrecer un análisis profundo de la erosión del suelo. Los resultados de este estudio no solo enriquecerán nuestra comprensión de los desafíos ambientales en la región, sino que también brindarán una base para la toma de decisiones informadas en la búsqueda de un equilibrio sostenible entre las actividades humanas y el entorno natural.

CAPITULO I
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Diagnóstico y Justificación

1.1.1 Diagnostico

1.1.1.1 Ubicación Del Proyecto

El estudio se situará en la cuenca del Río Sola, específicamente en la provincia Cercado, dentro del cantón Lazareto en el Departamento de Tarija. Esta ubicación se encuentra aproximadamente a 21 kilómetros de la ciudad de Tarija en una dirección suroeste. Para acceder al área desde la ciudad, se requiere tomar la ruta en dirección a San Andrés y desviarse alrededor de 4 kilómetros (*Mapa 1 Mapa de Ubicación*), las comunidades que están dentro de la cuenca son Calderillas y Calderillas Chica, y además a la salida o punto de desfogue de la cuenca son San Pedro de Sola, San Andrés, Bella Vista y Panti Pampa *(Mapa 2 Mapa de las Comunidades*).

1.1.1.2 Relación Con El Entorno De Paisaje

La comunidad de San Pedro de Sola presenta una interesante variedad de paisajes que capturan la atención debido a su morfología única. Ubicada entre dos imponentes cerros, este entorno geográfico se caracteriza por la presencia de diversos caudales emergentes, lo que añade un dinamismo particular a su configuración. La morfología del terreno, con sus cerros que enmarcan el área y los cauces de agua que la atraviesan, contribuye a la singularidad visual y estructural de la comunidad de San Pedro de Sola. Esta morfología influye en la experiencia estética y en la interacción cotidiana con el entorno, resaltando la relación entre la geografía y la percepción de la belleza natural en esta región (*Mapa 3 Mapa Fisiográfico*).

1.1.1.3 Forma Y Topográfica

Desde una perspectiva topográfica, la zona exhibe una configuración de gran interés caracterizada por desniveles notablemente pronunciados y áreas planas adornadas con extensas praderas (*Mapa 4 Mapa Topográfico*). Esta topografía brinda oportunidades significativas para el desarrollo del turismo, incluyendo actividades como caminatas y excursiones. Además, las características topográficas posibilitan la concepción y establecimiento de un mirador estratégico, capitalizando las vistas panorámicas agradables que la región ostenta (*Mapa 6 Mapa de Pendientes*).

1.1.1.4 Hidrografía

El suministro de agua es una cuestión crucial para las comunidades aledañas y la ciudad de Tarija, y gran parte de este recurso vital proviene de las laderas orientales de la

majestuosa serranía de Sama. Estas elevaciones montañosas actúan como cunas de múltiples vertientes que fluyen como afluentes hacia ríos de gran importancia, incluyendo el Guadalquivir, Coimata, La Victoria, Tolomosa y Sola. La Cooperativa de Servicios de Agua y Alcantarillado Tarija (COSAALT), con la concesión de la cabecera de la cuenca del río La Victoria, revela que en el año 1990 se obtuvieron cerca de 100 litros por segundo de este río, lo que representa alrededor del 27 % del consumo medio de agua de la ciudad de Tarija (*Mapa 5 Mapa Hidrográfico*).

En otro ámbito, las aguas de la cuenca del Tolomosa tienen un doble propósito: además de destinarse al riego, también desempeñan un papel fundamental en el embalse San Jacinto, donde se genera energía eléctrica y se provee de agua potable a la ciudad. Asimismo, cuencas como Calderillas, Erquis y Coimata desempeñan una función vital al abastecer con agua a las comunidades situadas en el sector este de la Reserva.

A pesar de la ausencia de investigaciones específicas, no pasa desapercibida la preocupante contaminación del recurso hídrico. Esta problemática surge como consecuencia del uso excesivo de agroquímicos como la Urea, Ridomil y Tamaron, prácticas predominantes entre los agricultores de las comunidades de San Pedro de Sola, Bella Vista y Rincón de la Victoria, especialmente en la producción de papa. Los efectos perniciosos de esta práctica se extienden tanto a la calidad del suelo como a la de los ríos, ya que gradualmente se observa la infiltración de residuos de estos productos en los cursos de agua, generando un impacto negativo en la biodiversidad y el equilibrio ecológico. Es urgente abordar esta cuestión en pro de preservar la salud de los ecosistemas acuáticos y la sostenibilidad de la región en su conjunto.

1.1.1.5 Parámetros Morfométricos De La Cuenca

Las características de la cuenca del río Sola son fundamentales para comprender su comportamiento hidrológico y geomorfológico. Se extiende a lo largo de 150.55 km², con un perímetro de 76.95 km y una longitud de 21.11 km. El río principal abarca 29.21 km. La cuenca presenta variaciones significativas en elevación, con una máxima de 4653 metros sobre el nivel del mar (msnm) y una mínima de 2035 msnm, manteniendo una altura media de 3242.4 msnm.

En cuanto al río, su elevación máxima es de 3907 msnm y la mínima es de 2137 msnm, con una pendiente promedio de 0.065 metros por metro y una densidad de drenaje de

4.38 km/km². El índice de forma, que se sitúa en 0.34, sugiere una tendencia hacia una cuenca redondeada o ancha. Por otro lado, el coeficiente de compacidad (Gravelius) revela que la cuenca tiende a ser más alargada o elongada, con un valor de 1.77. La pendiente media de la cuenca es del 49.03% ().

Esta cuenca, con un orden de 5, es clasificada como una unidad de nivel medio dentro del sistema fluvial. Estos datos proveen un entendimiento detallado de la topografía, dimensión y forma de la cuenca del río Sola, aspectos cruciales para el análisis de su comportamiento hidrológico y geomorfológico (*Mapa 7 Mapa Morfométrico*).

1.1.2 Justificación

1.1.2.1 Justificación Social

La aplicación de la metodología USLE para calcular sedimentos en la cuenca del río Sola es esencial dada la relevancia de la gestión sostenible de los recursos hídricos y la preservación del entorno para el bienestar local y el equilibrio ecológico. El río Sola es un recurso vital para las comunidades locales, utilizado para consumo humano y actividades agrícolas. No obstante, la erosión del suelo y la acumulación de sedimentos representan una amenaza para la calidad del agua y los ecosistemas fluviales. La implementación de la metodología USLE tiene como objetivo comprender los patrones de erosión presentes en la cuenca, con miras a mejorar la gestión de los recursos hídricos y, consecuentemente, la calidad de vida de las personas que dependen de este recurso acuático. El cálculo de sedimentos proporciona una base fundamental para tomar decisiones informadas en cuanto a la conservación del suelo y la implementación de prácticas que reduzcan la erosión y sedimentación, contribuyendo a la mejora de la calidad del agua y la preservación de la biodiversidad en los ecosistemas acuáticos. Este proyecto también tiene como objetivo crear conciencia entre las comunidades sobre el impacto ambiental de sus actividades, fomentando prácticas agrícolas sostenibles y la conservación del entorno. En última instancia, busca promover la equidad, el bienestar y la sostenibilidad en la región, fortaleciendo a las comunidades locales frente a los desafíos ambientales y construyendo un futuro más prometedor para todos.

1.1.2.2 Justificación Científica

Este proyecto se enfoca en aplicar la metodología USLE para calcular los sedimentos en la cuenca del río Sola, abordando un desafío ambiental crucial con enfoques rigurosos respaldados por la ciencia y tecnología. La erosión del suelo y la sedimentación en

cuerpos de agua, problemáticas reconocidas globalmente, impactan los ecosistemas y la calidad del agua. En el área del río Sola, la acumulación de sedimentos influye en la disponibilidad de agua y la salud de los ecosistemas fluviales. La metodología USLE, basada en principios científicos y matemáticos, evalúa la erosión considerando factores como la lluvia, pendiente, tipo de suelo y uso de la tierra. La combinación de esta metodología con herramientas geoespaciales como Sistemas de Información Geográfica (SIG) proporciona análisis detallados de los patrones de erosión y sedimentación. Los resultados cuantitativos generados por este proyecto mejorarán la comprensión del sistema fluvial, beneficiando a autoridades, tomadores de decisiones y la comunidad científica interesada en la conservación y gestión de ecosistemas acuáticos. La implementación de la metodología USLE y las tecnologías geoespaciales permitirán obtener comprensión respaldada por la ciencia, lo que impulsará la toma de decisiones y la implementación de medidas de manejo para solucionar los problemas de erosión y sedimentación en la cuenca del río Sola.

1.1.2.3 Justificación Económica

El enfoque en la aplicación de la metodología USLE para calcular sedimentos en la cuenca del río Sola se basa en reconocer los beneficios económicos tangibles de la gestión eficiente de los recursos hídricos y la reducción de impactos negativos en el entorno fluvial. La acumulación de sedimentos en los ríos y cuerpos de agua puede tener un impacto económico en diversas áreas, afectando embalses, infraestructuras hidroeléctricas y generando costos de mantenimiento. La metodología USLE permite evaluar la producción de sedimentos, lo que proporciona información clave para aplicar prácticas de manejo del suelo y conservación, preservando la capacidad de almacenamiento de embalses y la calidad del agua. Además, la adopción de prácticas sostenibles mejora la productividad agrícola y la seguridad alimentaria, lo que podría generar ahorros económicos significativos al reducir costos de mantenimiento, mejorar la productividad agrícola y contribuir al desarrollo sostenible local y regional.

1.1.2.4 Justificación Personal

Este proyecto nace de mi preocupación por el impacto de nuestros recursos hídricos en nuestras vidas y el medio ambiente, especialmente en la vital cuenca del río Sola, crucial para suministrar agua a las comunidades. Utilizar la metodología USLE me permite no solo adquirir nuevas habilidades, sino marcar una diferencia en la calidad de vida de

estas comunidades. Al obtener datos sobre la producción de sedimentos en la cuenca, contribuyo a decisiones más informadas para la gestión de los recursos hídricos. Mi motivación personal radica en proteger los recursos hídricos y mejorar el bienestar de estas comunidades, demostrando compromiso con un futuro más sostenible.

1.2 Planteamiento y Formulación del Problema Técnico/Tecnológico

1.2.1 Planteamiento del Problema

Este proyecto explora la acumulación de sedimentos en la cuenca del río Sola, con un enfoque relevante para las comunidades que dependen de este recurso hídrico. La cuenca del río Sola es vital en el suministro de agua, esencial para diversos usos como el consumo y la agricultura. Sin embargo, se ha observado un aumento significativo en la sedimentación en esta área, afectando la calidad y disponibilidad del agua. La erosión del suelo y la acumulación de sedimentos pueden impactar negativamente en los ríos, la biodiversidad y el acceso al agua seguro. Esto afecta la agricultura, la salud pública y la sustentabilidad local.

En este contexto, la metodología USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo) se plantea como una herramienta fundamental. Permite calcular la erosión y la generación de sedimentos, proporcionando una comprensión cuantitativa del problema en la cuenca. La aplicación de esta metodología identificará áreas vulnerables y factores subyacentes.

Este proyecto es crucial al generar información precisa sobre la producción de sedimentos en la cuenca, esencial para decisiones en la gestión de recursos hídricos y prácticas de conservación. Colaborando con las comunidades locales, se promueve un enfoque participativo y colaborativo.

En resumen, el objetivo es examinar la acumulación de sedimentos en la cuenca del río Sola y su impacto en las comunidades. La metodología USLE se empleará para generar conocimiento esencial que oriente la toma de decisiones, garantizando el acceso sostenible al agua y la calidad de vida de las poblaciones dependientes.

1.2.2 Formulación del Problema

En la cuenca del río Sola, la erosión del suelo y la consiguiente acumulación de sedimentos están generando una preocupación creciente. Estos fenómenos ambientales están afectando la cantidad y calidad de los recursos hídricos, lo que tiene implicaciones directas para las comunidades locales y la sostenibilidad de todos los ecosistemas.

1.3 Objetivos General y Especifico

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la erosion en la cuenca del rio Sola, a través de la metodología USLE para proporcionar información util que permita tomar decisiones para mitigar los efectos negativos de la erosión.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar y mapear las áreas de mayor vulnerabilidad a la erosión del suelo en la cuenca.
- Estimar la tasa media de erosion producida en la cuenca del río Sola anualmente utilizando los datos obtenidos de la Metodología USLE.
- Identificar y diferenciar los niveles de erosión en zonas específicas cerca a las comunidades locales dentro de la cuenca del río Sola para comprender la variabilidad de la erosión.

1.4 Enfoque Metodológico

1.4.1 Tipo de Estudio

1.4.1.1 Descriptivo

Este estudio se llevará a cabo en un enfoque descriptivo, que se centrará en proporcionar una descripción exhaustiva de la cuenca del río Sola y su entorno. Esto incluirá la recopilación de diversos datos relevantes para el diseño y la implementación de medidas de control de erosión y sedimentación en la cuenca del río Sola. El objetivo principal de esta aproximación es obtener una comprensión integral de las características específicas de la cuenca, lo que sentará las bases para la planificación y ejecución efectiva de medidas de gestión de recursos hídricos y conservación del suelo en el futuro.

1.4.1.2 Explicativo

Se llevará a cabo un estudio de tipo explicativo con el objetivo de comprender en profundidad los factores que contribuyen significativamente a la producción de sedimentos en la cuenca del río Sola. Este análisis implicará la recopilación minuciosa de información relacionada con las características geográficas, el uso de la tierra, la calidad del suelo, la dinámica de erosión y sedimentación, y las prácticas de manejo del agua en la cuenca. El propósito principal de este estudio es identificar de manera precisa los factores que contribuyen a la producción de sedimentos y proponer soluciones viables para la implementación de medidas de conservación del suelo y manejo sostenible de los recursos hídricos. Estas soluciones tienen como objetivo reducir la erosión del suelo y la sedimentación en la cuenca del río Sola, promoviendo así una gestión más eficaz y sostenible de este recurso vital en la cuenca del río Sola.

1.4.2 Tipo de Investigación

1.4.2.1 Descriptivo:

El enfoque de estudio a emplear se clasifica como descriptivo, ya que se enfocará en caracterizar exhaustivamente la cuenca del río Sola. Esto se logrará a través de la recolección detallada de datos e información sobre las condiciones geográficas, el uso de la tierra, la calidad del suelo y las dinámicas de erosión y sedimentación en la cuenca. El objetivo principal de este enfoque es obtener una visión completa de las características de la cuenca, lo que permitirá diseñar e implementar eficazmente medidas de conservación del suelo y manejo de los recursos hídricos, con un énfasis en la reducción de la producción de sedimentos en la zona.

1.4.2.2 Explicativo:

El enfoque explicativo de investigación se orienta a identificar las causas subyacentes de un fenómeno específico. En este proyecto, el enfoque se centrará en explicar las causas relacionadas con la producción excesiva de sedimentos en la cuenca del río Sola y propondrá alternativas para mitigar este problema y optimizar la gestión de los recursos hídricos.

1.4.3 Fuentes de Información

1.4.3.1 Fuente Primaria:

Las fuentes de información primaria para este proyecto se obtendrán directamente del entorno y las comunidades involucradas en la cuenca del río Sola, así como de las mediciones y observaciones realizadas en el campo. Algunas de las fuentes clave de información primaria incluyen:

- **Entrevistas con Comunidades Locales:** Se llevarán a cabo entrevistas estructuradas con los residentes de las comunidades dentro de la cuenca del río Sola. Estas entrevistas proporcionarán información valiosa sobre el uso del suelo, las prácticas agrícolas, las fuentes de agua y las preocupaciones ambientales locales.
- **Observaciones en el Terreno:** Se realizarán observaciones directas en el área de estudio para evaluar las características físicas del terreno, identificar áreas propensas a la erosión y la sedimentación, y recopilar datos sobre la vegetación, la topografía y los cuerpos de agua.
- **Muestreo de Suelo**: Se llevarán a cabo muestreos de suelo en diversas ubicaciones de la cuenca para analizar la composición del suelo y su susceptibilidad a la erosión.
- **Mediciones Hidrológicas:** Se realizarán mediciones en los ríos y corrientes de la cuenca para cuantificar el flujo de agua y la concentración de sedimentos.
- **Datos Históricos y Registros Locales:** Se recopilarán registros históricos y datos locales sobre el uso del suelo, las prácticas agrícolas y la calidad del agua en la cuenca.
- **Colaboración con Expertos y Entidades Locales**: Se establecerá colaboración con organizaciones locales, expertos en conservación del suelo y gestión de recursos hídricos para acceder a datos y conocimientos adicionales.

1.4.3.2 Fuente Secundaria

Las fuentes de información secundaria desempeñarán un papel fundamental en la investigación de este proyecto, proporcionando un contexto más amplio y datos adicionales relacionados con la cuenca del río Sola y los procesos de erosión y sedimentación. Algunas de las fuentes de información secundaria clave incluyen:

- **Literatura Científica:** Se revisarán publicaciones científicas, investigaciones previas y estudios académicos relacionados con la erosión del suelo, la sedimentación, la gestión de recursos hídricos y la conservación del suelo en áreas geográficas similares. Esto permitirá aprovechar los conocimientos y las mejores prácticas establecidas en el campo.
- **Informes Gubernamentales**: Se consultarán informes emitidos por agencias gubernamentales a nivel local, regional y nacional que contengan datos sobre la calidad del agua, la gestión de cuencas, la agricultura y otros temas relevantes para la cuenca del río Sola.
- **Datos Hidrológicos y Climáticos:** Se accederá a datos hidrológicos y climáticos históricos y actuales proporcionados por instituciones meteorológicas y de recursos hídricos. Estos datos son fundamentales para comprender las condiciones ambientales en la cuenca.
- **Mapas Topográficos y de Uso del Suelo**: Se utilizarán mapas topográficos y de uso del suelo disponibles en línea o proporcionados por entidades geoespaciales para analizar la topografía de la zona y la distribución del uso del suelo.

Estas fuentes de información secundaria enriquecerán el conocimiento sobre la cuenca del río Sola y respaldarán el análisis de los factores que contribuyen a la erosión y la producción de sedimentos. Combinadas con las fuentes de información primaria, proporcionarán una base sólida para la toma de decisiones informadas y la implementación de estrategias efectivas de conservación del suelo y gestión de recursos hídricos.

1.4.4 Métodos

1.4.4.1 Métodos teóricos:

En el contexto de este proyecto, se emplearán métodos teóricos con el propósito de realizar un análisis exhaustivo de la problemática en cuestión y obtener una comprensión completa de la misma. Los métodos teóricos que se aplicarán incluyen:

1. **Revisión Bibliográfica:** Este método implica la revisión crítica y detallada de la literatura científica, investigaciones previas y estudios académicos relacionados con la erosión del suelo y la sedimentación en la cuenca del río Sola. La revisión bibliográfica

permitirá recopilar información actualizada y establecer un marco teórico sólido para el proyecto.

2. **Análisis Documental:** Se llevará a cabo un análisis minucioso de documentos relevantes, como informes gubernamentales, bases de datos hidrológicos y climáticos, mapas topográficos y regulaciones ambientales. Este enfoque proporcionará datos concretos y contextualizados para comprender la situación actual de la cuenca.

La combinación de estos métodos teóricos permitirá identificar las problemáticas clave relacionadas con la erosión del suelo y la producción de sedimentos en la cuenca del río Sola. Además, facilitará la construcción de una base de conocimiento sólida que respalde las investigaciones posteriores y la toma de decisiones informadas en la gestión de recursos hídricos y la conservación del suelo en la zona de estudio.

1.4.4.2 Métodos empíricos:

Para un proyecto centrado en la evaluación de la erosión del suelo y la producción de sedimentos en una cuenca, se pueden aplicar varios métodos empíricos para recopilar datos relevantes sobre el terreno y las prácticas agrícolas. Algunos de estos métodos empíricos incluyen:

- **Observación Directa:** Los investigadores pueden realizar visitas al sitio y observar directamente las condiciones del suelo, la topografía, la vegetación, el uso de la tierra y cualquier evidencia visible de erosión, como surcos o sedimentos acumulados.
- **Muestreo de Suelo:** La recopilación de muestras de suelo en diferentes ubicaciones de la cuenca permite analizar la calidad del suelo y la erosión. Los análisis de laboratorio pueden proporcionar datos sobre la erosión pasada y actual.
- **Mediciones de Sedimentos:** La instalación de dispositivos de medición de sedimentos en ríos y arroyos puede proporcionar datos sobre la cantidad de sedimentos transportados por el agua.
- **Fotografías Aéreas y Teledetección:** El uso de imágenes satelitales o fotografías aéreas históricas puede ayudar a identificar cambios en el uso del suelo y la vegetación a lo largo del tiempo, lo que puede estar relacionado con la erosión del suelo.

Estos métodos empíricos pueden complementarse con datos de la metodología USLE para obtener una comprensión completa de los procesos de erosión del suelo en la cuenca del río Sola. La combinación de enfoques cualitativos y cuantitativos puede ser beneficiosa para el proyecto.

1.4.5 Procedimientos

Paso 1: Recopilación de Datos

1. **Define el área de estudio:** Comienza por definir claramente la extensión geográfica de la cuenca del río Sola que se analizará. Esto implica trazar sus límites exactos en un mapa y determinar las características clave de esta área.
2. **Recopila datos topográficos:** Para entender mejor la topografía de la cuenca, obtén información detallada sobre las elevaciones, pendientes y aspectos de la tierra. Esto podría requerir el uso de mapas topográficos, sistemas de información geográfica (SIG) o incluso tecnologías de teledetección.
3. **Obtiene datos climáticos:** Reúne datos climáticos históricos relevantes para la cuenca. Esto incluye información sobre la precipitación, la temperatura, la humedad y otros factores climáticos que pueden afectar la erosión del suelo.
4. **Documenta el uso de suelo:** Realiza un inventario de los diferentes usos de la tierra en la cuenca. Esto implica identificar áreas agrícolas, zonas urbanas, bosques, pastizales y cualquier otro uso relevante. Puedes utilizar imágenes satelitales y datos geoespaciales para esta tarea.

Paso 2: Cálculo de Factores de USLE

1. **Calcula el factor de erosividad de la lluvia (R):** Utiliza ecuaciones o datos climáticos históricos para calcular la erosividad de la lluvia en la cuenca. Esto implica evaluar cuán intensas y frecuentes son las precipitaciones en la zona.
2. **Determina el factor de erodabilidad del suelo (K):** Realiza análisis de laboratorio de muestras de suelo recolectadas en la cuenca. Esto ayudará a entender cuán susceptibles son los suelos locales a la erosión.
3. **Calcula el factor de pendiente (S):** Utilizando los datos topográficos recopilados, calcula la pendiente de las áreas relevantes de la cuenca. Esto es esencial para comprender cómo la topografía influye en la erosión.

4. **Estima el factor de longitud de ladera (L):** Basándote en la topografía, evalúa cuán largas o cortas son las laderas en la cuenca. Esto tiene un impacto en la velocidad de erosión.
5. **Evalúa el factor de prácticas de conservación (C):** Realiza investigaciones y encuestas para comprender las prácticas agrícolas locales y cómo afectan la erosión. Esto ayudará a determinar el factor C en la fórmula USLE.

Paso 3: Estimación de la Tasa de Pérdida de Suelo (A)

Utiliza la fórmula USLE: Aplica la fórmula USLE (A = R * K * LS * C * P) utilizando los valores calculados en los pasos anteriores. Esto te permitirá estimar la tasa de pérdida de suelo en diferentes áreas de la cuenca del río Sola.

1.4.6 Medios

- Computadora
- Material de Escritorio
- Planilla de registro de datos
- Gps de mano
- Software (Arcgis, Excel, Word, entre otros)

CAPITULO II
MARCO TEORICO

2.1 ¿Qué es la erosión del suelo?

La erosión del suelo es un proceso natural y continuo que involucra la remoción y transporte de partículas de suelo de un lugar a otro debido a la acción de factores como el agua, el viento, la gravedad y la actividad humana (García-Ruiz, 2015). Este fenómeno es una parte esencial de la dinámica terrestre y ha estado ocurriendo a lo largo de la historia de la Tierra, contribuyendo a la formación y evolución de paisajes.

Uno de los tipos más comunes de erosión del suelo es la erosión hídrica, que resulta de la acción del agua, ya sea en forma de lluvia, escorrentía o inundaciones, que desplaza las partículas de suelo de sus ubicaciones originales (Gómez, 2012). Este proceso es particularmente evidente en áreas con pendientes pronunciadas o en terrenos donde la cobertura vegetal protectora ha sido eliminada. Las partículas de suelo transportadas por el agua pueden terminar depositándose en ríos y cuerpos de agua, lo que puede tener un impacto negativo en la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos.

Por otro lado, la erosión eólica es otro tipo significativo de erosión del suelo. Este proceso se produce cuando el viento levanta y transporta partículas de suelo a largas distancias, especialmente en áreas áridas o semiáridas donde la vegetación es escasa (García-Ruiz, 2015). La erosión eólica no solo reduce la fertilidad del suelo, sino que también puede dar lugar a la formación de dunas de arena y la degradación de paisajes naturales.

La erosión del suelo es un fenómeno natural que puede agravarse por actividades humanas como la agricultura intensiva, la deforestación y la urbanización (Gómez, 2012). Estas actividades pueden acelerar significativamente el proceso de erosión y dar lugar a la pérdida excesiva de suelo, lo que tiene graves consecuencias, como la degradación del suelo, la disminución de la productividad agrícola y la degradación de los ecosistemas naturales.

2.2 Mecanismos Y Factores De La Erosión

La erosión del suelo es un proceso complejo que involucra una serie de mecanismos y factores que pueden variar según las condiciones geográficas y climáticas de una región específica (García-Ruiz, 2015). Los mecanismos de erosión son las fuerzas físicas o agentes que actúan para desplazar las partículas de suelo. Los factores, por otro lado, son las condiciones o variables que influyen en la erosión y determinan su intensidad.

Uno de los mecanismos de erosión más comunes es la erosión hídrica, que ocurre debido a la acción del agua, ya sea en forma de lluvia, escorrentía superficial o inundaciones (Gómez, 2012). El agua puede desplazar las partículas de suelo a medida que fluye sobre la superficie terrestre, llevándolas consigo y depositándolas en otras ubicaciones. La velocidad y la cantidad de agua, así como la pendiente del terreno, son factores clave que influyen en la erosión hídrica.

Otro mecanismo relevante es la erosión eólica, que resulta de la acción del viento al levantar y transportar partículas de suelo a largas distancias (García-Ruiz, 2015). Este proceso es especialmente evidente en regiones áridas o semiáridas, donde la vegetación protectora es escasa. La velocidad del viento, la textura del suelo y la cobertura vegetal son factores determinantes en la erosión eólica.

Los factores que influyen en la erosión del suelo incluyen la topografía, el tipo de suelo, la cobertura vegetal, el clima y las prácticas humanas (Gómez, 2012). Por ejemplo, las pendientes pronunciadas son propensas a una mayor erosión hídrica, mientras que los suelos con baja erodabilidad son menos susceptibles. La presencia de vegetación, como árboles y cultivos, puede proteger el suelo al reducir la velocidad del viento y la escorrentía. Además, las prácticas agrícolas inadecuadas, como la labranza excesiva o la deforestación, pueden acelerar la erosión.

2.3 La Erosión Hídrica

La erosión hídrica es un fenómeno natural y geomorfológico ampliamente estudiado debido a su relevancia en la pérdida de suelo y los impactos ambientales asociados (Giménez, 2017). Este proceso se refiere al desplazamiento y transporte de partículas de suelo causado por la acción de la lluvia, la escorrentía superficial y los cursos de agua. La erosión hídrica es particularmente prominente en regiones con altas precipitaciones y terrenos inclinados, donde el agua fluye con mayor velocidad y puede arrastrar partículas de suelo.

Uno de los mecanismos clave en la erosión hídrica es la erosión laminar, que ocurre cuando una fina capa de agua fluye sobre la superficie del suelo, desprendiendo y transportando partículas (Poesen, 2018). Este proceso es común durante lluvias suaves y se caracteriza por la separación de partículas individuales del suelo, que luego se suspenden en el agua y son transportadas por la escorrentía superficial.

La erosión hídrica también puede manifestarse como erosión en surcos, donde el agua fluye en canales pequeños y estrechos, formando surcos en la superficie del suelo (Bertoni, 2012). Estos surcos pueden agrandarse con el tiempo y dar lugar a una erosión más severa. La velocidad del agua y la capacidad de arrastre de sedimentos dependen de varios factores, incluyendo la pendiente del terreno, la textura del suelo y la cobertura vegetal circundante.

2.4 Los Cinco Factores Responsables De La Erosión Hídrica Del Suelo

La erosión hídrica del suelo es un proceso complejo que involucra varios factores interrelacionados que contribuyen a la pérdida de suelo y la degradación del paisaje. Entre estos factores, se destacan cinco como los principales responsables de la erosión hídrica:

2.4.1 Precipitación (R)

La cantidad y la intensidad de la lluvia desempeñan un papel crucial en la erosión hídrica. Las lluvias intensas pueden generar escorrentía superficial, aumentando el riesgo de erosión. Los eventos de precipitación son evaluados en términos de su erosividad, considerando la cantidad de lluvia y su energía cinética (Giménez, 2017)

2.4.2 Erodabilidad del Suelo (K)

La textura y la composición del suelo son fundamentales para determinar su erodabilidad. Los suelos con mayor contenido de arcilla y limo son menos propensos a la erosión que los suelos arenosos. Además, la presencia de cobertura vegetal puede influir en la capacidad del suelo para resistir la erosión (Bertoni, 2012)

2.4.3 Longitud de la Pendiente (LS)

La topografía del terreno, especialmente la pendiente, juega un papel importante en la erosión. Cuanto más larga y pronunciada sea la pendiente, mayor será la velocidad del agua y, por lo tanto, la erosión potencial. La longitud de la pendiente se considera un factor clave en el modelo USLE (Poesen, 2018).

2.4.4 Cubierta y Prácticas de Conservación (C)

La presencia de vegetación, como cultivos o bosques, puede actuar como un escudo protector contra la erosión hídrica. Además, las prácticas de conservación del suelo, como terrazas o barreras vegetativas, pueden reducir significativamente la erosión al disminuir la velocidad de la escorrentía y atrapar sedimentos (Giménez, 2017).

2.4.5 Erosión Prevista (P)

Este factor tiene en cuenta la erosión que ya ha ocurrido en un área en particular y se basa en datos históricos. Se utiliza para evaluar la erosión potencial en función de eventos anteriores de erosión hídrica (Bertoni, 2012)

Estos cinco factores interactúan de manera compleja y su comprensión es esencial para abordar y prevenir la erosión hídrica del suelo, especialmente en áreas vulnerables.

2.5 Efectos de la erosión e importancia de su estudio

La erosión del suelo es un proceso natural que, cuando se acelera debido a actividades humanas o cambios climáticos, puede tener impactos significativos en el medio ambiente y la sociedad. Por lo tanto, es fundamental comprender los efectos de la erosión y la importancia de su estudio para abordar estos problemas.

Uno de los efectos más evidentes de la erosión del suelo es la pérdida de tierra fértil. Cuando las capas superiores del suelo, ricas en nutrientes, se erosionan, la calidad del suelo disminuye, lo que puede resultar en una disminución de la productividad agrícola. Esta pérdida de suelo agrícola puede tener un impacto directo en la seguridad alimentaria de las poblaciones locales (Giménez, 2017).

Además de la pérdida de suelo, la erosión también puede dar lugar a la sedimentación en ríos, arroyos y cuerpos de agua. Este sedimento transportado por el agua puede afectar negativamente la calidad del agua al aumentar la turbidez y transportar contaminantes químicos y biológicos. Esto tiene implicaciones directas en la disponibilidad de agua potable y en los ecosistemas acuáticos (Bertoni, 2012).

La erosión del suelo también puede llevar a la degradación del paisaje y la pérdida de la biodiversidad. Cuando las capas superficiales del suelo desaparecen, las plantas y los organismos que dependen de ellas también pueden sufrir. Esto puede resultar en la pérdida de hábitats naturales y la disminución de la diversidad biológica en un área (Poesen, 2018).

En resumen, el estudio de los efectos de la erosión del suelo es esencial para comprender cómo este proceso puede afectar la productividad agrícola, la calidad del agua y la biodiversidad. Con esta comprensión, se pueden desarrollar estrategias de

manejo y conservación adecuadas para mitigar los impactos negativos de la erosión y promover un uso sostenible del suelo.

2.6 Toma De Conciencia Ante La Erosión Hídrica Del Suelo

La erosión hídrica del suelo es un proceso silencioso pero devastador que afecta a muchas regiones del mundo. Para abordar este problema, es crucial que las comunidades y las autoridades tomen conciencia de su gravedad y adopten medidas para su prevención y control. La toma de conciencia ante la erosión hídrica del suelo implica reconocer los efectos perjudiciales que puede tener en el ambiente y en la vida de las personas (Giménez, 2017)

Uno de los aspectos fundamentales para la toma de conciencia es comprender que la erosión del suelo no es un fenómeno inevitable, sino que está estrechamente relacionado con las prácticas humanas y la gestión inadecuada de la tierra. Las actividades agrícolas, la deforestación y la urbanización sin planificación pueden acelerar la erosión del suelo. Por lo tanto, es esencial promover prácticas de manejo sostenible del suelo y la adopción de tecnologías que reduzcan la pérdida de suelo (Montgomery, 2007).

La educación y la difusión de información desempeñan un papel clave en la toma de conciencia. Las comunidades, los agricultores y los responsables de la toma de decisiones deben comprender los factores que contribuyen a la erosión hídrica y estar informados sobre las estrategias y técnicas que pueden aplicarse para prevenir o reducir su impacto. La colaboración entre científicos, gobiernos locales y organizaciones no gubernamentales puede desempeñar un papel importante en la difusión del conocimiento (Cerdà, 2005).

En conclusión, la toma de conciencia ante la erosión hídrica del suelo es un paso fundamental para abordar este problema de manera efectiva. Reconocer que la erosión del suelo es evitable y que existen soluciones es el primer paso para promover un uso sostenible de la tierra y proteger nuestros recursos naturales.

2.7 Modelos Matemáticos Para Estimar La Erosión

Los modelos matemáticos desempeñan un papel esencial en la estimación de la erosión del suelo, ya que permiten cuantificar este proceso de manera precisa y predecir su evolución en diferentes condiciones. Uno de los modelos más ampliamente utilizados

para este fin es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés). Este modelo, desarrollado por Wischmeier y Smith en la década de 1960, ha sido aplicado en todo el mundo y ha evolucionado con el tiempo para adaptarse a diversas situaciones (Renard, 1997).

El modelo USLE considera varios factores que influyen en la erosión del suelo, como la erosividad de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la longitud y pendiente de la ladera, y las prácticas de conservación. Estos factores se combinan en una fórmula matemática que permite estimar la tasa de pérdida de suelo en una ubicación específica. La USLE ha sido ampliamente utilizada en la planificación de la conservación del suelo y la gestión de cuencas hidrográficas (Morgan, 1995).

Otro modelo matemático relevante es el Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), que es una versión mejorada de la USLE. El RUSLE incorpora factores adicionales, como el efecto de la cobertura vegetal y la erosión en surcos, lo que lo hace aún más preciso para la estimación de la erosión del suelo (Renard, 1997)

La modelización matemática no solo es útil para comprender el proceso de erosión, sino que también puede ser una herramienta efectiva para la toma de decisiones en la gestión de recursos naturales y la planificación de prácticas de conservación. Estos modelos permiten evaluar escenarios hipotéticos y determinar el impacto de las medidas de conservación del suelo en la reducción de la erosión, lo que es esencial para la protección a largo plazo de nuestros suelos fértiles (Montgomery, 2007)

2.8 La Ecuación Universal De Pérdida De Suelo (USLE)

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) es una herramienta fundamental en la investigación y gestión de la erosión del suelo. Esta ecuación, desarrollada por Wischmeier y Smith en la década de 1960, se ha convertido en un estándar internacional para estimar la erosión hídrica del suelo en diversas condiciones y ubicaciones (Renard, 1997)

La USLE es una ecuación matemática que tiene en cuenta varios factores clave que influyen en la erosión del suelo. Estos factores incluyen la erosividad de la lluvia (R), que representa la capacidad de la lluvia para causar erosión; la erodabilidad del suelo (K), que refleja la susceptibilidad del suelo a la erosión; la longitud de la ladera (L) y la pendiente de la misma (S), que describen las características topográficas del terreno; y

el factor de prácticas de conservación (C), que tiene en cuenta las medidas implementadas para reducir la erosión (Renard, 1997)

El modelo USLE se utiliza para estimar la tasa de pérdida de suelo en una ubicación específica al combinar estos factores en una fórmula. Esta ecuación ha demostrado ser valiosa en la planificación de la conservación del suelo, la gestión de cuencas hidrográficas y la toma de decisiones relacionadas con la erosión del suelo (Morgan, 1995).

El modelo USLE y sus variantes, como el Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), han sido ampliamente aplicados en todo el mundo y han contribuido significativamente a la comprensión y mitigación de la erosión del suelo, desempeñando un papel crucial en la protección de los recursos naturales y la sostenibilidad de la agricultura (Renard, 1997).

$$A = R * K * L * S * C * P$$

- A: pérdida anual de suelo (t/ha*año).
- R = Erosividad de la lluvia (hJ*cm/m2*h*año).
- K = Erodabilidad del suelo (ton*h*m2/ha* hJ*cm).
- LS = longitud de la pendiente en metros y gradiente (adimensional).
- C = Factor cobertura (adimensional).
- P = Prácticas de conservación del suelo (adimensional).

2.9 Factor Erosividad de la lluvia (R)

El factor de erosividad de la lluvia (R) es un componente fundamental en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y sus variantes, como la Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Este factor se refiere a la capacidad de la lluvia para causar erosión del suelo y se mide en términos de la energía cinética que transporta la lluvia mientras golpea la superficie del suelo (Arnaez, 2015)

El cálculo del factor R implica la consideración de varios aspectos, como la intensidad, la duración y la frecuencia de las tormentas de lluvia en una ubicación específica. Cuanto mayor sea la energía cinética de la lluvia, mayor será el valor de R y, por lo tanto, mayor será el potencial de erosión del suelo en esa área (Aznar, 2007)

Este factor es esencial para comprender y predecir la erosión del suelo, ya que la erosividad de la lluvia varía significativamente de una región a otra y puede influir en la implementación de medidas de conservación del suelo. La recopilación de datos climáticos históricos es fundamental para determinar el factor R y utilizarlo en la estimación de la erosión del suelo (Gómez, 2012)

El factor de erosividad de la lluvia R se utiliza en combinación con otros factores de la USLE o la RUSLE para proporcionar una evaluación integral de la erosión del suelo en una determinada área, lo que permite tomar decisiones informadas sobre la gestión de cuencas hidrográficas y la conservación del suelo (Aznar, 2007)

2.10 Factor Erodabilidad Del Suelo (K)

El factor de erodabilidad del suelo (K) es otro componente clave en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y en su versión revisada, la Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Este factor se refiere a la susceptibilidad intrínseca del suelo a la erosión y depende de sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Álvarez-Soto, 2008).

Las características del suelo que influyen en el factor K incluyen su textura, contenido de materia orgánica, estructura, capacidad de retención de agua y capacidad de infiltración. Los suelos con una alta erodabilidad, es decir, aquellos que tienen una mayor susceptibilidad a la erosión, generalmente tienen una textura fina, poca materia orgánica y una estructura deficiente que dificulta la retención de agua (Zambrano-Bigiarini, 2015).

Para determinar el factor K en una ubicación específica, se requiere un análisis de laboratorio de las propiedades del suelo, como la granulometría y la materia orgánica. Estos datos se utilizan junto con valores tabulados y ecuaciones para calcular el valor de K, que se expresa en unidades de toneladas por hectárea por año por unidad de erosión (Álvarez-Soto, 2008)

El factor de erodabilidad del suelo K es esencial en la evaluación de la erosión del suelo, ya que refleja la capacidad del suelo para resistir la pérdida de sus capas superficiales debido a la erosión hídrica. La implementación de prácticas de conservación del suelo, como la siembra directa o la vegetación de cobertura, puede ayudar a reducir la erodabilidad del suelo y, por lo tanto, la erosión (Zambrano-Bigiarini, 2015).

2.11 Factor Topográfico (LS)

El factor topográfico (LS) es uno de los componentes fundamentales de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y su versión mejorada, la Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Este factor se enfoca en la influencia que la topografía del terreno tiene sobre la erosión del suelo debido a la escorrentía superficial. El valor de LS se deriva de las características de pendiente y longitud de ladera en un área determinada (Álvarez-Soto, 2008)

La pendiente es un factor crítico en la determinación de la erosión del suelo, ya que las pendientes más pronunciadas tienden a generar una escorrentía más rápida y concentrada, lo que aumenta el potencial erosivo. La longitud de ladera, por otro lado, se refiere a la distancia que un flujo de agua recorre en una ladera antes de llegar a un punto de drenaje. Cuanto más larga sea esta distancia, mayor será la oportunidad para que la escorrentía acumule sedimentos a medida que fluye cuesta abajo (Renard, 1997).

El factor LS se calcula mediante una fórmula que incorpora valores de pendiente y longitud de ladera. A medida que estos valores aumentan, el factor LS también aumenta, lo que indica un mayor riesgo de erosión hídrica. La combinación de la pendiente y la longitud de ladera permite evaluar cómo la topografía influye en la erosión del suelo en una región específica.

El conocimiento del factor topográfico LS es esencial para identificar áreas de mayor riesgo de erosión en una cuenca o cuenca, lo que facilita la implementación de medidas de conservación del suelo y la gestión de recursos hídricos. Al comprender cómo la topografía afecta la erosión, los planificadores y conservacionistas pueden tomar decisiones informadas para prevenir la pérdida de suelo y la sedimentación en cuerpos de agua (Álvarez-Soto, 2008).

2.12 Factor Cobertura De Suelo (C)

El factor de cobertura del suelo es un componente esencial en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y en su versión mejorada, la Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Este factor se centra en la evaluación de cómo la vegetación y la cubierta del suelo influyen en la erosión del suelo causada por la escorrentía superficial. La vegetación desempeña un papel crucial en la protección del suelo contra la erosión,

ya que sus raíces estabilizan el suelo y su cobertura reduce la velocidad de la escorrentía (Álvarez-Soto, 2008).

La cobertura del suelo se expresa generalmente como un porcentaje que representa cuánta superficie del suelo está protegida por vegetación, residuos de cultivos u otras coberturas protectoras. Cuanto mayor sea este porcentaje, menor será la exposición del suelo a la erosión. Las prácticas agrícolas que dejan el suelo expuesto, como la labranza intensiva o la falta de cultivos de cobertura, tienden a aumentar la erosión (Montgomery, 2007).

El factor de cobertura del suelo en la USLE se utiliza para cuantificar cómo las prácticas de manejo de la tierra y la vegetación influyen en la erosión. A medida que el porcentaje de cobertura del suelo disminuye, el factor aumenta, indicando un mayor riesgo de erosión hídrica. Por lo tanto, promover prácticas de manejo sostenible del suelo que incluyan la conservación de la vegetación y la cobertura adecuada es fundamental para reducir la erosión y preservar la calidad del suelo (Álvarez-Soto, 2008).

2.13 Factor Prácticas De Conservación Del Suelo (P)

El factor de prácticas de conservación del suelo es una de las componentes clave en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y su versión mejorada, la Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Este factor se enfoca en evaluar cómo las prácticas de manejo agrícola y de suelo afectan la erosión del suelo causada por la escorrentía superficial. Se refiere a las medidas adoptadas por los agricultores y las comunidades para minimizar la erosión del suelo y conservar su calidad.

Las prácticas de conservación del suelo pueden incluir una serie de estrategias, como la siembra de cultivos de cobertura, la construcción de terrazas, la aplicación de técnicas de labranza mínima o nula, y la creación de barreras vegetativas a lo largo de las pendientes. Estas prácticas son esenciales para reducir la erosión y preservar la estructura del suelo, lo que a su vez mejora su capacidad para retener agua y nutrientes (Álvarez-Soto, 2008)

El factor de prácticas de conservación del suelo se expresa en forma de un valor numérico que refleja la efectividad de las prácticas adoptadas. Cuanto mayor sea este valor, menor será la erosión esperada en un área determinada. Los agricultores y las autoridades locales pueden utilizar esta información para tomar decisiones informadas

sobre qué prácticas de manejo del suelo implementar en función de las condiciones específicas de su área (Montgomery, 2007).

2.14 El Papel De Los SIG En Los Estudios De Erosión.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) desempeñan un papel fundamental en los estudios de erosión del suelo al proporcionar herramientas poderosas para la recopilación, gestión y análisis de datos espaciales. Estos sistemas permiten la integración de información geoespacial diversa, como datos topográficos, climáticos, de uso del suelo y prácticas de conservación, en un entorno digital que facilita la comprensión de las relaciones espaciales y temporales que influyen en la erosión del suelo (Olaya, 2004).

Los SIG son esenciales para calcular algunos de los factores clave en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y su versión mejorada, la Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Por ejemplo, el factor de pendiente (S) se calcula mediante análisis topográficos, y los SIG permiten generar modelos de pendiente a partir de datos de elevación de manera eficiente y precisa. Del mismo modo, los datos climáticos, que son necesarios para determinar el factor de erosividad de la lluvia (R), se pueden gestionar y analizar fácilmente utilizando SIG para estimar patrones de precipitación (Kanungo, 2011).

los SIG facilitan la visualización de los resultados de los estudios de erosión en mapas, lo que permite a los investigadores y las autoridades locales identificar áreas críticas de erosión y tomar decisiones informadas sobre prácticas de manejo del suelo y conservación. Estos sistemas también respaldan la planificación de estrategias de mitigación al proporcionar información detallada sobre la ubicación y la magnitud de la erosión del suelo (Mitasova, 1996).

CAPITULO III

PROPUESTA DE INNOVACION Y SOLUCION DEL PROBLEMA

3.1 Pruebas realizadas

Para la realización del trabajo se realizaron el cálculo de los Factores R, K, LS y C:

3.1.1 Factor de R

3.1.1.1 Selección de Estaciones Meteorológicas aplicando Polígonos de Thiessen

En el *Mapa 8 Mapa De Polígonos De Thiessen* las estaciones meteorológicas que tienen influencia dentro del área de la cuenca delimitada son la estaciones meteorológicas San Andrés siendo el 19.3% del área de la cuenca, Pinos Sud siendo el 78.6% del área de la cuenca y Campanario siendo el 2.1% del área de la cuenca.

3.1.1.2 Calculo de las precipitaciones medias mensuales

Tabla 1 Precipitaciones De La Estación "San Andres"

Precipitaciones de la Estación de "San Andrés" (mm/mes)												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABRI	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2000	387,50	230,10	154,00	23,90	5,40	0,00	0,00	2,60	2,50	20,10	112,30	204,70
2001	276,70	187,40	122,10	39,80	4,70	5,40	1,40	8,20	17,20	85,30	104,10	315,00
2002	186,60	292,20	249,60	40,80	6,20	0,00	1,50	1,00	8,00	339,40	116,20	118,20
2003	172,70	127,40	231,30	18,10	4,50	3,50	0,00	0,00	1,00	94,50	123,00	240,20
2004	133,80	131,10	174,20	67,40	34,50	2,20	4,10	4,60	46,00	35,20	122,70	266,80
2005	170,80	309,90	192,60	81,90	0,50	0,00	3,10	4,90	7,20	27,80	202,00	239,50
2006	277,40	276,60	138,50	47,50	15,00	0,00	0,50	1,00	1,00	146,00	102,50	151,50
2007	309,00	111,50	203,50	34,50	11,00	0,00	0,00	2,00	38,00	110,50	232,00	290,00
2008	287,00	187,00	291,00	22,50	0,00	0,00	0,00	5,50	7,50	71,00	174,00	346,60
2009	206,00	124,10	267,30	78,90	8,00	0,00	0,00	0,00	15,00	9,60	150,40	283,90
2010	142,60	312,40	76,00	29,50	16,40	2,00	0,00	1,00	1,90	27,70	22,20	159,60
2011	183,60	194,10	114,70	51,20	8,30	7,50	0,00	0,00	37,40	45,20	84,10	308,30
2012	244,60	202,00	171,30	127,90	1,50	3,00	2,00	4,90	7,30	72,90	116,60	136,80
2013	308,60	165,60	81,80	25,90	4,80	0,00	0,00	2,70	1,90	23,90	109,30	159,20
2014	173,60	147,60	88,70	5,50	0,00	16,60	0,50	9,50	2,50	145,60	111,40	145,90
2015	261,50	256,00	172,70	23,50	21,00	1,30	7,40	0,00	6,00	52,70	103,90	124,70
2016	91,00	108,00	77,10	9,60	5,80	0,00	0,00	20,00	18,00	8,20	131,00	101,50
2017	51,50	106,30	79,80	39,10	1,00	1,00	0,00	2,20	13,00	53,50	51,80	190,20
2018	292,70	147,60	130,00	23,10	15,50	0,00	3,50	10,50	70,40	65,10	82,60	197,20
2019	91,70	113,00	127,60	118,80	15,40	0,00	4,50	11,20	0,50	78,30	112,00	115,10
2020	122,30	314,50	125,90	24,50	6,30	0,00	0,00	0,00	32,10	90,90	61,70	147,90
2021	195,40	139,20	197,00	72,50	5,80	0,50	5,60	0,00	16,20	20,80	173,90	208,40
2022	208,40	133,00	74,00	31,70	3,20	0,00	1,20	4,80	12,80	10,90	63,09	140,60
Promedio	**207,61**	**187,68**	**153,94**	**45,13**	**8,47**	**1,87**	**1,53**	**4,20**	**15,80**	**71,09**	**115,77**	**199,64**

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI)

Tabla 2 Precipitaciones De La Estación "Pinos Sub"

Precipitaciones de la Estación de "Pinos Sud" (mm/mes)												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABRI	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2000	549,70	365,50	265,70	23,70	7,50	0,00	0,00	2,20	6,70	52,00	82,20	308,00
2001	191,20	299,50	187,00	54,40	3,50	13,10	1,40	3,10	12,50	44,40	109,60	191,30
2002	238,90	416,40	149,70	64,40	2,20	0,00	4,50	0,00	7,50	172,70	208,10	244,30
2003	242,80	171,00	316,10	28,70	3,10	5,60	0,00	0,00	8,10	53,50	115,70	172,40
2004	275,50	207,90	191,10	134,20	32,90	5,50	0,80	6,50	54,80	36,80	107,60	305,80
2005	224,70	370,00	194,70	32,80	1,60	0,00	9,00	3,30	9,90	26,40	148,90	226,50
2006	319,40	262,60	252,10	124,40	26,60	0,00	1,20	0,60	0,00	87,80	57,00	119,50
2007	291,10	264,10	306,00	52,10	15,80	0,00	0,00	2,00	14,80	62,10	159,70	299,10
2008	287,80	265,20	187,70	42,20	0,00	0,00	0,00	6,60	19,20	33,10	182,00	370,40
2009	229,80	172,70	215,60	78,50	12,00	0,00	1,30	1,30	16,10	11,90	217,10	224,70
2010	138,70	390,40	105,50	34,70	6,20	0,00	1,70	1,20	0,30	25,70	41,00	226,30
2011	142,10	150,70	147,70	55,20	12,10	6,00	0,00	2,00	0,00	90,20	197,20	404,30
2012	237,10	282,10	145,90	125,90	1,20	2,10	2,10	0,00	3,50	50,10	127,90	145,30
2013	263,60	262,70	66,70	29,90	1,00	1,00	0,00	0,00	6,20	85,20	132,90	198,90
2014	259,30	357,90	121,20	18,70	0,00	10,20	0,00	9,10	3,10	55,80	117,40	228,20
2015	249,60	433,70	419,60	166,60	0,00	3,20	6,30	0,00	1,20	77,80	131,80	177,30
2016	192,20	155,40	146,00	19,90	17,70	6,60	0,00	48,60	41,20	40,10	178,00	315,60
2017	114,40	191,70	176,80	97,20	2,10	0,00	2,50	8,10	55,90	69,10	85,60	206,30
2018	424,00	322,80	186,60	17,90	5,50	2,00	0,00	4,40	16,20	129,00	109,80	304,00
2019	281,50	109,30	168,60	112,70	18,70	0,00	27,30	9,50	0,00	80,00	158,00	229,90
2020	222,30	268,20	237,60	18,30	7,30	6,10	0,00	0,00	44,20	55,00	114,40	211,60
2021	378,60	338,70	297,60	166,50	3,40	6,40	26,00	0,00	37,10	44,00	212,90	202,40
2022	336,80	291,10	63,80	50,50	8,10	0,00	0,00	3,10	13,70	27,00	36,20	218,70
Promedio	**264,83**	**276,07**	**197,80**	**67,37**	**8,20**	**2,95**	**3,66**	**4,85**	**16,18**	**61,29**	**131,78**	**240,47**

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI)

Tabla 3 Precipitaciones De La Estación "Campanario"

Precipitaciones de la Estación de "Campanario" (mm/mes)												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABRI	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2000	164,70	50,20	83,80	14,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,70	73,40
2001	91,90	108,90	69,10	0,00	0,00	0,00	0,00	4,90	0,00	0,00	30,60	67,40
2002	28,30	57,70	63,10	2,90	0,00	8,50	0,20	0,00	0,00	80,20	36,70	23,50
2003	77,30	36,80	59,60	2,40	2,20	0,00	0,00	0,00	0,00	32,40	1,20	44,50
2004	75,60	54,90	69,70	9,30	0,00	0,00	0,00	10,90	2,00	2,10	14,00	31,50
2005	84,80	106,10	30,00	6,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,60	4,70	20,90	60,90
2006	130,30	116,50	58,20	19,40	12,70	0,00	0,00	0,00	0,00	59,40	8,70	28,60
2007	114,70	52,60	74,40	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	23,90	17,90	59,70
2008	123,80	77,60	59,70	10,80	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	13,90	34,60	134,20
2009	87,30	75,50	97,00	46,50	0,70	0,00	0,00	0,00	18,00	0,00	20,50	86,40
2010	84,60	96,90	19,90	4,10	13,30	0,00	0,00	0,00	0,00	2,60	0,00	98,50
2011	70,90	157,30	28,60	27,30	5,90	0,00	0,00	0,00	0,60	8,20	6,90	77,90
2012	148,50	134,90	86,10	26,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	10,30	26,00	34,10
2013	89,20	74,60	6,60	0,00	2,80	2,50	0,00	9,10	0,00	11,10	8,00	47,00
2014	167,40	88,70	20,30	1,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	43,40	12,20	40,10
2015	129,90	70,10	69,40	22,40	13,20	0,00	0,00	0,00	0,00	20,70	45,70	12,30
2016	51,30	44,80	1,60	15,10	0,00	0,00	0,00	5,40	10,00	9,76	8,90	15,60
2017	101,50	58,40	96,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,50	9,70	36,90	63,60
2018	128,10	53,60	42,90	14,80	0,00	0,00	0,00	0,00	4,60	5,30	11,00	65,40
2019	42,70	49,80	36,30	20,10	7,40	0,00	13,70	0,00	0,00	7,60	8,90	48,50
2020	116,20	46,00	88,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,50	51,20	18,50	51,50
2021	80,30	61,20	36,90	17,50	0,00	0,00	0,00	0,00	8,70	0,00	22,70	146,10
2022	85,00	67,20	28,70	7,60	0,00	0,00	0,00	1,22	3,41	0,00	1,90	94,00
Promedio	**98,88**	**75,67**	**53,32**	**11,66**	**2,53**	**0,48**	**0,60**	**1,37**	**3,96**	**17,24**	**17,23**	**61,07**

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI)

Tabla 4 Precipitaciones Medias Mensuales

PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES													
Estaciones	**ENE**	**FEB**	**MAR**	**ABRI**	**MAY**	**JUN**	**JUL**	**AGO**	**SEP**	**OCT**	**NOV**	**DIC**	**Anual**
E. de San Andrés	207,61	187,68	153,94	45,13	8,47	1,87	1,53	4,20	15,80	71,09	115,77	199,64	1012,75
E. de Pinos Sud	264,83	276,07	197,80	67,37	8,20	2,95	3,66	4,85	16,18	61,29	131,78	240,47	1275,44
E. de Campanario	98,88	75,67	53,32	11,66	2,53	0,48	0,60	1,37	3,96	17,24	17,23	61,07	344,01

(Fuente: Elaboración Propia)

3.1.1.3 Aplicación de la fórmula Fournier para el cálculo de R en cada estación meteorológica

Aplicamos la siguiente formula:

$$R = \sum_{I=1}^{I=12} \frac{(Pm)^2}{P_A}$$

Pm = Precipitación media mensual (mm)

PA = Precipitación anual (mm)

Tabla 5 Calculo Del Valor R En Las Estaciones Meteorológicas

Calculo Del Valor R En Las Estaciones Meteorológicas													
Estaciones	**ENE**	**FEB**	**MAR**	**ABRI**	**MAY**	**JUN**	**JUL**	**AGO**	**SEP**	**OCT**	**NOV**	**DIC**	**R**
E. de San Andrés	42,56	34,78	23,40	2,01	0,07	0,00	0,00	0,02	0,25	4,99	13,23	39,36	**160,67**
E. de Pinos Sud	54,99	59,76	30,67	3,56	0,05	0,01	0,01	0,02	0,21	2,95	13,62	45,34	**211,17**
E. de Campanario	28,42	16,64	8,26	0,39	0,02	0,00	0,00	0,01	0,05	0,86	0,86	10,84	**66,36**

(Fuente: Elaboración Propia)

3.1.1.4 Cargado de los valores de R dentro de ArcGIS

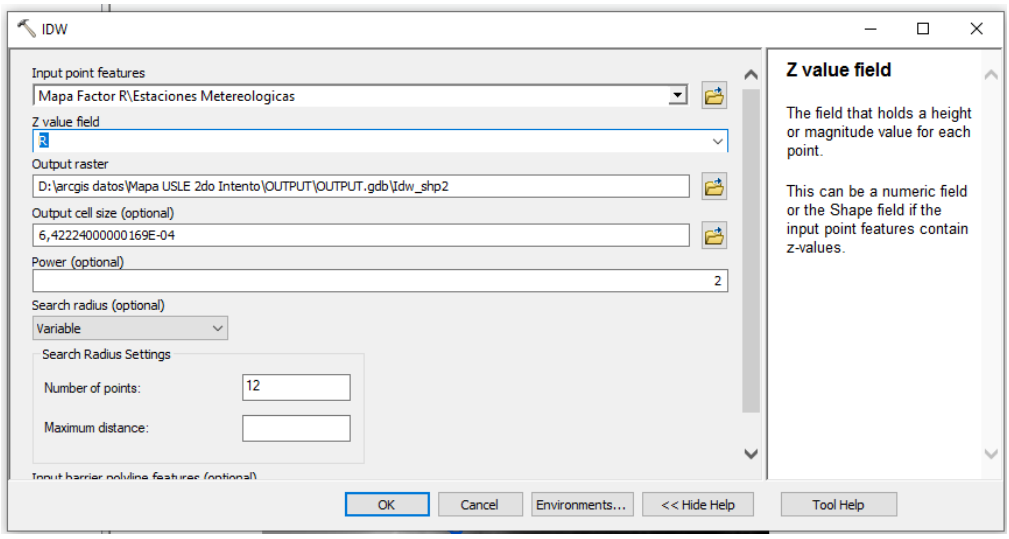
Ilustración 1 Valores de R cargado dentro ArcGIS



(Fuente: Elaboración Propia)

3.1.1.5 Herramienta IDM Para Realizar La Interpolación De Los Valores R

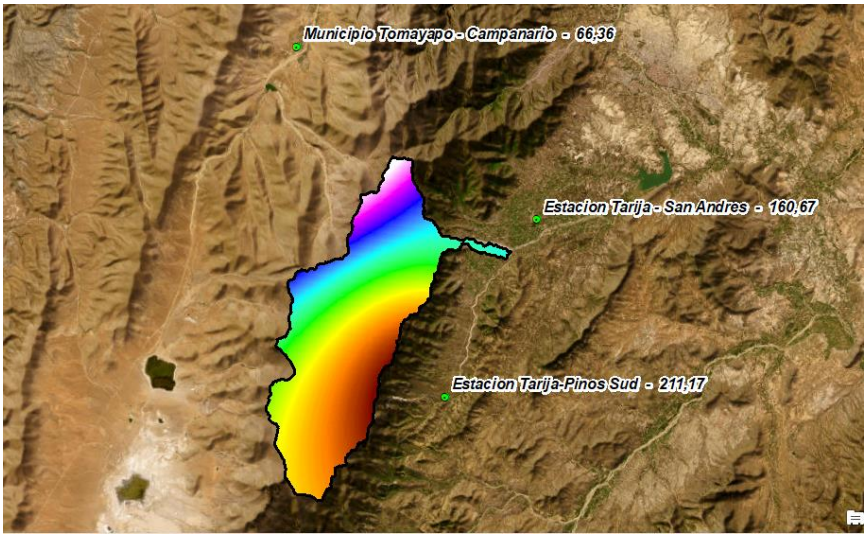
Ilustración 2 Herramienta IDW



(Fuente: Elaboración Propia)

3.1.1.6 Ráster De Factor R

Ilustración 3 Ráster del Factor R



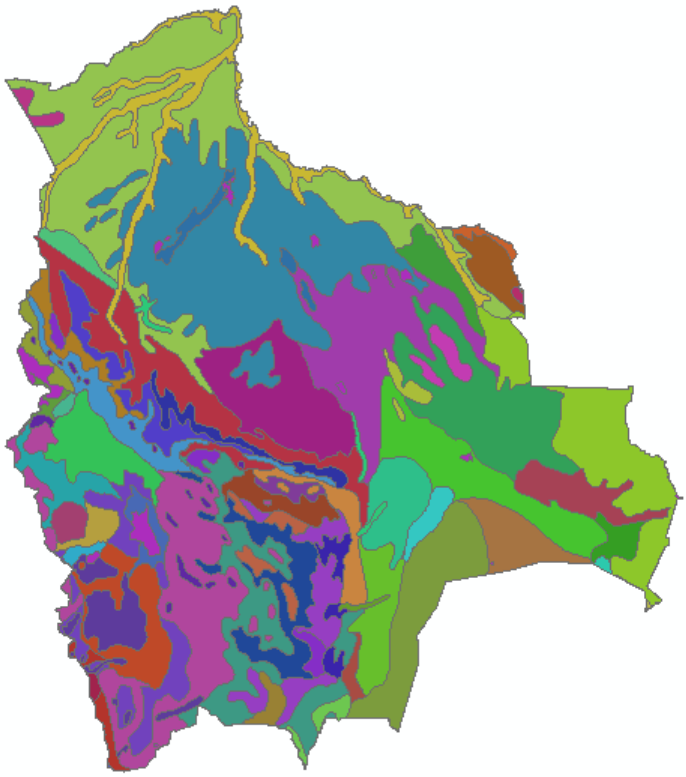
(Fuente: Elaboración Propia)

Ver Mapa 9 Mapa De Factor R

3.1.2 Factor K

3.1.2.1 Mapa de Suelos de Bolivia

Ilustración 4 Mapa de uso de suelos de Bolivia



(Fuente: FAO-UN - Land and Water Division)

3.1.2.2 Recorte Del Mapa De Uso De Suelo Del Tamaño De La Cuenca

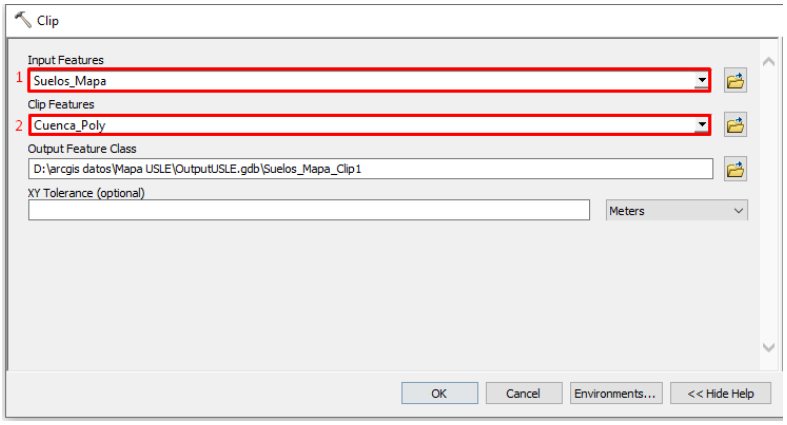
Ilustración 5 Cuenca delimitada sobre montada en el mapa de uso de suelos de Bolivia



(Fuente: Elaboración Propia)

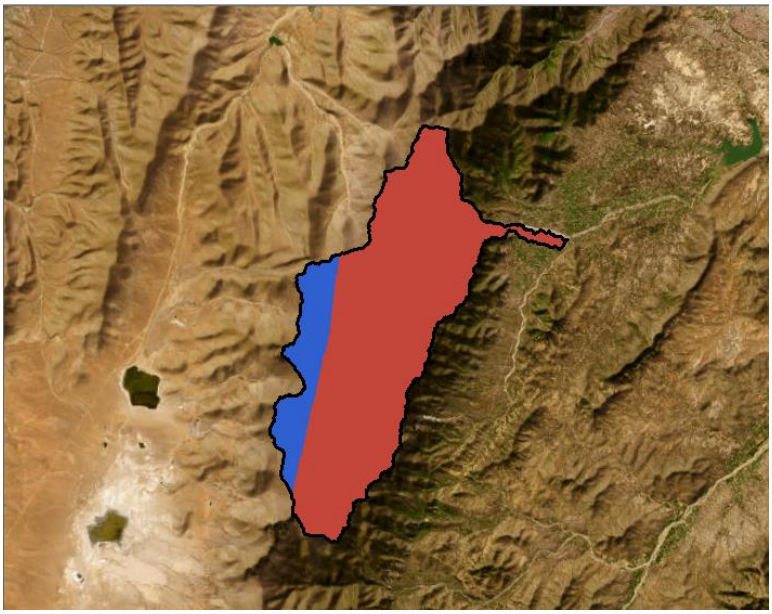
3.1.2.3 Herramienta Clip Para El Recorte De La Cuenca Sobre El Mapa De Uso De Suelos De Bolivia

Ilustración 6 Herramienta Clip para el recorte de la cuenca sobre el mapa de uso de suelos de Bolivia



(Fuente: Elaboración Propia)

Ilustración 7 Recorte De Uso De Suelo De Bolivia Del Tamaño De La Cuenca



((Fuente: Elaboración Propia))

3.1.2.4 Obtención del valor en el mapa de suelos

Tabla 6 Calculo del factor K

Soil unit symbol	ms (sand) Top Soil %	msilt (slit) Top soil %	mc (clay) Topsoil %	orgC Topsoil Organic Carbon %	f_{sand} (1)	f_{cl-si} (2)	f_{org} (3)	f_{hisand} (4)	K USLE (5)	K (6)
I	58,90	16,20	24,90	0,97	0,285	0,756	0,927	0,994	0,199	***0,0261***
YL	69,80	5,70	24,40	0,40	0,256	0,607	0,992	0,952	0,147	***0,0193***

(Fuente: Elaboración Propia)

En donde aplicamos las siguientes fórmulas para su cálculo:

$$(1)\quad f_{csand} = (0.2 + 0.3 * exp\left[-0.0256 * m_s * \left(1 - \frac{m_{silt}}{100}\right)\right]$$

$$(2)\quad f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}}\right)^{0.3}$$

$$(3)\quad f_{org} = \left[1 - \frac{0.25 * orgC}{orgC + exp[3.72 - 2.95 * oegC]}\right]$$

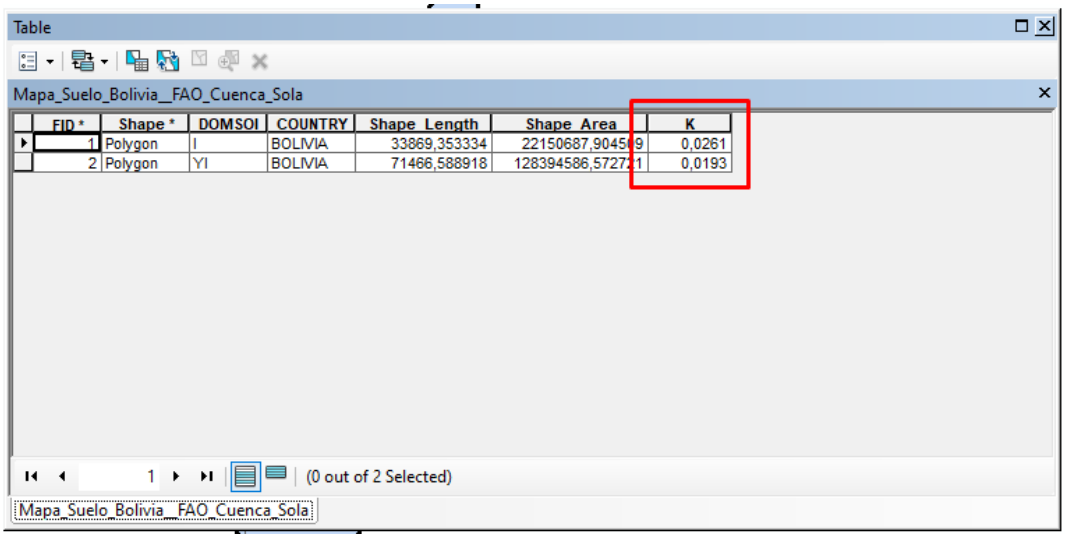
$$(4)\quad f_{hisand} = \left[1 - \frac{0.7 * (1 - \frac{m_s}{100})}{\left(1 - \frac{m_s}{100}\right) + exp\left[-5.51 + 22.9 * (1 + \frac{m_s}{100})\right]}\right]$$

$$(5)\quad K_{USLE} = f_{csand} * f_{cl-si} * f_{orgc} * f_{hisand}$$

$$(6)\quad K = 0.1317 * (f_{csand} * f_{cl-si} * f_{orgc} * f_{hisand})$$

3.1.2.5 Cargado de los valores K en Arcgis

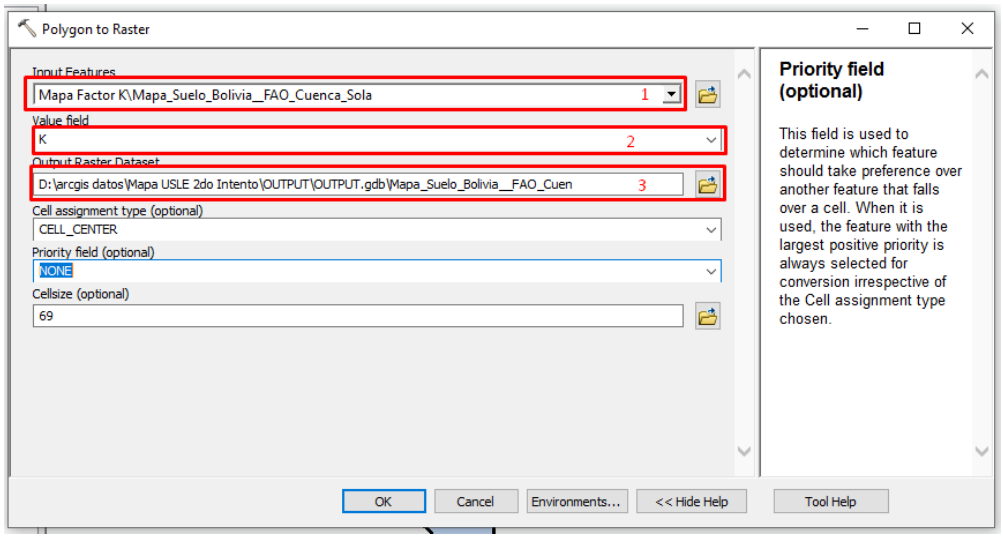
Ilustración 8 Cargado de los valores de K obtenidos en ArcGIS



(Fuente: Elaboración Propia)

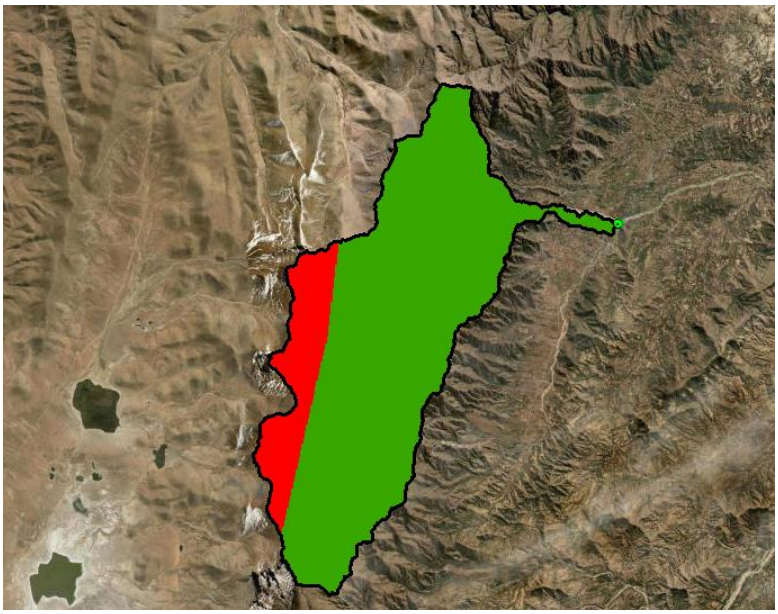
3.1.2.6 Herramienta Polygon To Raster

Ilustración 9 Herramienta Polygon To Raster Para La Conversión Del Shape A Ráster



(Fuente: Elaboración Propia)

Ilustración 10 Ráster Del Factor K



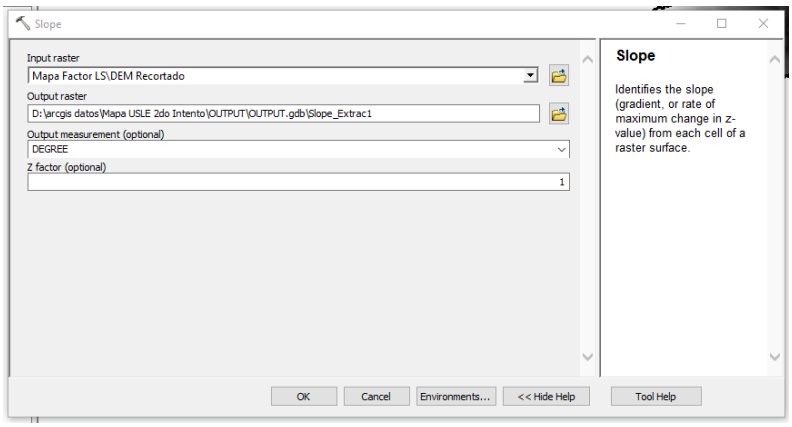
(Fuente: Elaboración Propia)

Ver *Mapa 10 Mapa De Factor K*

3.1.3 Factor LS

3.1.3.1 Herramienta Slope

Ilustración 11 Herramienta Slope Para Generar El Shape De Pendientes Para El Factor LS



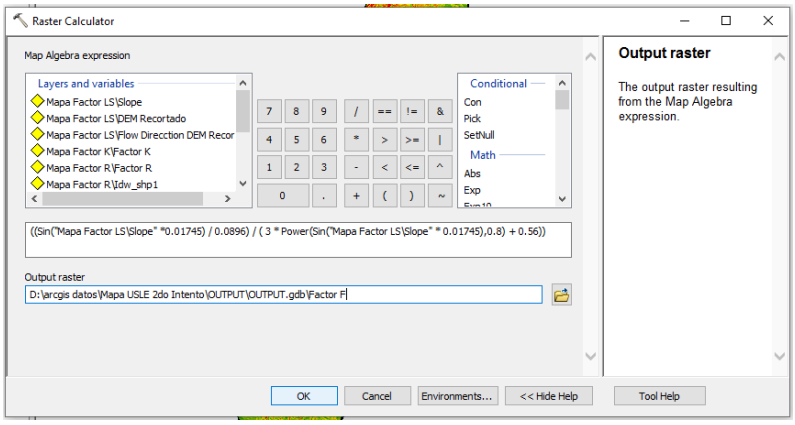
(Fuente: Elaboración Propia)

3.1.3.2 Calculo del Factor F con la herramienta Ráster Calculator

Aplicamos la siguiente formula:

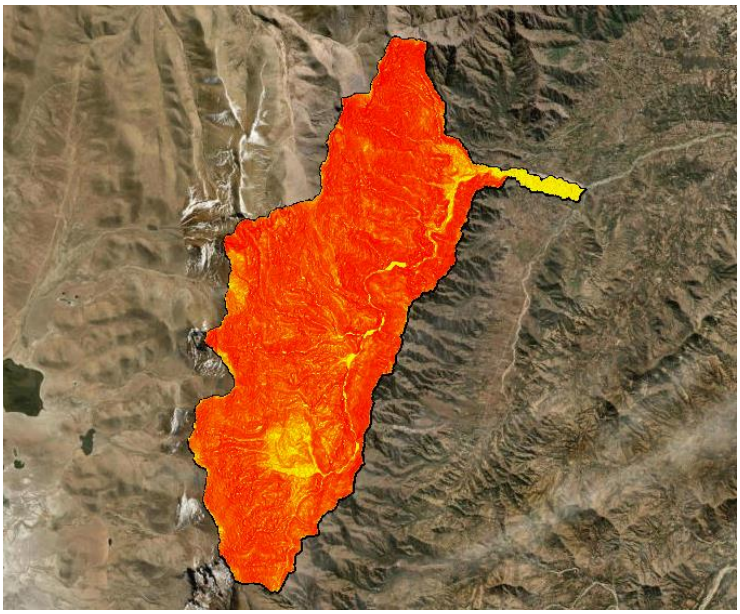
$$F = \frac{\sin\beta/0{,}0896}{3(\sin\beta)^{0{,}8}+0{,}56}$$

Ilustración 12 Ventana Del Raster Calculator Para Obtener El Factor F



(Fuente: Elaboración Propia)

Ilustración 13 Ráster del Factor F



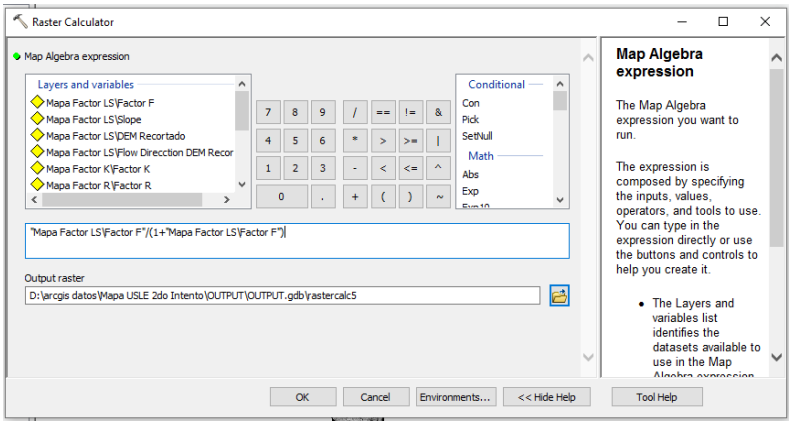
(Fuente: Elaboración Propia)

3.1.3.3 Calculo del Factor M con la herramienta Raster Calculator

En esta ventana aplicamos la siguiente formula:

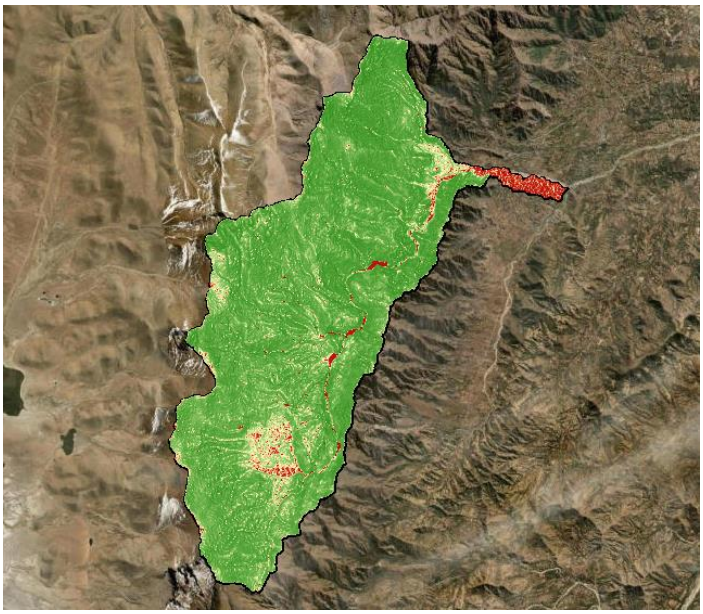
$$m = \frac{F}{(1+F)}$$

Ilustración 14 Ventana Del Raster Calculator Para Obtener El Factor M



(Fuente: Elaboración Propia)

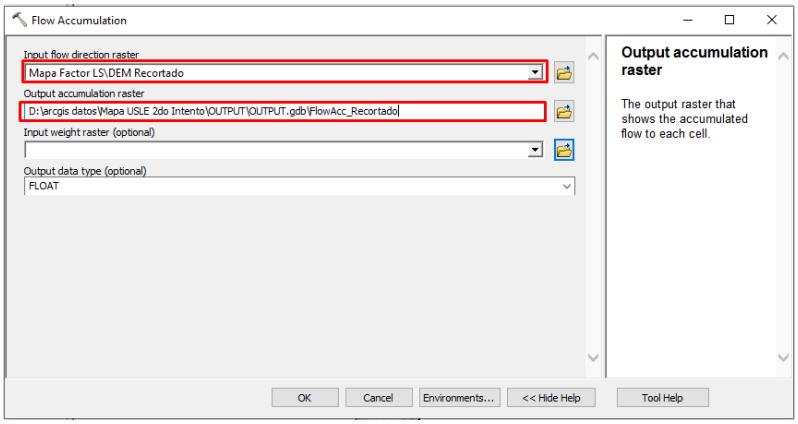
Ilustración 15 Ráster del Factor M



(Fuente: Elaboración Propia)

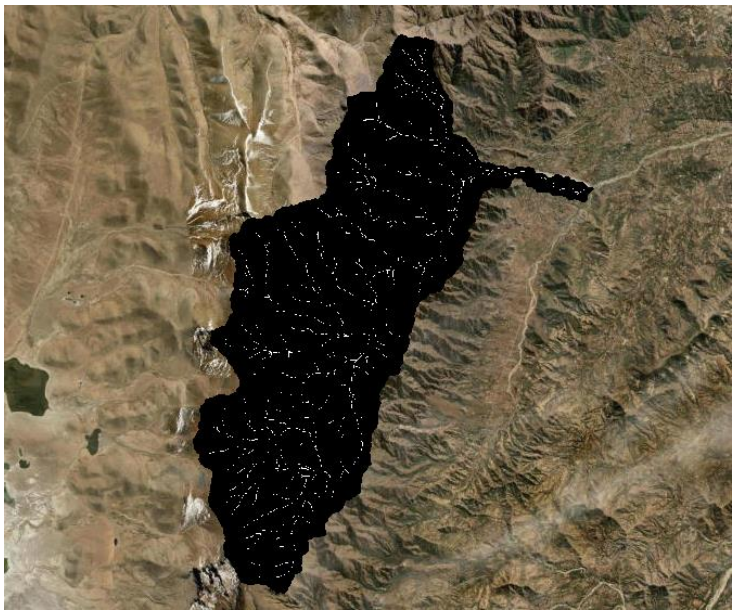
3.1.3.4 Herramienta Flow Accumulation

Ilustración 16 Ventana de la herramienta flow accumulation



(Fuente: Elaboración Propia)

Ilustración 17 Ráster del Flow Accumulation



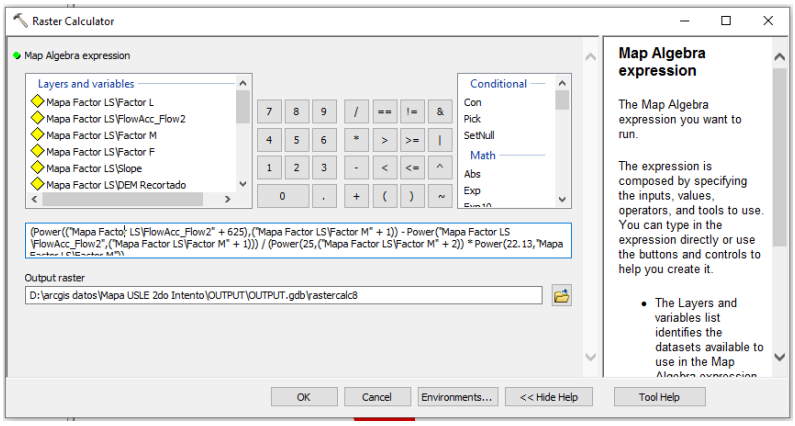
(Fuente: Elaboración Propia)

3.1.3.5 Calculo del Factor L con la herramienta Raster Calculator

En esta ventana aplicamos la siguiente formula:

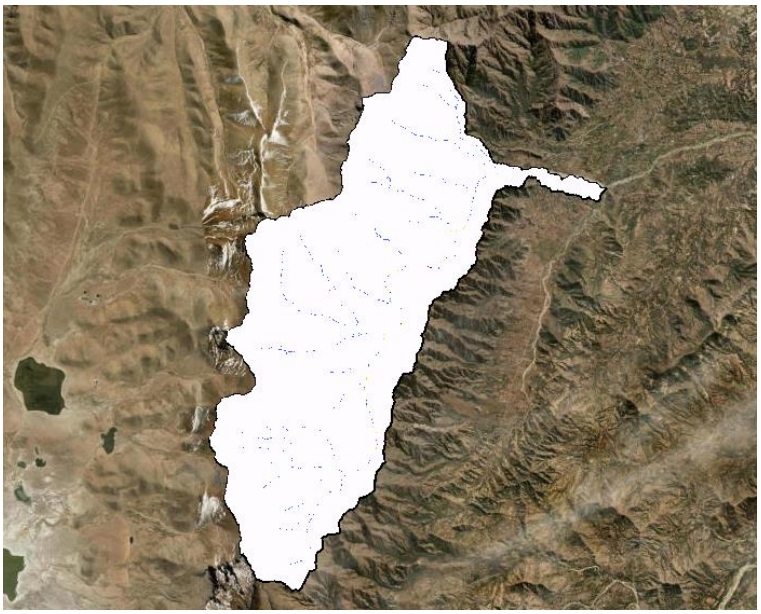
$$L = \left(\frac{\lambda}{22{,}13}\right)^{m}$$

Ilustración 18 Ventana Del Raster Calculator Para Obtener El Factor L



(Fuente: Elaboración Propia)

Ilustración 19 Raster Del Factor L



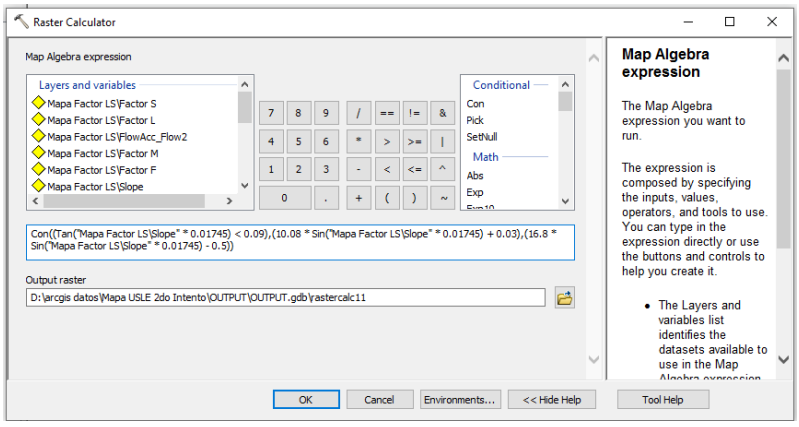
(Fuente: Elaboración Propia)

3.1.3.6 Calculo del Factor S con la herramienta Raster Calculator

En esta ventana aplicamos la siguiente formula:

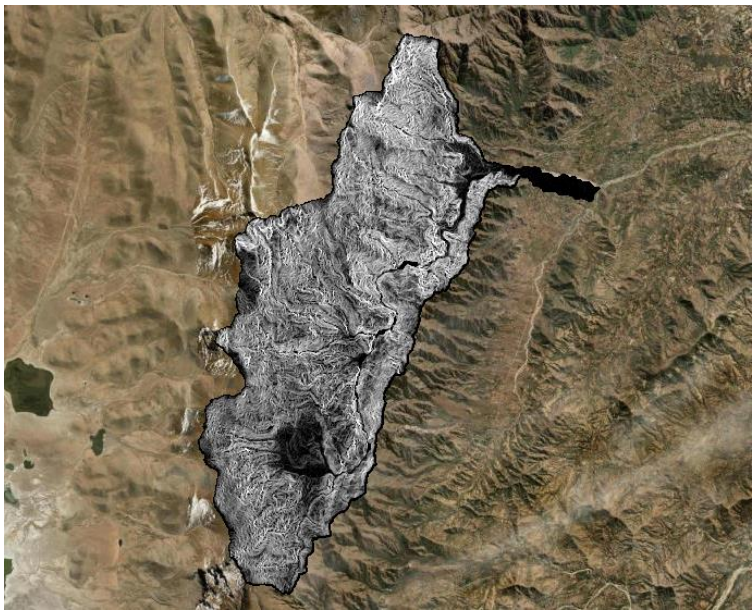
$$S_{(i,j)} = \begin{cases} 10{,}8 \sin \beta_{(i,j)} + 0{,}03 & \tan \beta_{(i,j)} < 0{,}09 \\ 16{,}8 \sin \beta_{(i,j)} - 0{,}5 & \tan \beta_{(i,j)} \geq 0{,}09 \end{cases}$$

Ilustración 20 Ventana Del Raster Calculator Para Obtener El Factor S



(Fuente: Elaboración Propia)

Ilustración 21 Ráster Del Factor S



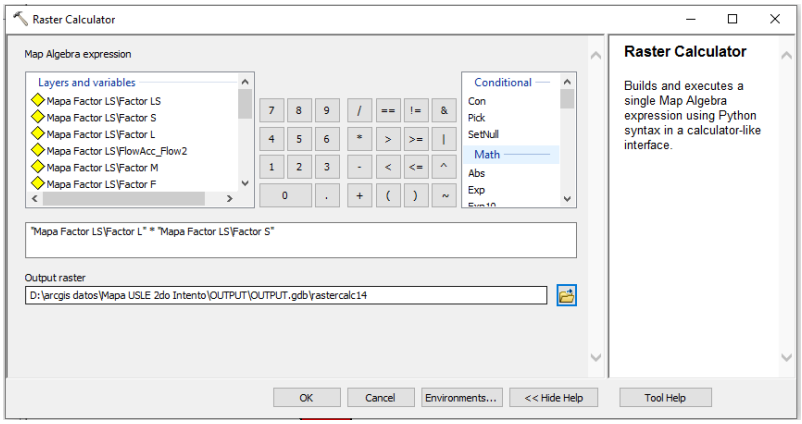
(Fuente: Elaboración Propia)

3.1.3.7 Calculo del Factor LS con la herramienta Raster Calculator

En esta ventana aplicamos la siguiente formula:

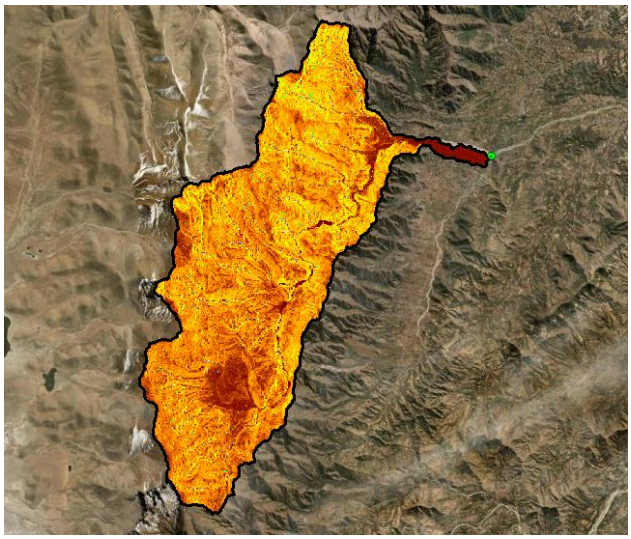
$$LS = Factor\ L * Factor\ S$$

Ilustración 22 Ventana Del Raster Calculator Para Obtener El Factor S



(Fuente: Elaboración Propia)

Ilustración 23 Ráster Del Factor LS



(Fuente: Elaboración Propia)

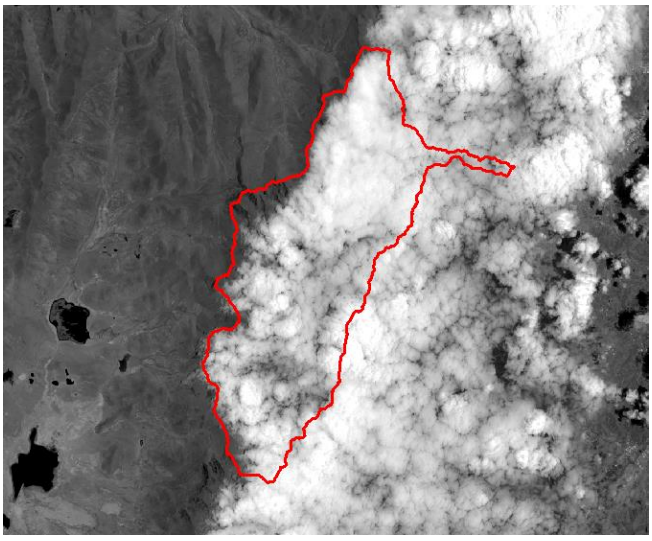
Y obtenemos el Ráster del Factor LS

Ver *Mapa 11 Mapa De Factor LS*

3.1.4 Factor C

3.1.4.1 Cargado de las Bandas 4 y 5 dentro de ArcGIS

Ilustración 24 Cargado de bandas 4 y 5 en ArcGIS



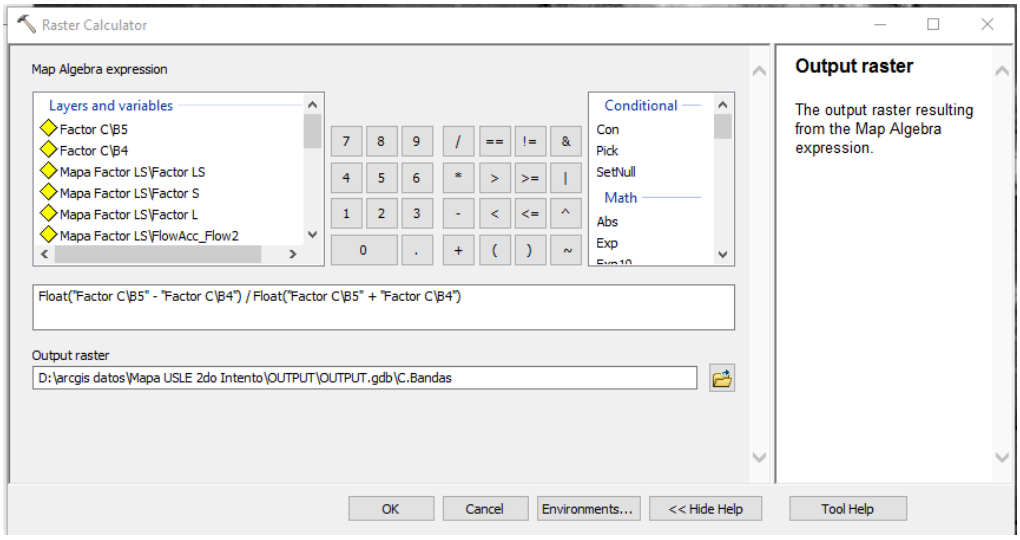
(Fuente: Elaboración Propia)

3.1.4.2 Herramienta Ráster Calculator Para La Combinación De Bandas

En esta ventana aplicamos la siguiente formula:

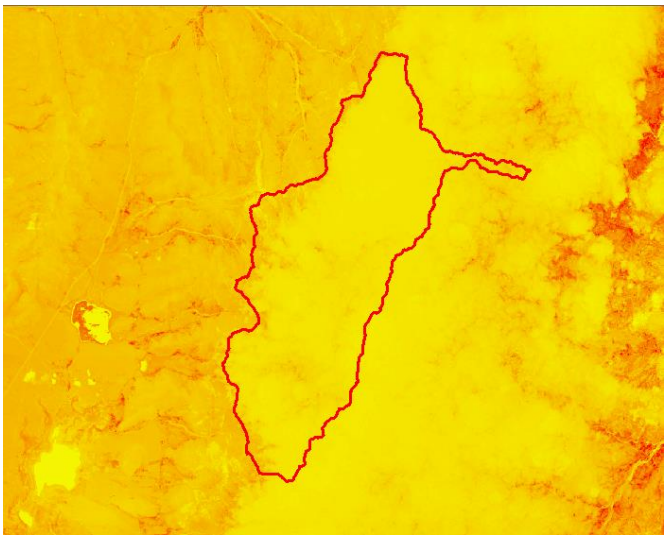
$$Combinacion\ de\ Bandas = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}$$

Ilustración 25 Ventana Del Ráster Calculator Para el Combinado de bandas



(Fuente: Elaboración Propia)

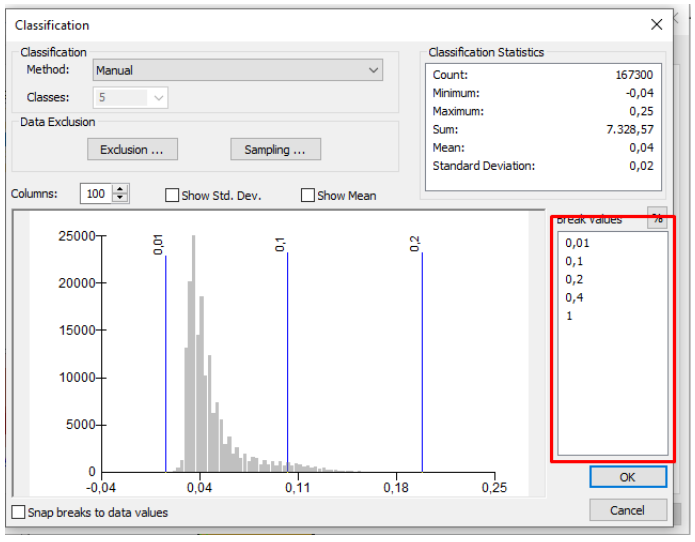
Ilustración 26 Ráster de la combinación de bandas



(Fuente: Elaboración Propia)

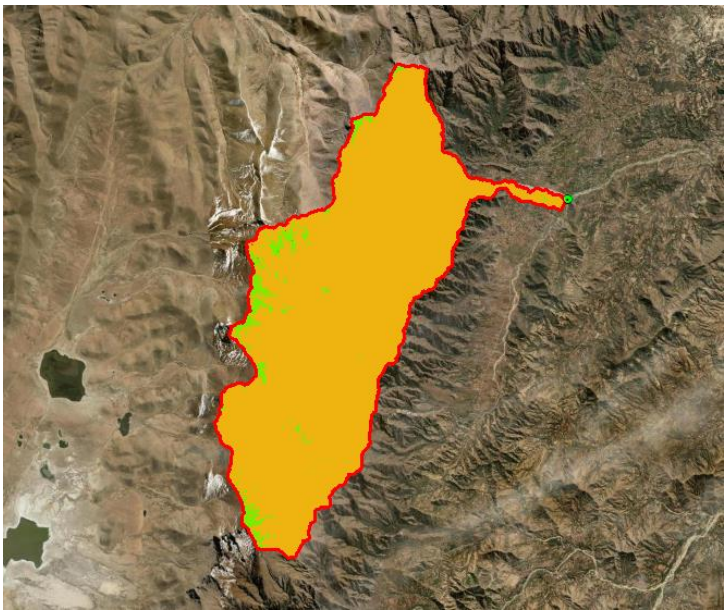
3.1.4.3 Modificación De La Clasificación Del Raster De Combinado De Bandas

Ilustración 27 Ventana De Properties Para La Modificación de los de clasificación del ráster de combinado de bandas



(Fuente: Elaboración Propia)

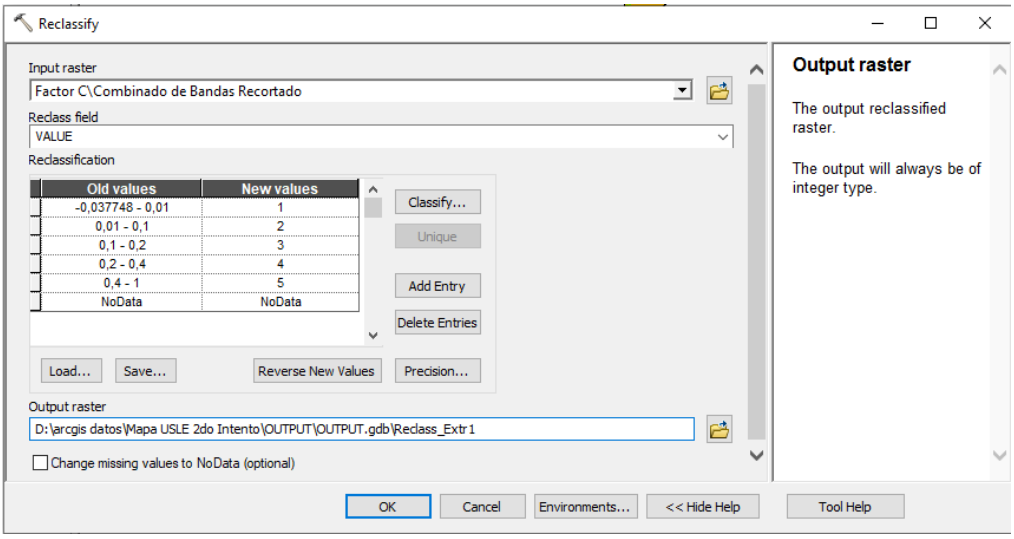
Ilustración 28 Ráster De La Nueva Clasificación Del Combinado De Bandas



(Fuente: Elaboración Propia)

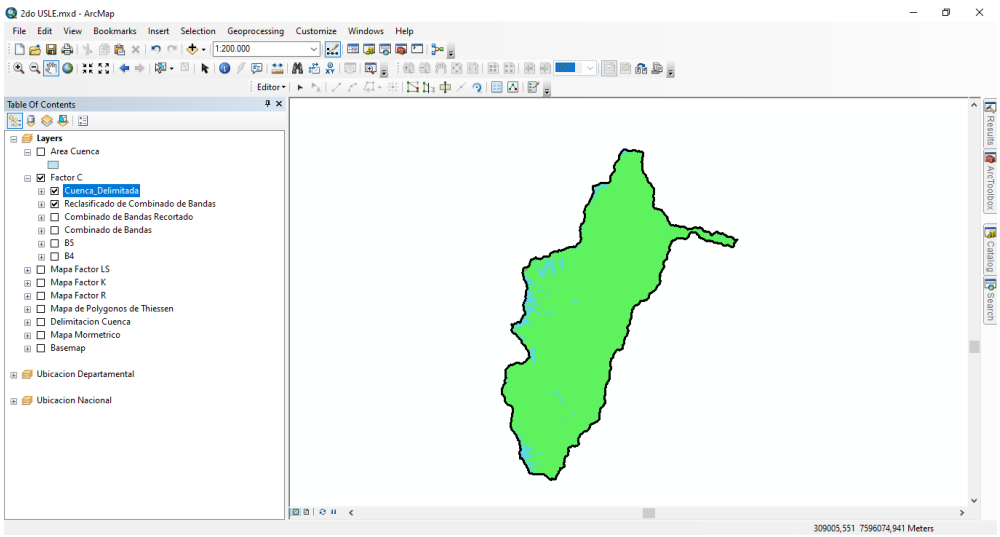
3.1.4.4 Herramienta Reclassify

Ilustración 29 Ventana de la herramienta Reclassify



(Fuente: Elaboración Propia)

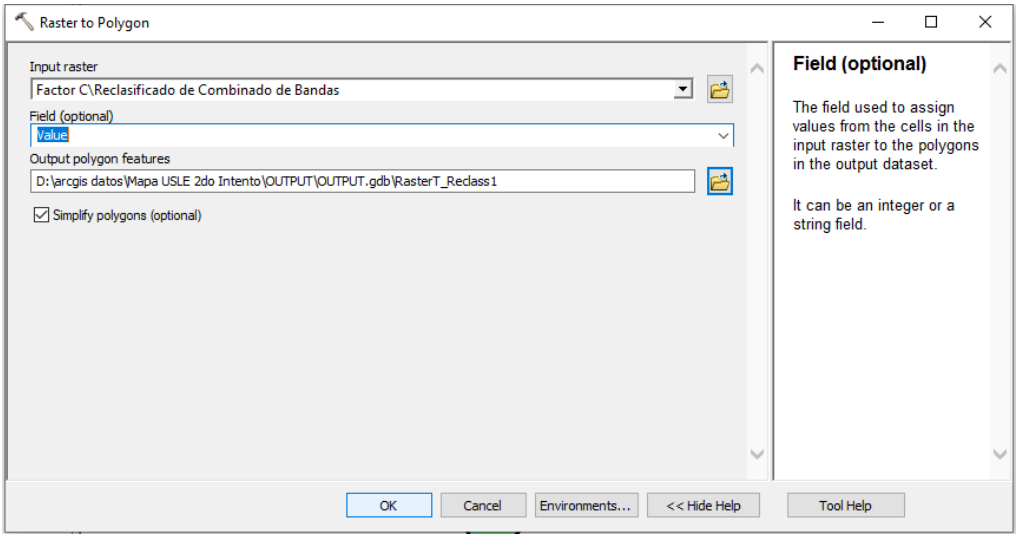
Ilustración 30 Ráster de combinado de bandas con la nueva reclasificación



(Fuente: Elaboración Propia)

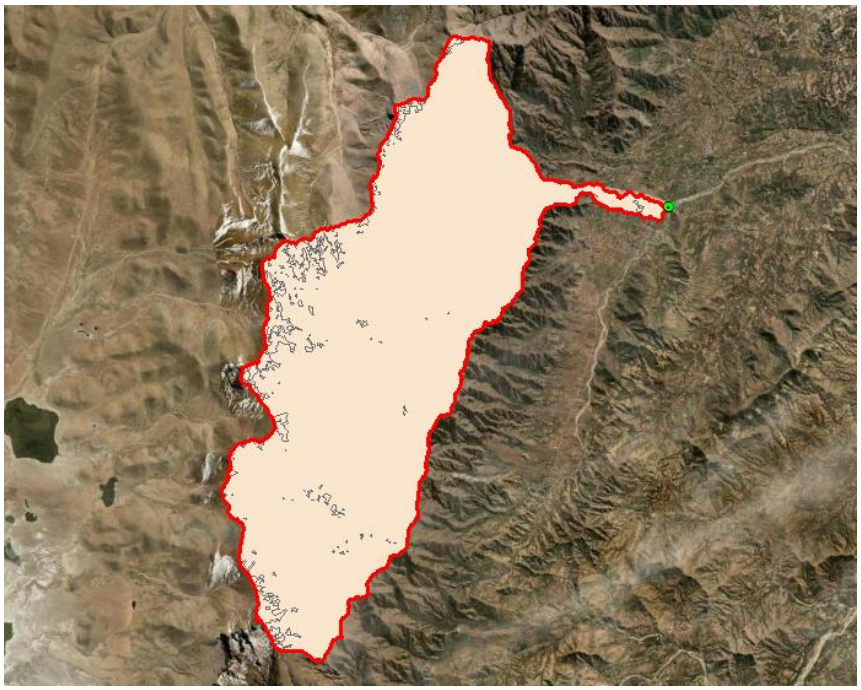
3.1.4.5 Raster to Polygon

Ilustración 31 Ventana de la herramienta Raster to Polygon



(Fuente: Elaboración Propia)

Ilustración 32 Shape creado con la herramienta Raster to polygon



(Fuente: Elaboración Propia)

3.1.4.6 Uso de la tabla para la clasificación de Uso de Suelo

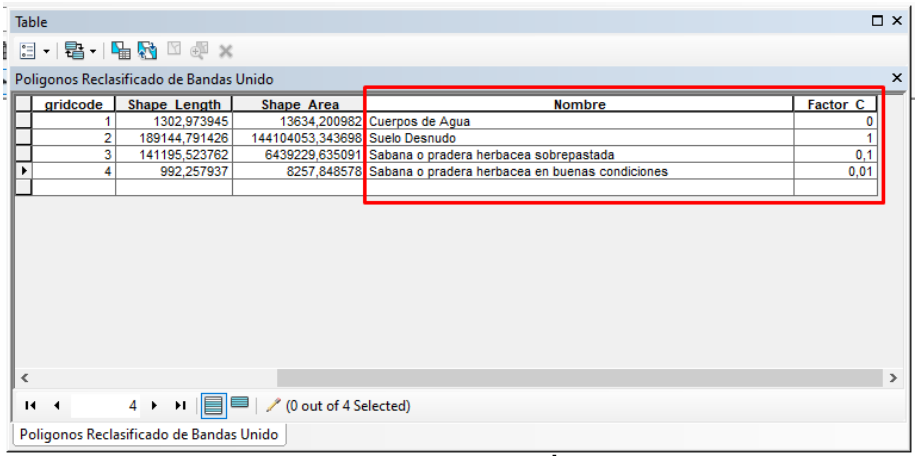
Ilustración 33 Tabla de uso de suelo

Cultivo y práctica	Media anual del factor C
Suelo desnudo	1,0
Bosque o matorral denso, cultivos con alto porcentaje de *mulch*	0,001
Sabana o pradera herbácea en buenas condiciones	0,01
Sabana o pradera herbácea sobrepastada	0,1
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento con laboreo convencional	0,20 – 0,55
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento sin laboreo convencional	0,50 – 0,90
Maíz, sorgo o mijo: bajo rendimiento con laboreo mínimo o no laboreo	0,02 – 0,10
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento, laboreo con chisel entre residuos	0,12 – 0,20
Maíz, sorgo o mijo: bajo rendimiento, laboreo con chisel entre residuos	0,30 – 0,45
Algodón	0,40 – 0,70
Pradera herbácea	0,01 – 0,025
Soja	0,20 – 0,50
Trigo	0,10 – 0,40
Arroz	0,10 – 0,20
Cacahuete	0,30 – 0,80
Palmera, cafeto, cocotero, con cobertura vegetal	0,10 – 0,30
Piña cultivada a nivel, con retirada de residuos	0,10 – 0,40
Piña cultivada a nivel, con residuos en superficie	0,01
Patata, surcos según la pendiente	0,20 – 0,50
Patata, surcos transversales a la pendiente	0,10 – 0,40
Caupí (judía de vaca)	0,30 – 0,40
Fresa con cobertura de malas hierbas	0,27
Granado con cobertura de malas hierbas	0,08
Granado limpio de malas hierbas	0,56
Tef (*Eragrostis tef*)	0,25
Caña de azúcar	0,13 – 0,40
Ñame	0,40 – 0,50
Guisante de Angola	0,60 – 0,70
Judía mungo	0,04
Pimiento	0,33
Cafeto: después de la primera recolección	0,05
Plátano: después de su establecimiento	0,05 – 0,10
Papaya	0,21

Wischmeier y Smith (1978); Roose (1977); Singh, Babu y Chandra (1981); El-Swaify, Dangler y Arstrong (1982); Hurni (1987); Hashim y Wong (1988).

(Fuente: Wishmeier y Smith (1978))

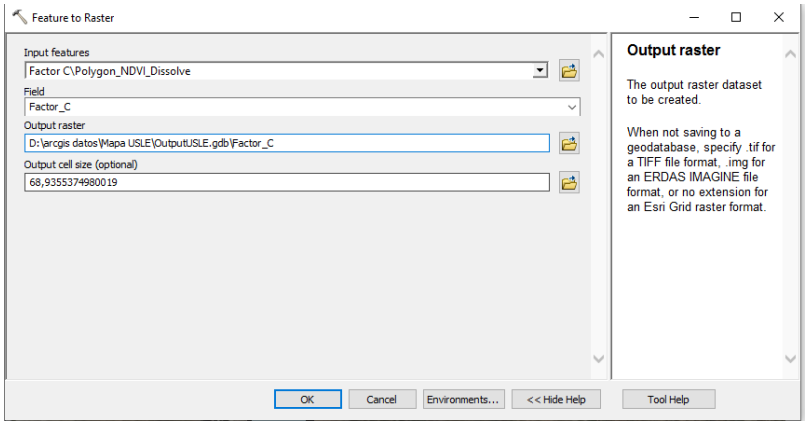
Ilustración 34 Asignación De Los Valores Aplicando La Tabla De Uso De Suelo



(Fuente: Elaboración Propia)

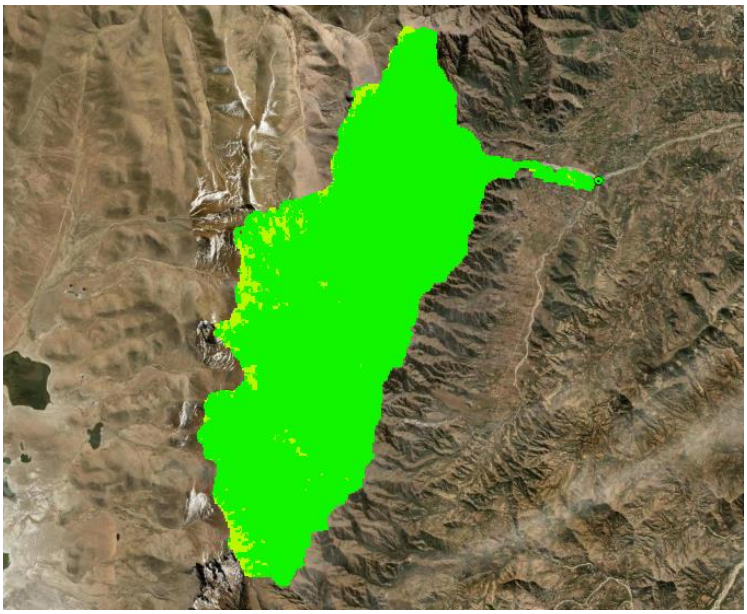
3.1.4.7 Herramienta Feature to Raster

Ilustración 35 Ventana de la herramienta Feature to Raster



(Fuente: Elaboración Propia)

Ilustración 36 Ráster del factor C



(Fuente: Elaboración Propia)

Mapa 12 Mapa Factor C

3.1.5 Factor P

El "Factor P" en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) no tiene un valor fijo de uno en todas las situaciones. Más bien, su valor puede variar dependiendo de las condiciones específicas de la cuenca y las prácticas de conservación del suelo implementadas en esa área en particular.

El factor P representa la efectividad de las prácticas de protección contra la erosión, como terrazas, barreras vegetales, cultivos de cobertura, entre otras, en la reducción de la erosión del suelo. Su valor se determina mediante observaciones empíricas y análisis de datos en el campo. Si las prácticas de conservación son altamente efectivas y reducen significativamente la erosión, el factor P puede ser menor que uno. Por otro lado, si estas prácticas tienen un impacto limitado en la reducción de la erosión, el factor P puede ser mayor que **uno**.

el valor del factor P varía según las condiciones locales y la efectividad de las prácticas de conservación del suelo en una cuenca específica. Por lo tanto, en este proyecto el

valor que se asumirá en será de uno debido a que no existen ninguna practica de protección contra la erosión.

3.1.6 Calculo de la Erosión A

EXPERSIÓN GENERAL DEL MODELO U.S.L.E.

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

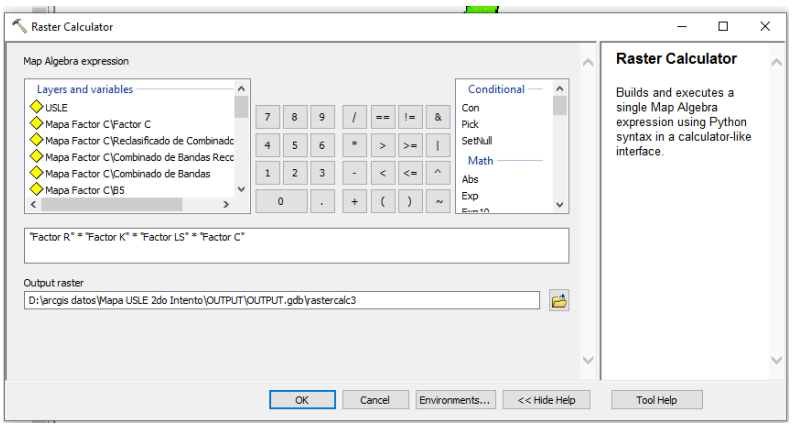
- A = Ton/Ha/Año Toneladas arrastradas por año
- R = Erosividad (Potencialidad de las lluvias), cual es el impacto de las lluvias sobre un suelo para que lo puedan erosionar.
- K = Erodabilidad Propiedades de los suelos (Contenido de Arena, Limos, Arcillas, Carbono Orgánico)
- LS = Factor Topográfico (L = Longitudes del Cauces, S = Pendientes)
- C = Vegetación sobre el suelo
- P = Practicas que realizar el hombre para disminuir la erosión

3.1.6.1 Herramienta Faster Calculator

En esta ventana aplicamos la siguiente formula:

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

Ilustración 37 Ventana De Raster Calculator Para El Cálculo De La Erosión



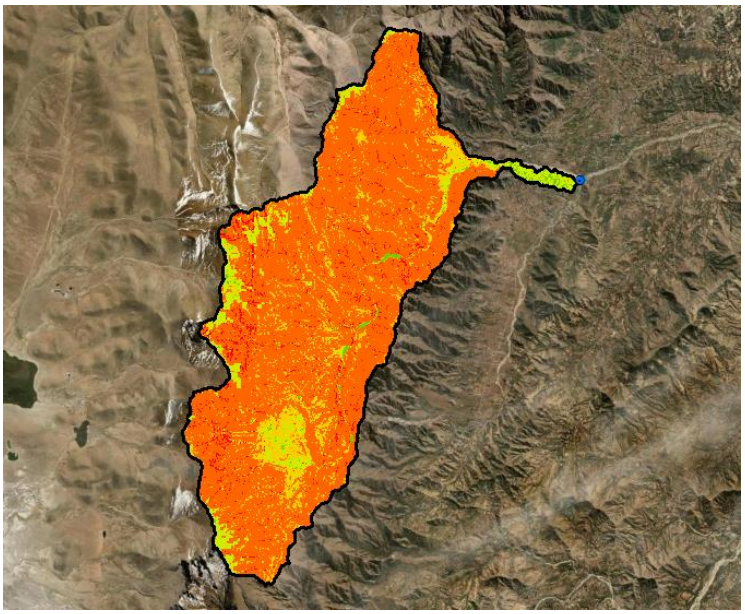
(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 7 Tabla de rangos de perdida de suelos

Nivel	Pérdida de suelo (Ton/ha/año)	Tipo de erosión
1	<0.5	Normal
2	0.5 - 5	Ligera
3	5 -15	Moderada
4	15 - 50	Severa
5	50 - 200	Muy severa
6	>200	Catastrófica

(Fuente: FAO 1980)

Ilustración 38 Ráster De Erosión



(Fuente: Elaboración Propia)

Ver *Mapa 13 Mapa de Erosión*

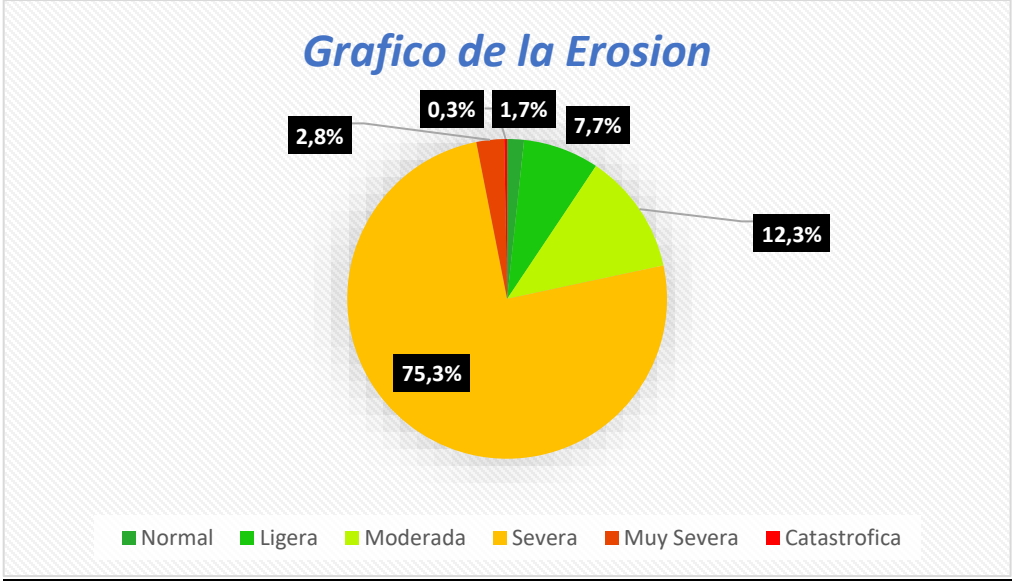
3.1.7 Análisis de Resultados

Tabla 8 Categoría De La Erosión Y Porcentaje De Área

Categoría de Erosión	Rango	Km²	% de Área
Normal	< 0,5	2,52	1,69
Ligera	0,5 - 5,0	11,45	7,69
Moderada	5,0 - 15,0	18,26	12,27
Severa	15,0 - 50,0	112,06	75,26
Muy Severa	50,0 - 200,0	4,17	2,80
Catastrófica	> 200,0	0,44	0,30
	Total	**148,89**	**100,00**

(Fuente: Elaboración Propia)

Gráfico 1 Porcentaje de Erosión



(Fuente: Elaboración Propia)

La *Tabla 8 Categoría De La Erosión Y Porcentaje De Área* y *Gráfico 1 Porcentaje de Erosión* representa la distribución de la erosión en la cuenca del río Sola, clasificada en diferentes categorías según la extensión de la erosión y la tasa de pérdida de suelo, expresada en toneladas por hectárea por año (ton/ha/año). La mayor parte del área de la cuenca, aproximadamente el 75.26%, se encuentra afectada por una erosión severa, que abarca un rango de 15.0 a 50.0 km² y tiene una tasa de pérdida de suelo media en toda la cuenca de 26.96 ton/ha/año. La moderada erosión, que se extiende de 5.0 a 15.0 km², comprende el 12.27% del área, mientras que las categorías de erosión ligera y normal cubren el 7.69% y el 1.69% del territorio respectivamente. En contraste, las áreas con erosión muy severa, abarcando un rango de 50.0 a 200.0 km², representan un 2.80% del territorio, y la erosión catastrófica, que comprende áreas mayores a 200.0 km², abarca solo el 0.30% del total. Esta distribución revela que la erosión severa es predominante en la cuenca del río Sola, subrayando la necesidad de estrategias de conservación y manejo del suelo en estas áreas de alta pérdida de suelo, que en promedio es de 26.96 ton/ha/año.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

1. El análisis del mapeo para identificar las áreas sensibles a la erosión hídrica en la cuenca del río Sola, se ha notado que las áreas coloreadas en tonos naranja (Erosión Muy Severa) y rojo (Erosión Catastrófica) abarcan 4.17 km², lo que constituye el 2.80%, y 0.44 km² representando el 0.30% del área total, respectivamente. Se destaca que, aunque estas áreas no son significativas, la proporción de tierra con erosión muy severa o catastrófica es relativamente baja en la cuenca del río Sola.
2. El uso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) para estimar la tasa de erosión efectiva en la cuenca del río Sola proporciono una visión general sobre la tasa de erosión media anual dando un valor de 26.96 Ton/ha/año entrando en el rango de una erosión severa.
3. La mayor parte de la cuenca está dentro del rango de erosión severa aproximadamente el 75.26 % de la cuenca, siendo un área de 112.06 km².
4. Tras el análisis, se determinó que los niveles de erosión en las proximidades de las comunidades de Calderas y Calderillas se encuentran dentro de los rangos de erosión Normal y Ligera, reflejando una menor actividad erosiva en estas áreas Ver Mapa 14 Mapa De La Erosión Y Las Comunidades.

4.2 Recomendaciones

1. Monitoreo continuo y medidas preventivas para establecer un sistema de monitoreo regular en las áreas identificadas con erosión severa o catastrófica para evaluar la evolución de estas zonas. Se deben aplicar medidas preventivas para controlar y mitigar la erosión, incluso en áreas con erosión moderada, a fin de evitar un empeoramiento de las condiciones.
2. Considerar la implementación de técnicas de conservación del suelo y prácticas agrícolas sostenibles en las zonas con tasas de erosión más altas. Esto incluye la adopción de prácticas como terrazas, siembra en curvas a nivel y forestación, entre otras medidas, para reducir la erosión y promover la retención de suelo.
3. Realizar una planificación adecuada del uso del suelo, especialmente en las áreas con altas tasas de erosión. Establecer regulaciones para evitar actividades

agrícolas y otros usos del suelo agresivos en zonas vulnerables, asegurando la conservación del suelo y la calidad del agua.

4. Sensibilización y Colaboración Comunitaria Fomentar la participación comunitaria y la concientización sobre prácticas responsables de uso del suelo y agua. Realizar campañas educativas y programas de capacitación para las comunidades locales en relación con la gestión sostenible de la tierra y los recursos hídricos.

BIBLIOGRAFIA

Bibliografía

Álvarez-Soto, L. B. (2008). Erosividad de las precipitaciones y erodabilidad de los suelos en el noroeste de Tenerife (Islas Canarias). Cuadernos de Investigación Geográfica, 34(2), 93-112.

Arnaez, J. L. (2015). Soil erosion and hydrology of the Mediterranean Badlands. In Landform dynamics and evolution in Romania, pp. 69-100.

Aznar, J. M. (2007). actores del clima y su influencia en la erosividad de las precipitaciones en la región del Biobío. Chile. Terra, 25(1), 7-18.

Bertoni, G. &. (2012). Erosión y conservación del suelo. Mundi-Prensa.

Cerdà, A. &. (2005). Influence of vegetation recovery on soil hydrology and erodibility following fire: An eleven-year investigation. International Journal of Wildland Fire, 4(4), 423-437.

García-Ruiz, J. M.-R.-H.-R. (2015). Erosión y conservación del suelo. Mundi-Prensa.

Giménez, R. I. (2017). Soil erosion processes in European vineyards: a qualitative comparison of rainfall simulation measurements in Germany, Spain and France. Catena.

Gómez, J. A. (2012). La erosión del suelo y sus efectos sobre el medio ambiente. Investigación y Ciencia, 420, 50-59.

Kanungo, D. P. (2011). A comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation in Darjeeling Himalayas. Engineering Geology, 105(3-4), 158-168.

Mitasova, H. M. (1996). Modeling spatially and temporally distributed phenomena: New methods and tools for GRASS GIS. International Journal of Geographical Information Systems, 10(5), 629-641.

Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(33), 13268-13272.

Morgan, R. P. (1995). he European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. Earth Surface Processes and Landforms, 20(6), 563-576.

Olaya, V. (2004). SAGA: An environmental GIS analysis system. Transactions in GIS, 7(1), 3-12.

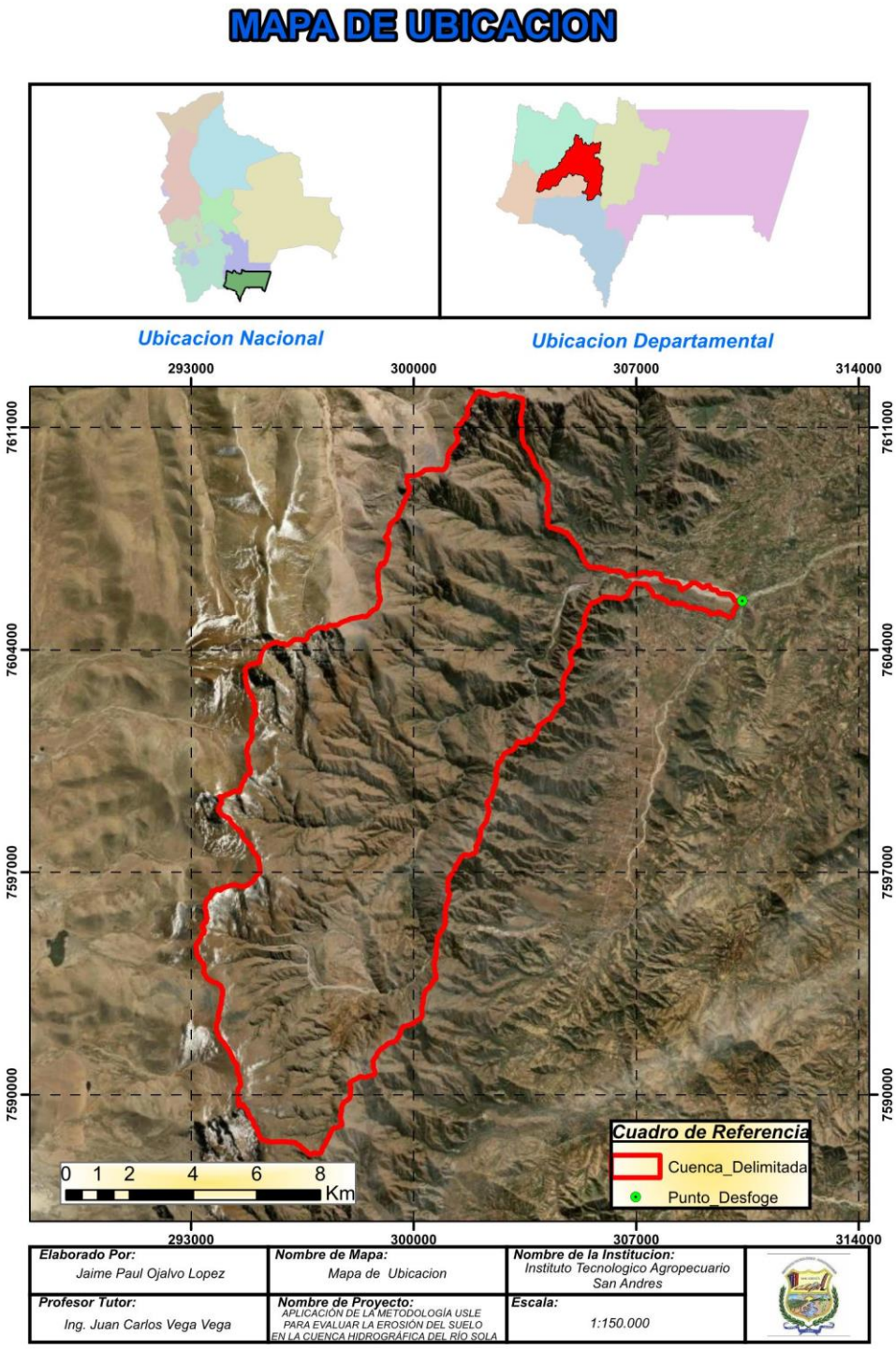
Poesen, J. B. (2018). Soil erosion as a driver of sediment-related impacts. Land Degradation & Development. Land Degradation & Development, 29(8), 2324-2337.

Renard, K. G. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). US Department of Agriculture (USDA). Agriculture Research Service.

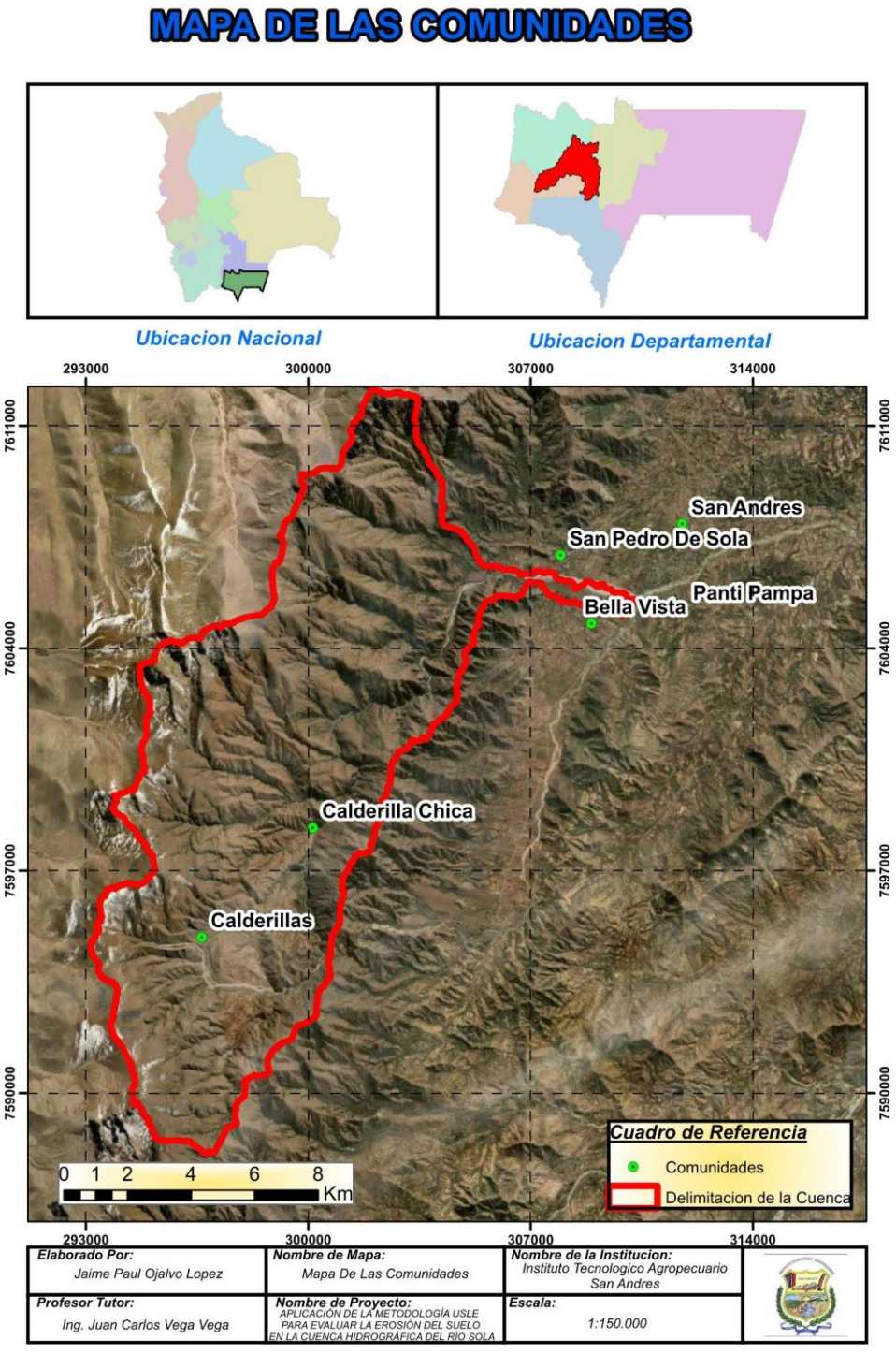
Zambrano-Bigiarini, M. C. (2015). Assessment of the RUSLE model in the Paute watershed (Southern Ecuador): suggestions for the calibration of tropical Andean environments. Hydrological Processes, 29(17), 3774-3790.

ANEXOS

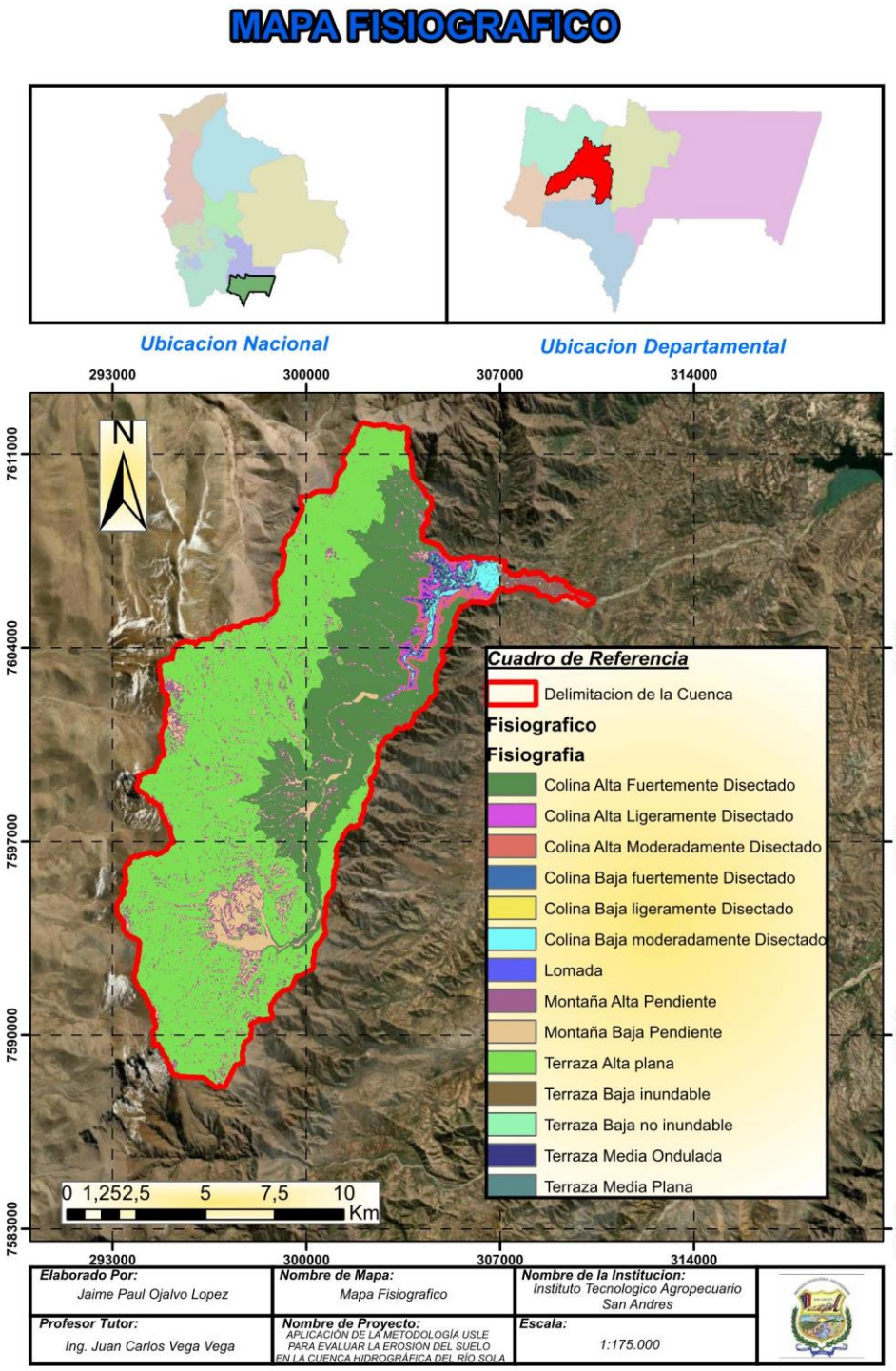
Mapa 1 Mapa de Ubicación



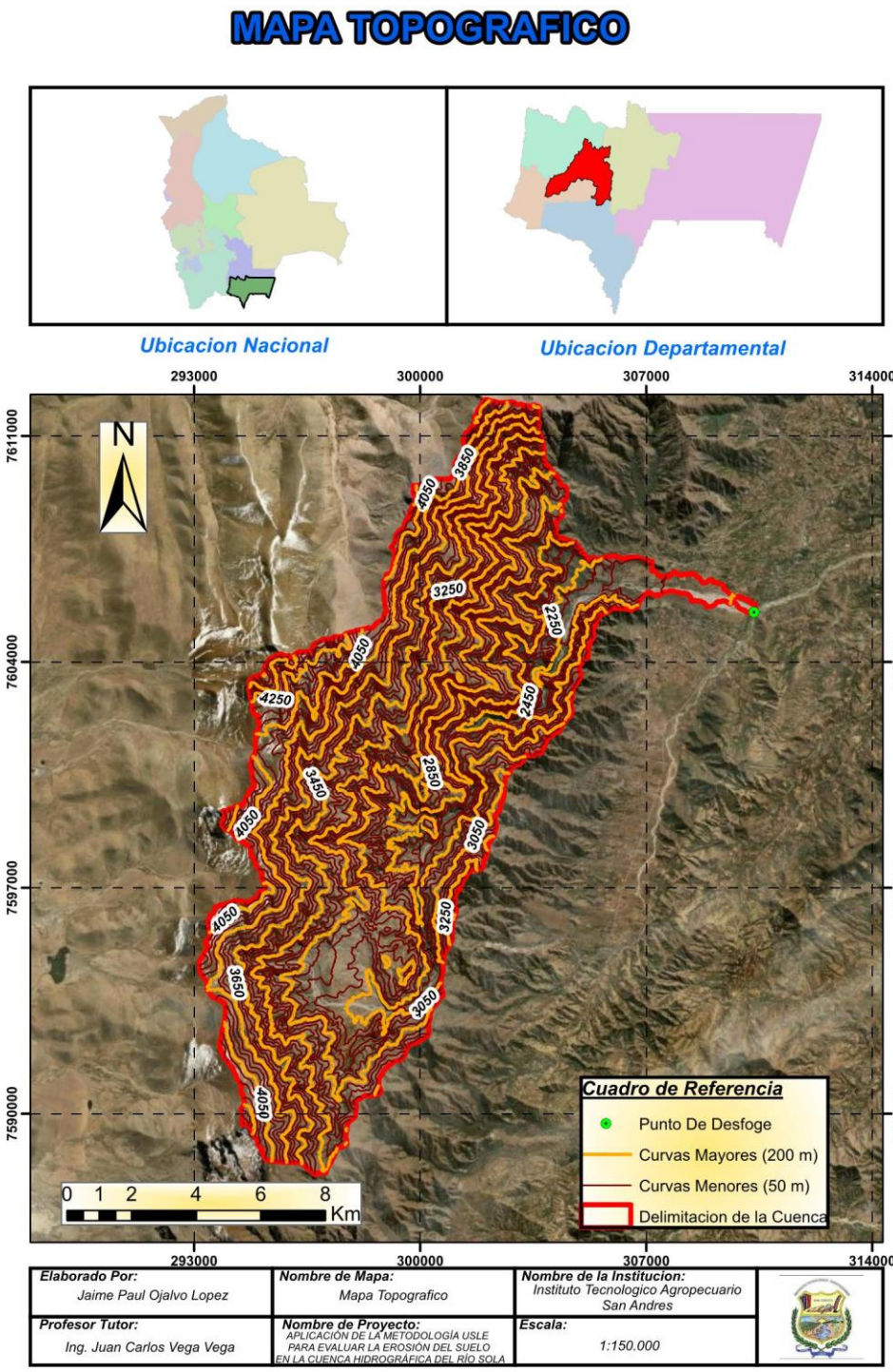
Mapa 2 Mapa de las Comunidades



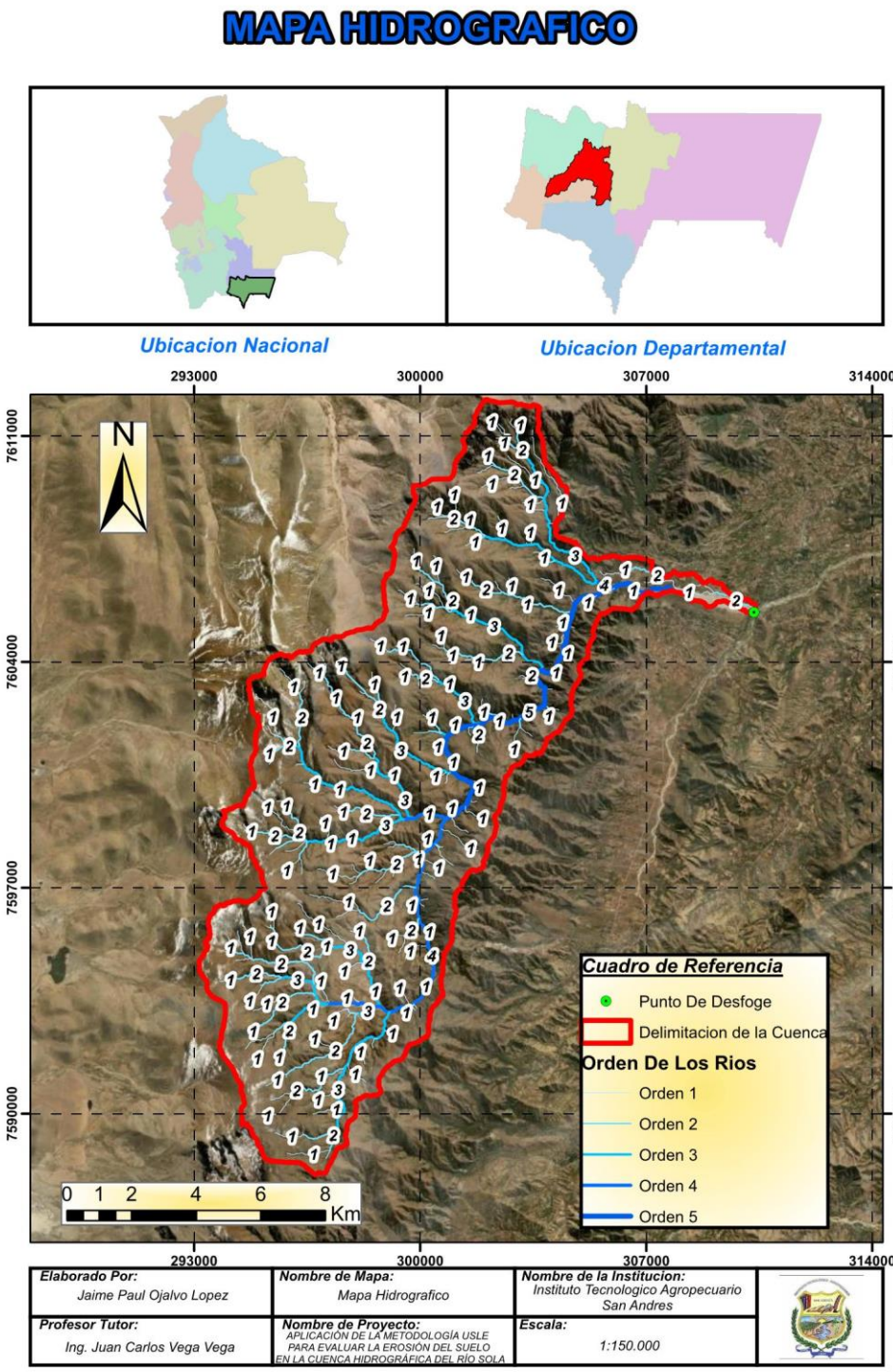
Mapa 3 Mapa Fisiográfico



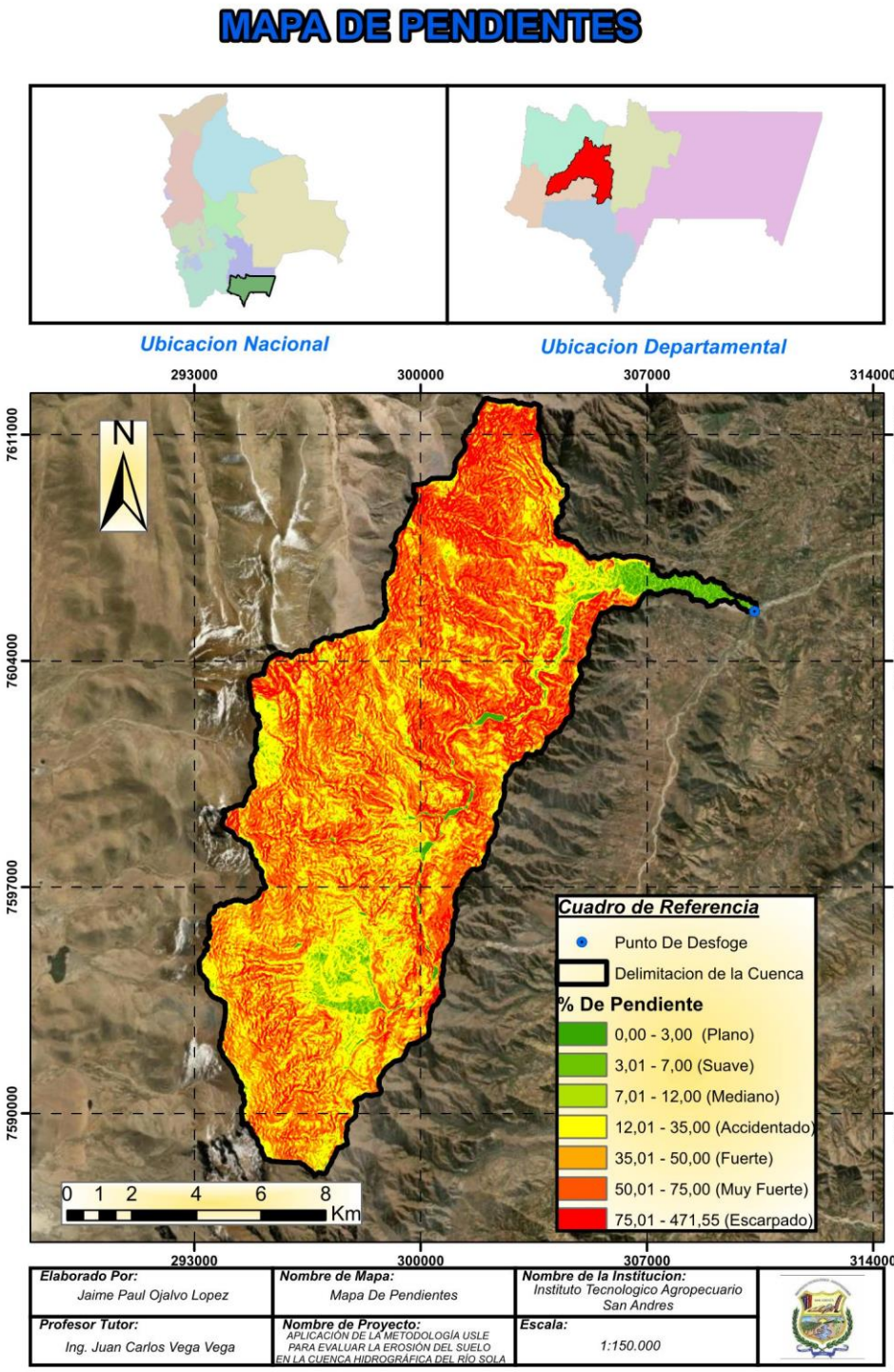
Mapa 4 Mapa Topográfico



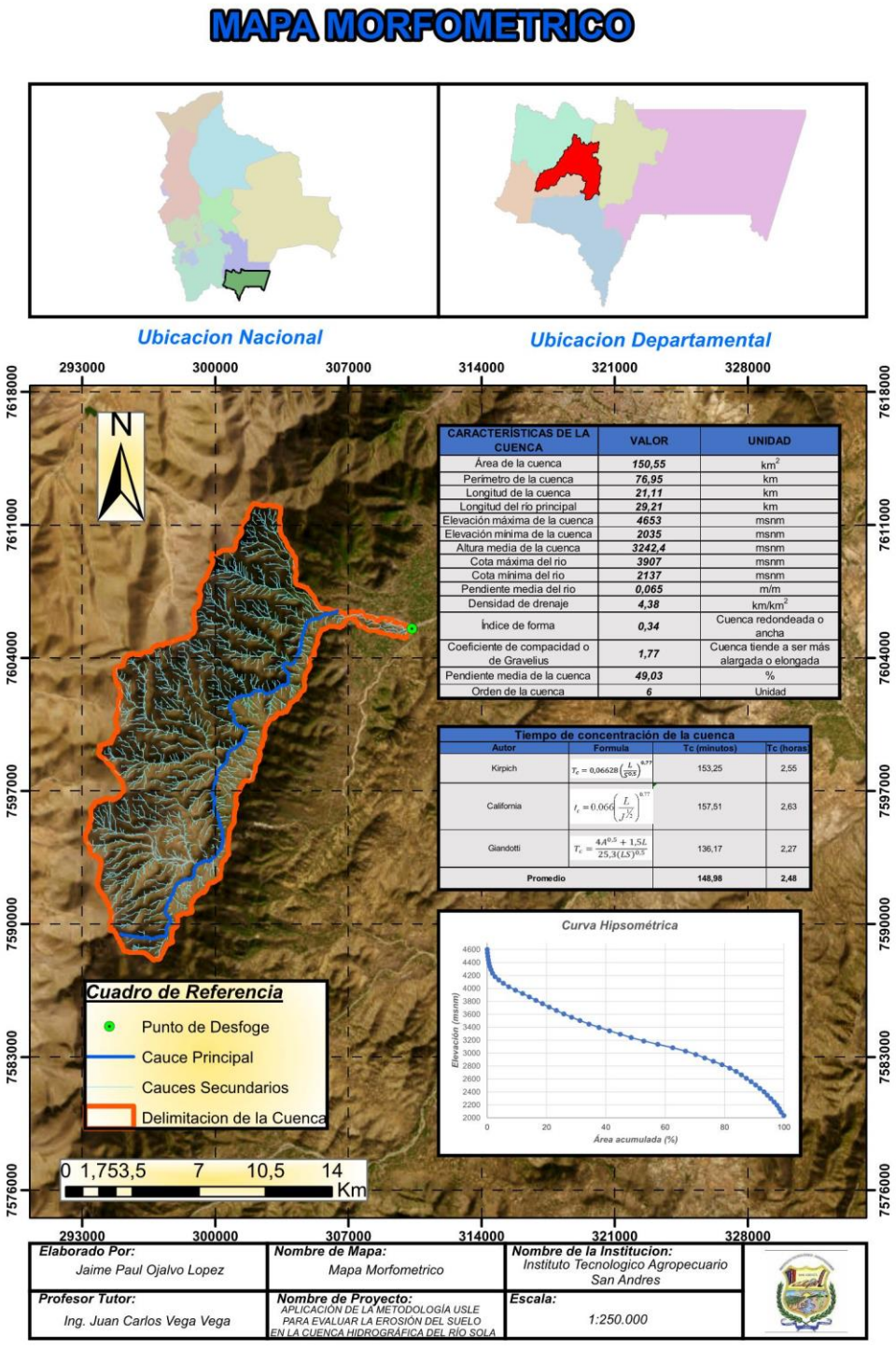
Mapa 5 Mapa Hidrográfico



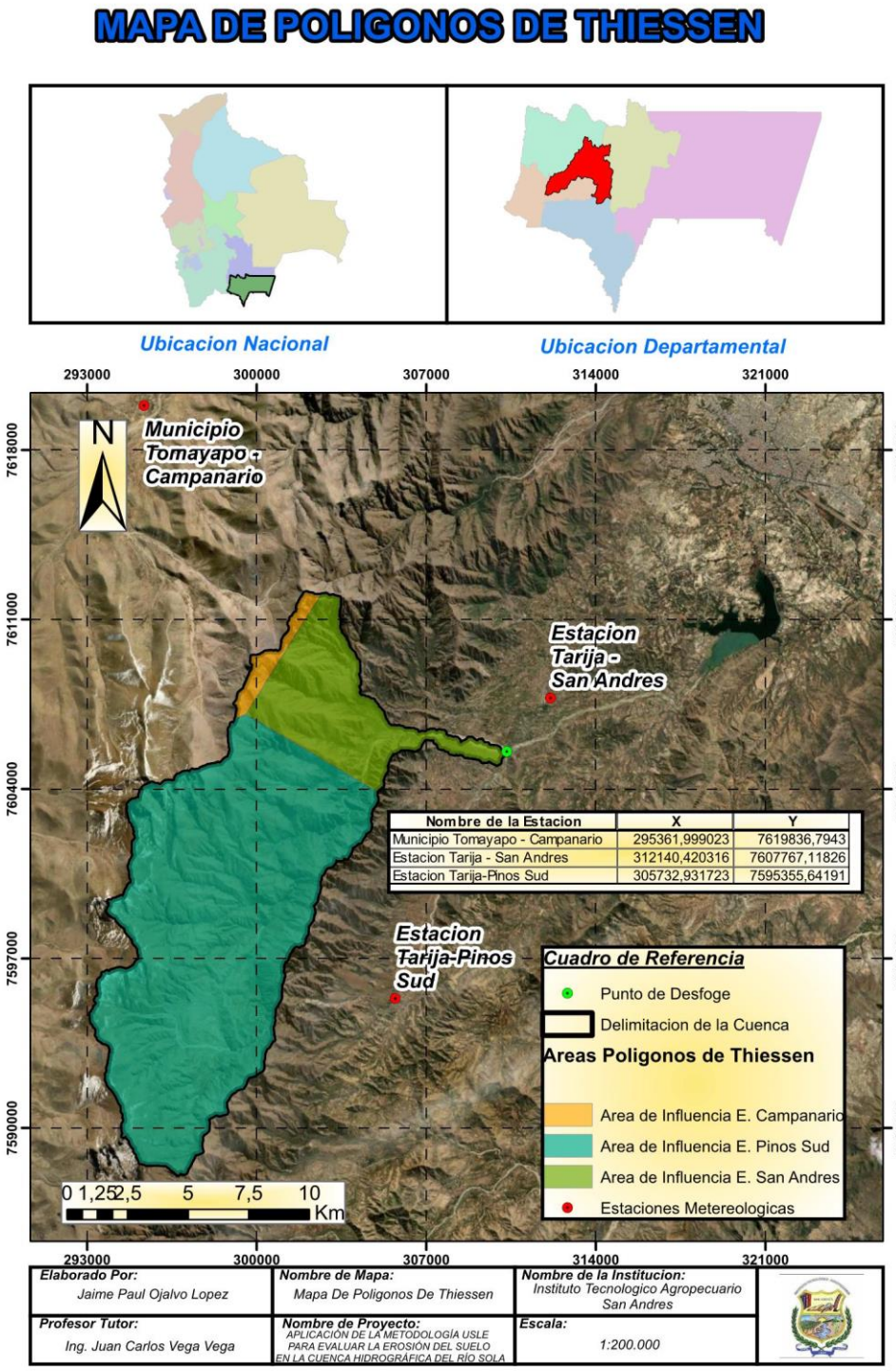
Mapa 6 Mapa de Pendientes



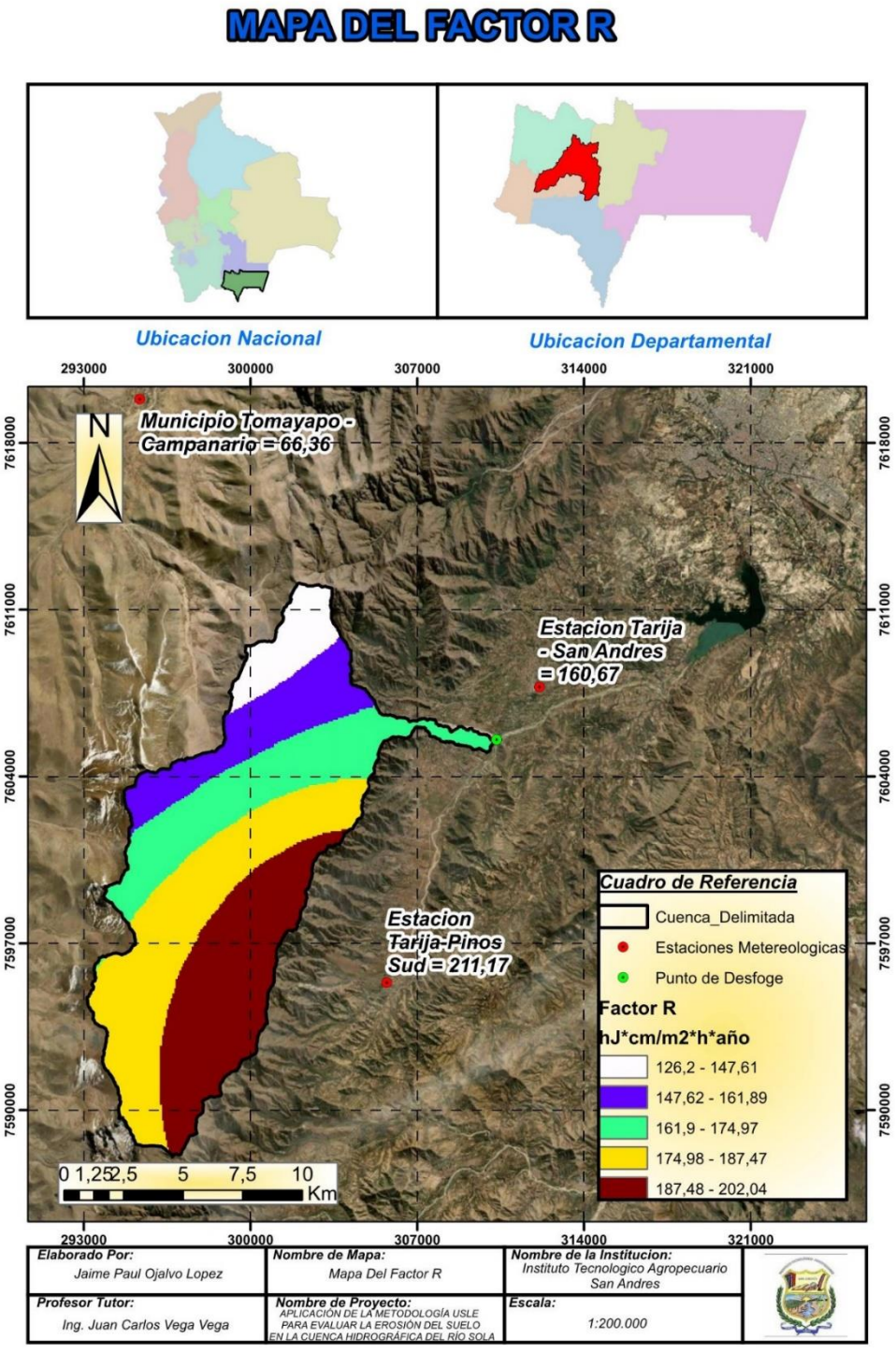
Mapa 7 Mapa Morfométrico



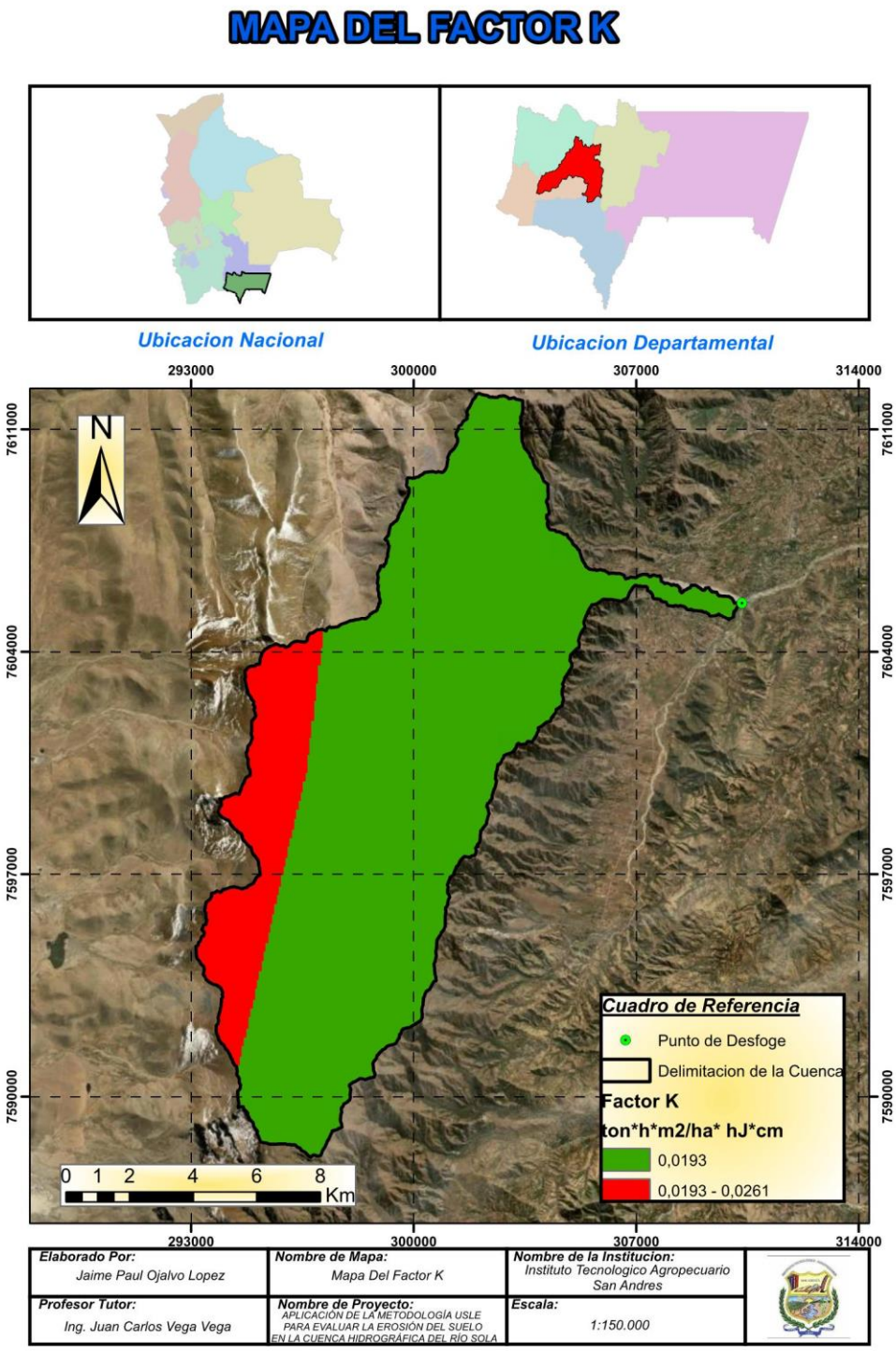
Mapa 8 Mapa De Polígonos De Thiessen



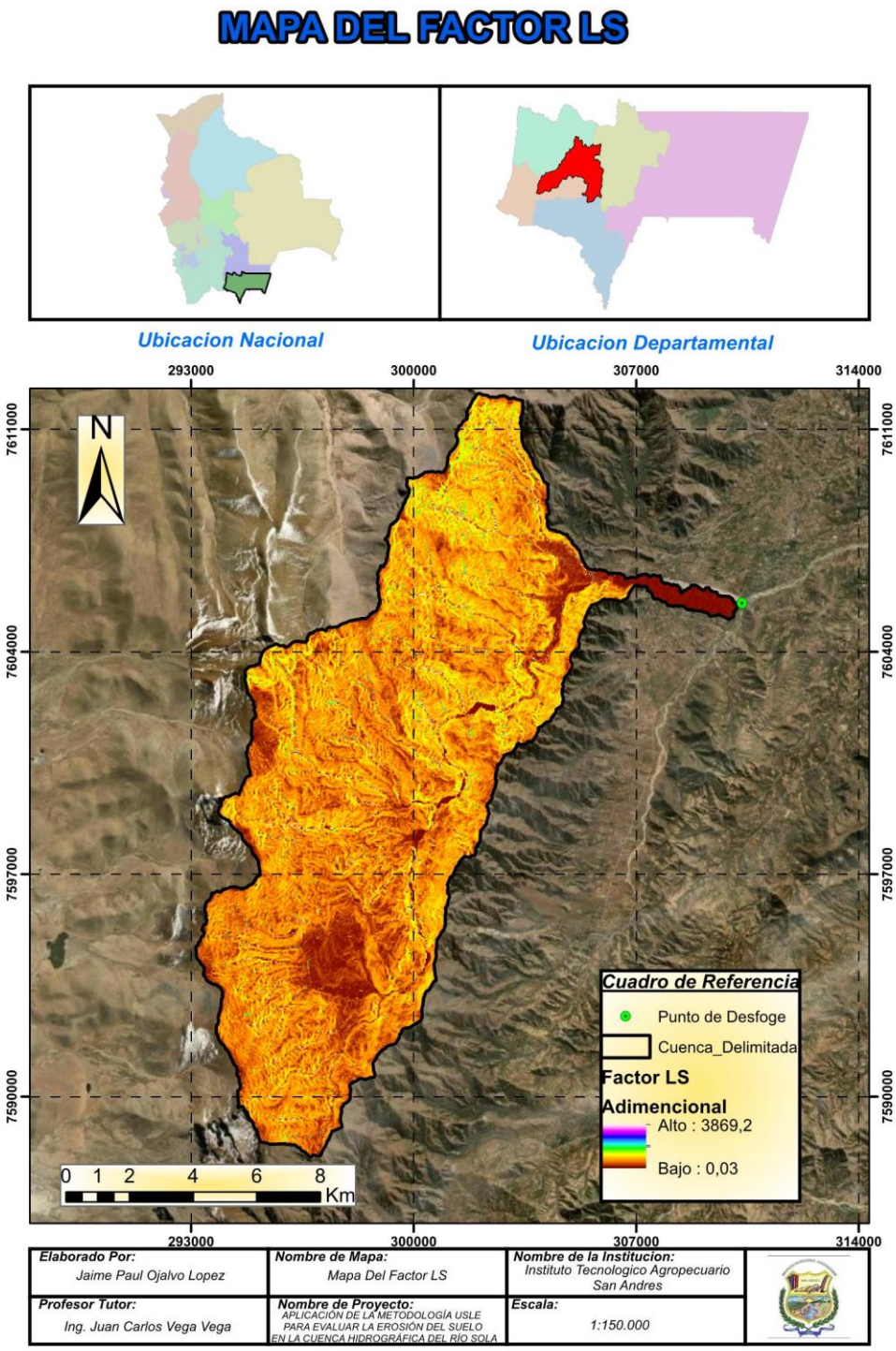
Mapa 9 Mapa De Factor R



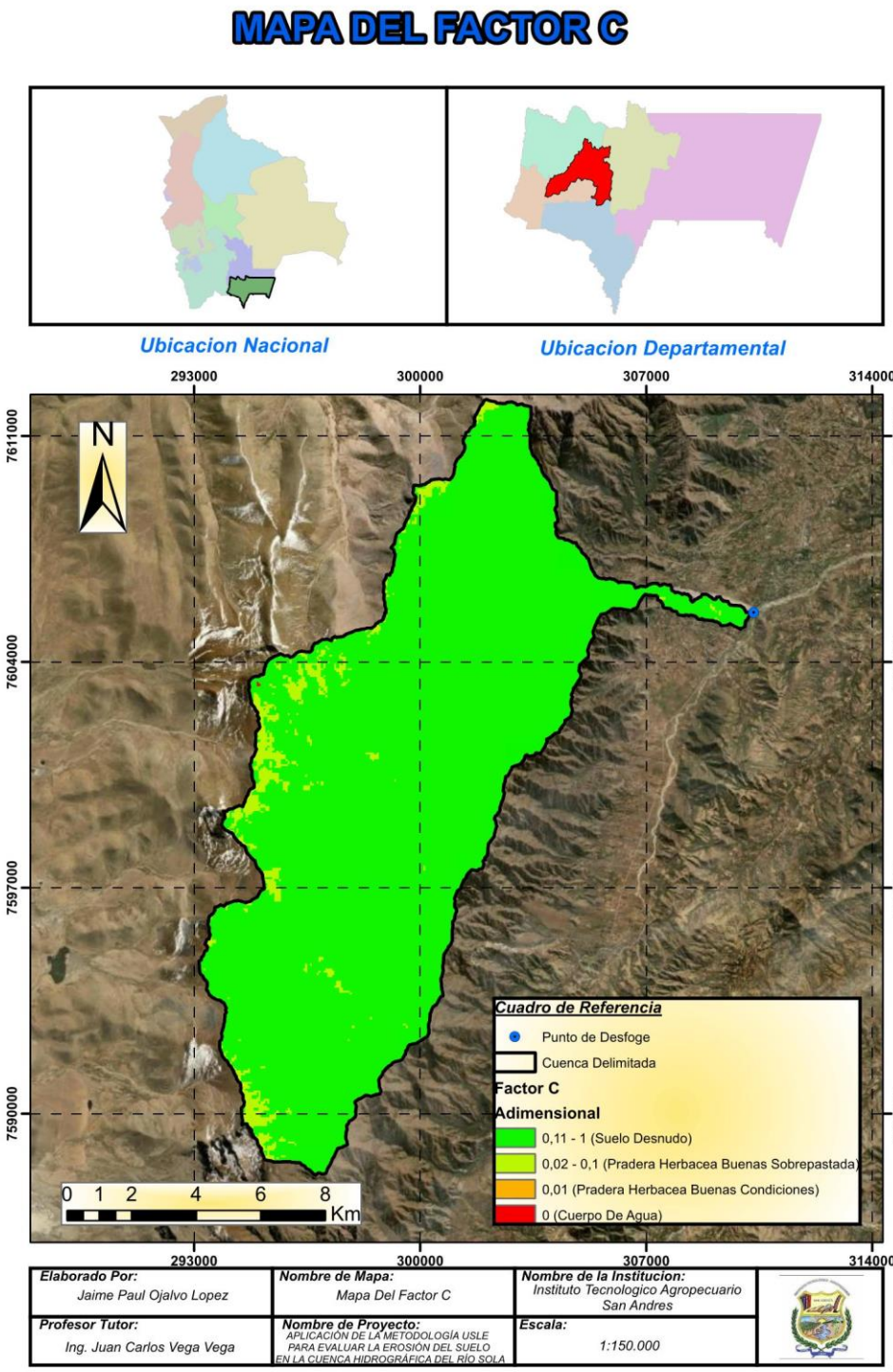
Mapa 10 Mapa De Factor K



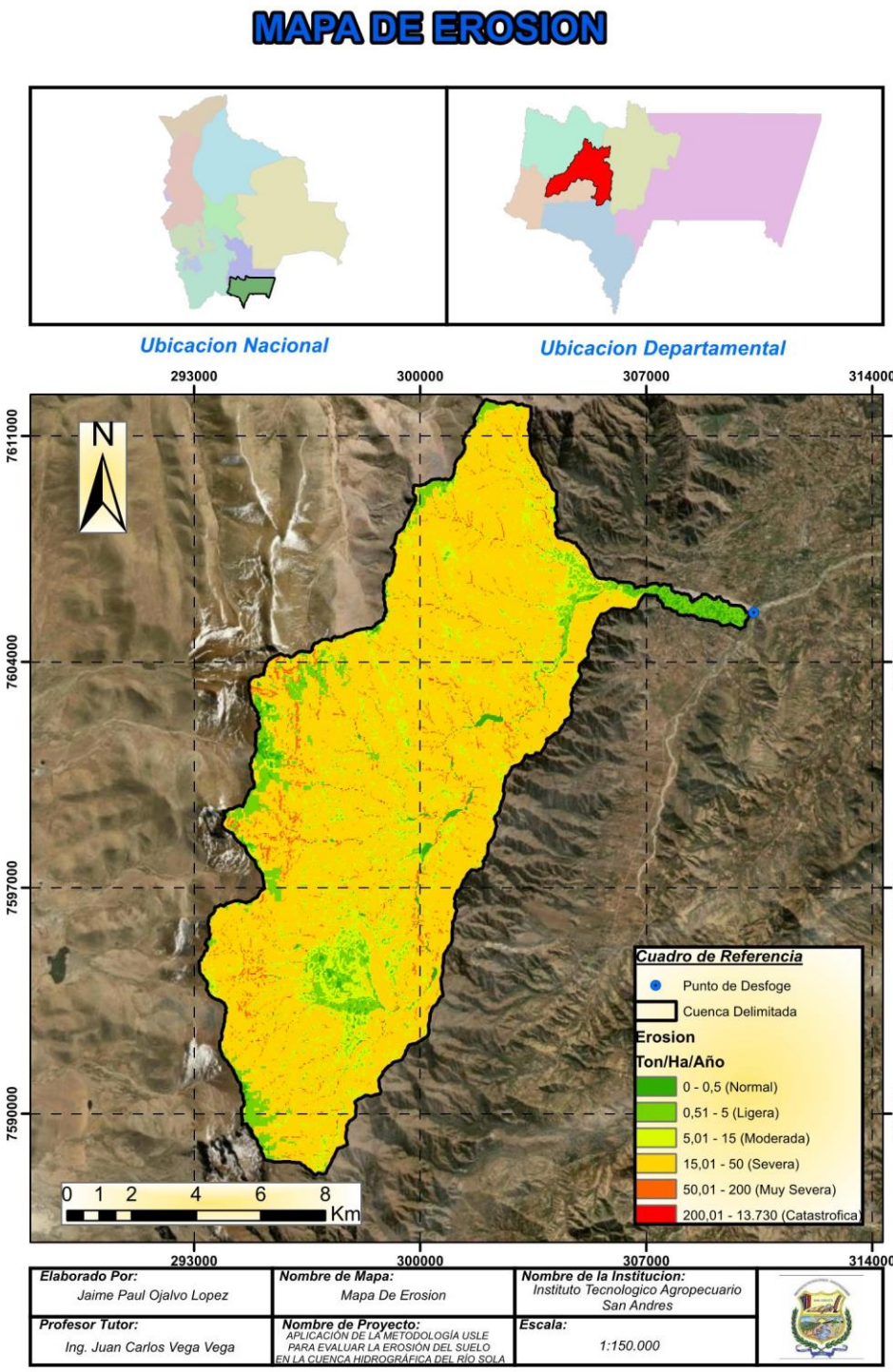
Mapa 11 Mapa De Factor LS



Mapa 12 Mapa Factor C



Mapa 13 Mapa de Erosión



Mapa 14 Mapa De La Erosión Y Las Comunidades

