



UNL

Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

**Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales
no Renovables**

Carrera de Ingeniería en Geología Ambiental y Ordenamiento Territorial

**Teledetección aplicada a la geomorfología fluvial y análisis
multitemporal del río Zamora, perteneciente a la subcuenca
hidrográfica Zamora, cantón Centinela del Cóndor-El Pangui,
provincia de Zamora Chinchipe**

Trabajo de Titulación, previo a la
obtención del título de Ingeniero en
Geología Ambiental y
Ordenamiento Territorial.

AUTOR:

Víctor Mauricio Arévalo Pineda

DIRECTOR:

Ing. Walter Simón Tambo Encalada, Mg.Sc.

Loja-Ecuador

2024

Certificación

Loja, 21 de febrero de 2024

Ingeniero. Walter Simón Tambo Encalada, Mg. Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Teledetección aplicada a la geomorfología fluvial y análisis multitemporal del río Zamora, perteneciente a la subcuenca hidrográfica Zamora, cantón Centinela del Cóndor-El Pangui, provincia de Zamora Chinchipe**, previo a la obtención del título de **Ingeniero en Geología Ambiental y Ordenamiento Territorial**, de autoría del estudiante **Víctor Mauricio Arévalo Pineda**, con **cédula de identidad N° 1105639403** una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

Ingeniero. Walter Simón Tambo Encalada, Mg. Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.

Autoría

Yo, **Víctor Mauricio Arévalo Pineda**, declaro ser autor del presente trabajo de titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos o acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi trabajo de titulación en el Repositorio Digital Institucional - Biblioteca Virtual.

Firma:  _____

Cédula: 1105639403

Fecha: 21 de febrero del 2024

Correo electrónico: victor.m.arevalo@unl.edu.ec

Teléfono: 0969872725

Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Titulación.

Yo, **Víctor Mauricio Arévalo Pineda**, declaro ser autor del trabajo de titulación denominado: **Teledetección aplicada a la geomorfología fluvial y análisis multitemporal del río Zamora, perteneciente a la subcuenca hidrográfica Zamora, cantón Centinela del Cóndor-El Pangui, provincia de Zamora Chinchipe**, como requisito para optar el título de Ingeniero en Geología Ambiental y Ordenamiento Territorial; autorizo al sistema bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja, para que con fines académicos muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior, con los cuales tenga convenio la Universidad. La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del trabajo de titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los veintiún días del mes de febrero del dos mil veinticuatro.



Firma: _____

Autor: Víctor Mauricio Arévalo Pineda

Cédula: 1105639403

Dirección: Loja, Barrio Sauces Norte

Correo electrónico: victor.m.arevalo@unl.edu.ec

Celular: 0969872725

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del trabajo de titulación: Ing. Walter Simón Tambo Encalada, Mg.Sc.

Dedicatoria

Dedico el presente trabajo a mis padres Rosa y Víctor, a mi novia Daniela, hermanos, familiares cercanos y amigos, Rommel, Carlos, Aleksander, Edison y Cristian, todos forman parte de este trabajo, directa o indirectamente ya que supieron contribuir con su apoyo y motivación en todo momento.

Víctor Mauricio Arévalo Pineda

Agradecimiento

En primer lugar a Dios, que ha sabido darme la fuerza para enfrentar cada uno de los obstáculos que se me han presentado, a mi padre y de forma muy especial a mi madre, que ha sido la fuerza y la luz que me ha guiado hasta aquí, mi motivación y mis ganas de ser alguien en la vida, eres ese consejo diario y esa experiencia envidiable que guía mi camino; a mi novia por su compañía y apoyo; a mis hermanos apoyo incondicional; a mi familia en general por su cariño y palabras de aliento, a mis amigos por sus palabras en momentos complicados. Finalmente, a mis maestros por la sabiduría y consejos compartidos, al Ing. Walter Simón Tambo Encalada, por ser el principal apoyo para este trabajo, gracias por el respaldo y conocimientos.

Víctor Mauricio Arévalo Pineda

Índice de Contenido

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
1. Título	1
2. Resumen	2
Abstract	3
3. Introducción	4
4. Marco teórico	7
4.1. Teledetección	7
4.1.1. Componentes de un sistema de teledetección	7
4.1.2. Energía electromagnética.....	8
4.1.3. Espectro electromagnético	9
4.1.4. Sensores remotos.	10
4.1.5. Imágenes satelitales.	13
4.1.6. Análisis visual de imágenes satelitales	15
4.1.7. Combinación de bandas.	16
4.1.8. Métodos para la extracción de datos.....	17
4.1.9. Teledetección multitemporal.	18
4.1.10. Sistemas de información geográfica (SIG).	18
4.2. Geomorfología	20
4.2.1. Geomorfología fluvial.....	20
4.2.2. Morfometría Fluvial.....	21
4.2.3. Tipos de canales fluviales	22
4.2.4. Canales fluviales y su estabilidad	23
4.2.5. Erosión fluvial.....	23
4.2.6. Cuenca hidrográfica	23
4.2.7. Parámetros de una cuenca hidrográfica	24
4.2.8. Redes de drenaje	29
4.2.9. Tipos de ríos.....	30
4.2.10. Parámetros de ríos	31

5. Metodología.....	32
5.1. Descripción del área de estudio.....	32
5.1.1. Ubicación.....	32
5.1.2. Clima.....	32
5.1.3. Hidrografía.....	34
5.1.4. Geología regional.....	36
5.2. Materiales.....	38
5.2.1. Materiales de geoprocesamiento.....	38
5.2.2. Materiales de campo.....	38
5.2.3. Materiales de oficina.....	38
5.3. Métodos.....	39
5.3.1. Metodología para el primero objetivo.....	39
5.3.2. Metodología para el segundo objetivo.....	46
5.3.3. Metodología para el tercer objetivo.....	55
6. Resultados.....	57
6.1. Resultados para el primer objetivo.....	57
6.1.1. Parámetros asociados a la cuenca hidrográfica.....	57
6.2. Resultados para el segundo objetivo.....	61
6.2.1. Zonas con variaciones morfológicos en el río Zamora (1985-2022).....	61
6.2.2. Parámetros morfométricos del río Zamora.....	61
6.2.3. Análisis multitemporal.....	63
6.2.4. Factores asociados a los cambios morfológicos del río Zamora.....	71
6.3. Resultados para el tercer objetivo.....	75
6.3.1. Zona 1.....	75
6.3.2. Zona 2.....	76
6.3.3. Zona 3.....	77
6.3.4. Zona 4.....	78
7. Discusión.....	79
8. Conclusiones.....	81
9. Recomendaciones.....	82
10. Bibliografía.....	83
11. Anexos.....	86

Índice de tablas:

Tabla 1.	Características de bandas espectrales Landsat 4.....	12
Tabla 2.	Características de bandas espectrales Landsat 5.....	12
Tabla 3.	Características de bandas espectrales Landsat 8.....	12
Tabla 4.	Factores que controlan la dinámica fluvial.....	21
Tabla 5.	Clasificación de cuencas hidrográficas según su rango.....	24
Tabla 6.	Características del relieve de acuerdo a su pendiente.....	25
Tabla 7.	Clasificación según su número de flujo.....	25
Tabla 8.	Características del territorio según su longitud de flujo.....	26
Tabla 9.	Características de una cuenca según su relación de bifurcación.....	26
Tabla 10.	Factores según la vecindad de drenaje de una cuenca.....	27
Tabla 11.	Categoría de drenaje.....	27
Tabla 12.	Relación de alargamiento de una cuenca.....	28
Tabla 13.	Clasificación de una cuenca hidrográfica según su factor de forma.....	29
Tabla 14.	Clasificación de los ríos en base a su índice de sinuosidad.....	31
Tabla 15.	Coordenadas y longitud del área de estudio.....	32
Tabla 16.	Red hidrográfica de la zona de estudio.....	35
Tabla 17.	Parámetros morfométricos.....	40
Tabla 18.	Valores de ocurrencias para el cálculo de pendiente media.....	42
Tabla 19.	Número de flujos de cada orden.....	44
Tabla 20.	Longitud de flujo de cada orden.....	44
Tabla 21.	Parámetros para la corrección radiométrica.....	48
Tabla 22.	Número de flujo totales de cada orden.....	57
Tabla 23.	Longitud total de flujos de cada orden.....	58
Tabla 24.	Relación de longitud de flujo de subcuenca.....	59
Tabla 25.	Valores de relación de bifurcación.....	59
Tabla 26.	Parámetros morfométricos subcuenca Zamora.....	60
Tabla 27.	Temperatura y precipitación media mensual la zona de estudio.....	86
Tabla 28.	Datos radio de curvatura Zona 1 (Rc).....	86
Tabla 29.	Datos radio de curvatura Zona 2 (Rc).....	86
Tabla 30.	Datos radio de curvatura Zona 3 (Rc).....	86
Tabla 31.	Datos radio de curvatura Zona 4 (Rc).....	87
Tabla 32.	Datos radio de curvatura media de cada zona (Rc).....	87

Tabla 33.	Longitud del canal de cada zona	87
Tabla 34.	Longitud del meandro	87
Tabla 35.	Sinuosidad de las zonas de estudio	87
Tabla 36.	Puntos de control.....	88

Índice de figuras:

Figura 1.	Componentes básicos de un sistema de teledetección.	8
Figura 2.	Radiación y longitudes de onda	9
Figura 3.	Rangos de resolución espacial	10
Figura 4.	Características de bandas espectrales Sentinel 2	13
Figura 5.	Niveles digitales y energía reflejada	14
Figura 6.	Imagen de las bandas 7, 6, 4 del satélite Landsat 8	15
Figura 7.	Modelos ráster.....	19
Figura 8.	Modelos digitales del terreno.....	19
Figura 9.	Modelos vectoriales para la representación de datos	20
Figura 10.	Clasificación de canales fluviales	22
Figura 11.	Variación de la curva hipsométrica en función de la edad del río	29
Figura 12.	Clasificación morfológica de las redes de drenaje.....	30
Figura 13.	Estimación del Radio de curvatura en un río	31
Figura 14.	Ubicación del área de estudio	32
Figura 15.	Mapa de temperaturas medial de la zona de estudio.....	33
Figura 16.	Mapa de precipitación media de la zona de estudio	34
Figura 17.	Mapa hidrográfico de la zona de estudio	35
Figura 18.	Mapa Geológico Regional de la subcuenca Zamora.....	37
Figura 20.	Interpolación entre el TIN y el polígono de la subcuenca	41
Figura 21.	Longitud de flujo más largo dentro de la cuenca.....	43
Figura 23.	Imágenes satelitales del periodo de estudio	47
Figura 24.	Parámetros seleccionados para la corrección atmosférica	49
Figura 25.	Imagen sin correcciones, corrección radiométrica, corrección atmosférica.	50
Figura 26.	Imagen satelital con su aplicación del NDWI, las tonalidades oscuras poseen mayor índice de humedad y tonalidades claras poseen baja o nula humedad.	51
Figura 27.	Clasificación por el método no supervisado, como resultado tenemos dos clases (cuerpos con elevada humedad y cuerpos con baja o nula humedad)	52

Figura 28.	Río Zamora antes y después de las correcciones manuales.....	53
Figura 29.	En la imagen A se observa una zona.....	53
Figura 30.	Radio de curvatura de un tramo fluvial.....	54
Figura 31.	Largo del canal y longitud de onda del meandro.....	55
Figura 32.	Parámetros para la descarga de imagen.....	56
Figura 33.	Orden de flujos del área de estudio.....	58
Figura 34.	Zonas que presenta variación morfológica, 1985 -2022.....	61
Figura 35.	Radios de curvatura promedio de las zonas de estudio.....	62
Figura 36.	Radios de curvatura promedio de las zonas de estudio.....	62
Figura 37.	Mosaico de imágenes para análisis multitemporal Zona 1.....	63
Figura 38.	Radios de curvatura e índice de sinuosidad de la zona 1.....	64
Figura 39.	Mosaico de imágenes para análisis multitemporal Zona 2.....	65
Figura 40.	Radios de curvatura e índice de sinuosidad de la zona 2.....	66
Figura 41.	Mosaico de imágenes para análisis multitemporal Zona 3.....	67
Figura 42.	Radios de curvatura e índice de sinuosidad de la zona 3.....	68
Figura 43.	Mosaico de imágenes para análisis multitemporal Zona 4.....	69
Figura 44.	Radios de curvatura e índice de sinuosidad de la zona 4.....	70
Figura 45.	Materiales (A. Cantos de varios tamaños, gravillas y arena. B. Arenas finas)..	71
Figura 46.	Formas de relieve y material presente en la zona de estudio.	73
Figura 47.	Zonas de extracción de materiales pétreos zona 1.....	74
Figura 48.	Representación espacial de las variaciones morfológicas zona 1.....	75
Figura 49.	Representación espacial de las variaciones morfológicas zona 2.....	76
Figura 50.	Representación espacial de las variaciones morfológicas zona 3.....	77
Figura 51.	Representación espacial de las variaciones morfológicas zona 4.....	78

Índice de anexos:

Anexo 1.	Datos de la zona de estudio.....	86
Anexo 2.	Datos de radio de curvatura e índice de sinuosidad.....	86
Anexo 3.	Puntos de control.....	88
Anexo 4.	Puntos de control en mapa.....	88
Anexo 5.	Fichas de campo.....	89
Anexo 6.	Tablas de valores.....	90
Anexo 7.	Certificación de traducción del resumen.....	91

1. Título

Teledetección aplicada a la geomorfología fluvial y análisis multitemporal del río Zamora, perteneciente a la subcuenca hidrográfica Zamora, cantón Centinela del Cóndor-El Pangui, provincia de Zamora Chinchipe

2. Resumen

El estudio de la geomorfología fluvial y análisis multitemporal del río Zamora, perteneciente a la subcuenca hidrográfica Zamora, se da por la necesidad de identificar zonas que presenten una constante variación morfológica (desplazamiento de meandros, ensanchamiento del canal, angostamiento del canal y los factores que intervienen para la ocurrencia de estos cambios) para que sirva como una herramienta inicial en la planificación territorial y construcción de obras a riberas del río.

Este proyecto comprende en la caracterización cualitativa y cuantitativa de la cuenca con base en sus rasgos topográficos y la identificación, categorización, análisis y representación espacial de zonas que presenten variaciones morfológicas en el río Zamora, a partir de imágenes satelitales, aplicando el “Índice de agua de diferencia normalizada” (NDWI) McFeeters (1996) y el método de la Clasificación Automática ISODATA en el Software ENVI 5.3; como resultado, se identificó 4 zonas con importantes variaciones morfológicas y se describió las características topográficas de la cuenca que inciden directamente en la dinámica natural del río. Adicional a esto se complementó con visitas de campo para la identificación de factores (características intrínsecas de la llanura aluvial, geomorfología, geología y factores hidrológicos y climáticos) que inciden en la dinámica del río.

Palabras clave: geomorfología fluvial, análisis multitemporal, meandros, representación espacial, clasificación automática, llanura aluvial, índice de agua, desplazamiento de meandros, ensanchamiento, angostamiento

Abstract

The study of the fluvial geomorphology and multitemporal analysis of the Zamora river, belonging to the Zamora hydrographic sub-basin, arises from the need to identify areas that present a constant morphological variation (meander displacement, channel widening, channel narrowing and the factors that intervene for the occurrence of these changes) to serve as an initial tool in territorial planning and construction of works on the banks of the river.

This project includes the qualitative and quantitative characterization of the basin based on its topographic features and the identification, categorization, analysis and spatial representation of areas that present morphological variations in the Zamora River, based on satellite images, applying the "Normalized Difference Water Index" (NDWI) McFeeters (1996) and the ISODATA Automatic Classification method in ENVI 5.3 Software; As a result, 4 zones with important morphological variations were identified and the topographic characteristics of the basin that directly affect the natural dynamics of the river were described. In addition to this, it was complemented with field visits to identify factors (intrinsic characteristics of the alluvial plain, geomorphology, geology, and hydrological and climatic factors) that affect the dynamics of the river.

Keywords: fluvial geomorphology, multitemporal analysis, meanders, spatial representation, automatic classification, floodplain, water index, meander displacement, widening, narrowing

3. Introducción

Según Richards (1995), la geomorfología fluvial es la explicación de las relaciones entre procesos físicos del flujo en canales de lecho móvil, la mecánica de transporte de sedimentos, forzado por el flujo y formas de las canales aluviales creadas por el transporte de sedimentos. Este subcampo suele traslaparse con el campo de la hidrografía, estudia la estructura y forma de los ríos, incluyendo la configuración transversal y longitudinal del cauce, la geometría de las secciones transversales y la forma del fondo, analizando los procesos dinámicos que llevan a la transformación a lo largo del tiempo de los principales parámetros característicos de los cursos de agua.

Según Acosta (2016), la geofoma inicialmente se debió a la actividad volcánica y a los movimientos tectónicos, al formarse los líquidos que dieron origen a la vida han sido de gran influencia en la transformación de la superficie terrestre. El ciclo hidrológico, después de evaporar y precipitar las aguas, ha producido cambios en la corteza terrestre que son más o menos profundos dependiendo de las capas de suelos y roca por la que transitan de las partes altas hacia el mar, estos cambios de la corteza terrestre en forma natural se produce, (salvo en casos excepcionales de movimientos geológicos), a través de largos periodos de tiempo, pero el hombre ha modificado rápidamente los cauces para aprovechar el líquido vital y sus fuerzas estáticas y dinámicas mediante obras que invariablemente alteran las formas y funcionamiento naturales. En muchos casos se han modificado las condiciones naturales para extraer los materiales pétreos que produce la naturaleza al transformar la roca madre en fragmentos, boleos, grava, arena y finos.

El río Zamora en los últimos años ha presentado una diversidad de cambios dinámicos debido a los diferentes procesos que son producidos generalmente por efectos del cambio climático, fenómenos naturales, factores geológicos, geomorfológicos, actividad antrópica del lugar, tasas de cambio de uso del suelo (asentamientos humanos, construcción de obras civiles, modificación de cauces para agricultura y ganadería, extracción de materiales sedimentarios y pétreos), lo que provoca un remodelamiento de la cuenca y redireccionamiento del río afectando con sus constantes crecidas al medio biofísico y al desarrollo socioeconómico de la comunidad que habita en los sectores aledaños a este efluente.

La generación de información confiable, viable y actualizada permite una adecuada planificación y gestión del uso del territorio no solo a escala nacional y regional, sino también a escala local que es importante para los Planes De Ordenamientos Territoriales (MAE, 2013).

En la sub cuenca Zamora, existe una escasa o nula investigación acerca de la dinámica fluvial que presenta el río Zamora, lo que hace que la poca información no presente el nivel que se requiere para conocer de manera puntual la dinámica de los procesos actuantes sobre el río y la influencia de las diferentes actividades que se desarrollan permanentemente y de manera desordenada dentro del territorio, en el ámbito expansión urbana, agrícola y ganadero, entre otras.

Debido a esto surge la necesidad identificar y analizar zonas que presentan variaciones morfológicas y los factores que inciden a estos, a partir del uso de imágenes satelitales del periodo (1985-2022) y visitas de campo, donde dicha información contribuirá en el desarrollo de una base informativa para regular y gestionar la expansión del territorio y su uso para futuros trabajos, a su vez, ayudará a la toma de decisiones futuras por medio de las autoridades, efectuando así un pertinente progreso del territorio. Conociendo estos antecedentes se plantea objetivos

Objetivo general

- Interpretar las variaciones geomorfológicas del río Zamora perteneciente a la subcuenca hidrográfica Zamora (Centinela del Cóndor-El Panguí) mediante teledetección como una herramienta en la planificación territorial.

Objetivos específicos

- Calcular los parámetros morfométricos ligados a la subcuenca hidrográfica Zamora.
- Determinar y categorizar los principales cambios morfológicos del río Zamora mediante el uso de imágenes satelitales Landsat (1985-2022).
- Representar los cambios espaciales del curso del río Zamora periodo 1985-2022 (Centinela del Cóndor-El Panguí).

El presente trabajo investigativo se elaboró 11 capítulos con el siguiente orden:

En el capítulo 1, 2 y 3 se indica el título del trabajo; el resumen que describe superficialmente la metodología empleada para la caracterización de la cuenca y la identificación de zonas con variaciones morfológicas y la introducción donde se describe de forma clara y concisa información relevante sobre el tema tratado, además de abordar cada lineamiento realizado en el proyecto de investigación.

En el capítulo 4 se tiene la revisión de literatura que comprende la conceptualización de los términos más relevantes a tratar durante la realización del trabajo, con la finalidad de comprender todo lo descrito en el presente documento.

En el capítulo 5 se realiza la descripción del área de estudio (parámetros como ubicación y acceso, hidrografía, geología regional, clima), materiales que se utilizan y la metodología a seguir durante el trabajo de investigación, aquí se mencionan los insumos, herramientas y equipos utilizados, así como las técnicas y procesos enfocados en el desarrollo correcto del proyecto, ya sea en el trabajo de oficina como en el trabajo de campo. Dentro de la metodología se indica la secuencia de pasos para lograr cada uno de los objetivos establecidos.

En el capítulo 6 se indica los resultados obtenidos de cada objetivo; parámetros morfométricos ligados a la subcuenca hidrográfica Zamora, identificación y categorización de los principales cambios morfológicos, descripción de factores asociados a los cambios morfológicos de las zonas de estudio y la representación espacial de los cambios de curso del río Zamora.

En el capítulo 7 se tiene la discusión de resultados, donde se indican las zonas identificadas con cambios morfológicos y su relación con los aspectos antrópicos, geológicos, geomorfológicos y climáticos para que se produzcan dichos cambios, también se realiza la categorización de las zonas con mayor dinámica fluvial.

Dentro del capítulo 8 se exponen las conclusiones las mismas que muestran los resultados generados en base a los objetivos planteados; en el capítulo 9 se establecen las recomendaciones que trata de ideas y opiniones que mejoren la ejecución de investigaciones futuras.

Finalmente, en el capítulo 10, se tiene la bibliografía, en forma de lista ordenada alfabéticamente; y en el último capítulo 11, los anexos que respaldan todo lo descrito en el presente proyecto.

4. Marco teórico

4.1. Teledetección

Se define como el conjunto de conocimientos y técnicas utilizados para determinar características físicas y biológicas de objetos y superficies mediante mediciones a distancia, sin el contacto material con los mismos (Figura 1).. La teledetección no engloba sólo los procesos que permiten obtener una imagen desde el aire o el espacio, sino también su posterior tratamiento en el contexto de una determinada aplicación. En otras palabras, la teledetección se define como la técnica de adquisición y posterior tratamiento de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, en virtud de la interacción electromagnética existente entre la Tierra y el sensor, siendo la fuente de radiación ya sea proveniente del sol o del propio sensor (Bustos, O. 1993).

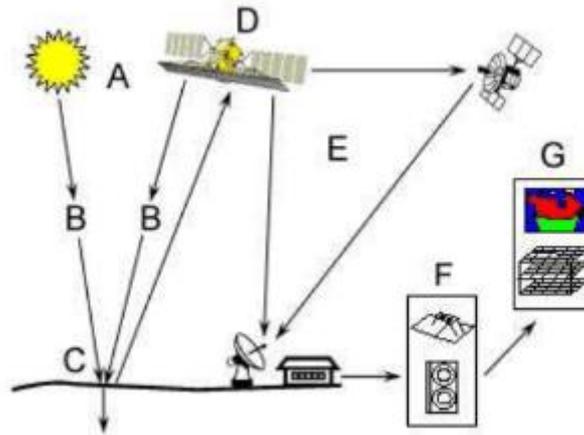
4.1.1. Componentes de un sistema de teledetección

Los componentes básicos de un sistema de teledetección son: la escena, el sensor y el tratamiento de la información, con los siguientes elementos.

- **Fuente de energía o iluminación:** La fuente de energía que supone el origen del flujo energético detectado por el sensor. Puede tratarse de un foco externo al sensor, en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o de un haz energético emitido por éste, conocido como teledetección activa. La fuente de energía más importante es la energía solar.
- **Radiación y la atmósfera:** Es el proceso y el medio en el que la energía electromagnética es propagada a través del espacio libre.
- **Interacción con la superficie terrestre:** La cubierta terrestre, formada por distintas masas de vegetación, suelo, agua y construcciones, que reciben la señal energética procedente de la fuente de energía, y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.
- **El sistema Sensor:** Compuesto por el sensor propiamente dicho y la plataforma que lo sustenta. Tiene como misión captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarla y enviarla directamente al sistema de recepción.
- **Sistema de transmisión, recepción, y procesamiento:** El Sistema de recepción recibe la información transmitida por el sensor. Esta información es grabada en un formato apropiado y es distribuido a los intérpretes para su tratamiento visual o digital.
- **Interpretación y análisis:** En esta etapa el intérprete, analiza la información.
- **Aplicación:** El último proceso es el de extraer la información necesaria para resolver un problema específico; esa información llega al usuario final quienes el encargado de

analizar el documento fruto de la interpretación, así como dictaminar el impacto que de él se derive. (Bustos, O. 1993).

Figura 1. Componentes básicos de un sistema de teledetección.



Nota. (Gomes, V. 2020)

4.1.2. Energía electromagnética.

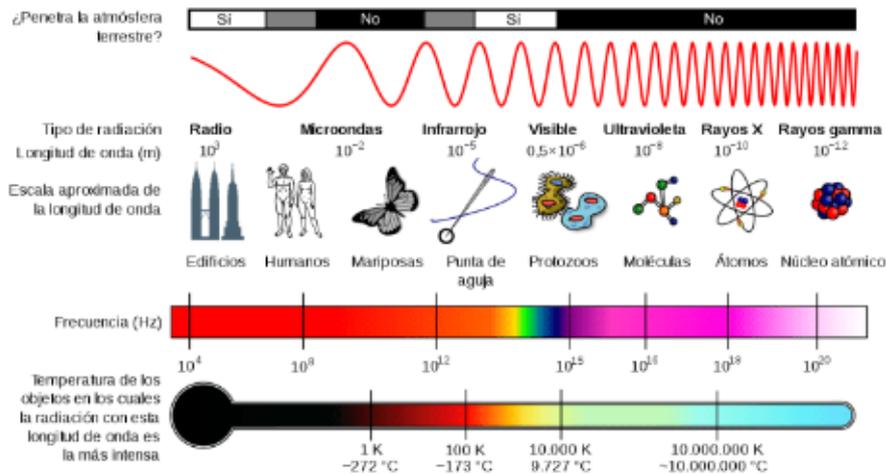
La energía electromagnética es un tipo de energía que es transmitida por el espacio a través de ondas que tienen una cierta velocidad. Una onda electromagnética es el resultado de la propagación simultánea en el espacio de un campo eléctrico y otro magnético. Los diferentes tipos se definen por su longitud de onda (λ) o por la frecuencia (F). La primera hace referencia a la distancia entre dos picos sucesivos de una onda, mientras que la frecuencia designa el número de ciclos pasando por un punto fijo en una unidad de tiempo.

La energía electromagnética que recibe la superficie terrestre sufre diferentes procesos, una parte puede ser reflejada, mientras que el resto penetra en los elementos de la superficie terrestre a través de ondas refractadas, la energía que es absorbida, posteriormente es devuelta en forma de energía emitida por los objetos. Por ello, puede establecerse que la energía incidente es la suma de la energía reflejada, la absorbida y la transmitida.

$$E_{\text{incidente}} = E_{\text{reflejada}} + E_{\text{absorbida}} + E_{\text{transmitida}}$$

Las proporciones de energía reflejada, absorbida y transmitida varía para cada objeto (Figura 2), lo que permite hacer una discriminación con los sistemas de teledetección. Además, para un mismo objeto, estas proporciones sufren variaciones con diferentes longitudes de onda, por lo que dos objetos pueden no ser distinguibles en una porción del espectro y perfectamente diferenciables en otra. (IAGD, 2019)

Figura 2. Radiación y longitudes de onda



Nota. (IAGD, 2019)

4.1.3. Espectro electromagnético

Pinilla (2020), afirma que la forma de adquirir información desde un satélite es capturar y medir la radiación electromagnética emitida o reflejada por la superficie, en este caso se entiende por espectro electromagnético a la sucesión de longitudes de onda de todas las radiaciones conocidas, aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. Desde el punto de vista de la teledetección, conviene destacar una serie de bandas espectrales, que son las más frecuentemente empleadas con la tecnología actual:

- Espectro visible (0.4 a 0.7 micras “nm”). Suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul: (0.4 a 0.5 micras “nm”), verde (0.5 a 0.6 micras “nm”), y rojo (0.6 a 0.7 micras “nm”), en razón de los colores primarios que nuestros ojos perciben a esas longitudes de onda.
- Infrarrojo próximo (0.7 a 1.3 micras “nm”). Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- Infrarrojo medio (1.3 a 8 micras “nm”), en donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. Resulta idóneo para estimar contenido de humedad en la vegetación y detección de focos de alta temperatura.
- Infrarrojo lejano o térmico (8 a 14 micras “nm”), que incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.

- Micro-ondas (a partir de 1 micras “nm”), con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa. (Bustos, O. 1993).

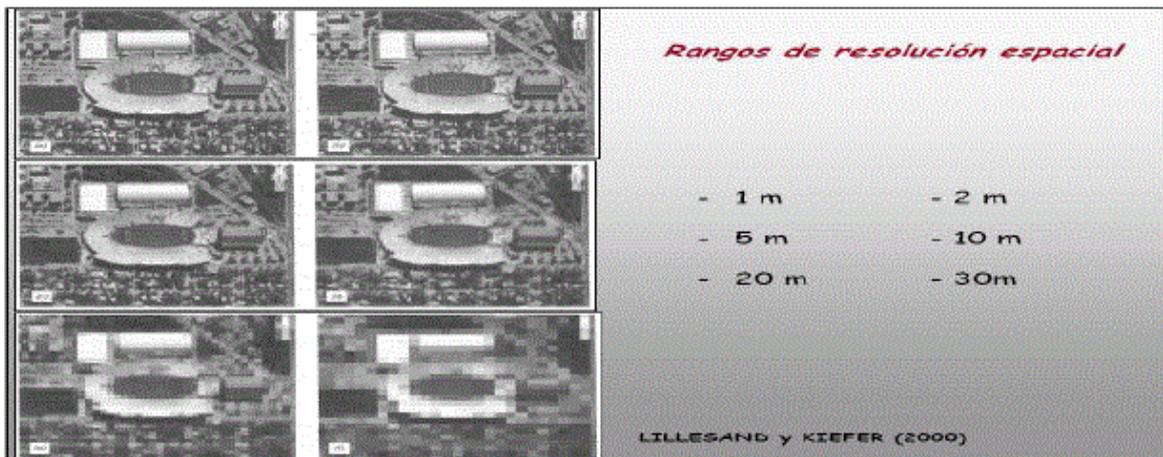
4.1.4. Sensores remotos.

La adquisición de la información en forma de imagen digital requiere de sistemas electrónicos u óptico-electrónicos capaces de convertir la irradiancia incidente en el instrumento en una señal susceptible de ser guardada o transmitida. Estos sistemas toman el nombre de sensores o instrumentos de adquisición y constituyen la carga útil del satélite. Por su parte, en este último cabe distinguir la plataforma portadora propiamente dicha, que integra los sistemas de suministro de energía, comunicaciones, telemetría, estabilización, etc. y la carga útil, que es el instrumento o grupo de instrumentos de adquisición de información (Pinilla, 2020).

Los sensores remotos se pueden clasificar en sensores de tipo pasivo y sensores de tipo activo, de acuerdo con la energía que utilizan para obtener la información. Los sensores pasivos dependen de la energía ambiental de una fuente externa y permiten medir la magnitud de la radiación electromagnética reflejada por la superficie terrestre y atmosférica a partir del sol en el espectro visible. Mientras que los sensores activos generan su propia fuente de energía, y son capaces de emitir ondas en la región del espectro de las microondas y recibir la señal que rebota de la superficie terrestre (Herrera et al., 2018).

4.1.4.1. Resolución

Figura 3. Rangos de resolución espacial



Fuente. (De la Riva, 2009)

La agencia estadounidense para la administración oceánica y atmosférica "NOAA" define la resolución como el valor mínimo determinado para alguna de las variables que definen a una imagen digital. Según Pinilla (2020), la resolución es la capacidad que ha tenido

el sistema formador de imágenes para discriminar información de detalle en un objeto. En los instrumentos ópticos tradicionales la resolución se identifica con el poder de separación espacial del sistema de lentes y el tamaño de grano de la emulsión fotográfica (Figura 3) .Se tiene cuatro tipos de resolución que se atribuyen a los sensores puestos en órbita:

- **Resolución espacial:** Es una resolución de tipo puramente geométrica y viene determinada por el tamaño de la celda sobre el terreno. Depende de dos factores: el campo de visión instantáneo y la altura de la plataforma.
- **Resolución espectral:** La resolución espectral es la capacidad del sensor para discriminar la radiancia en distintas longitudes de onda del espectro electromagnético. Cada una de las bandas o canales de un sensor multiespectral exploran la respuesta de la superficie en un determinado intervalo de longitudes de onda. En realidad, la resolución espectral viene determinada por el número de canales de la imagen y por la anchura de banda de cada canal.
- **Resolución radiométrica:** La resolución radiométrica es la capacidad del sensor para discriminar niveles de intensidad de radiancia espectral dentro de un intervalo dado, esto es, en un determinado canal. En los sistemas analógicos como los fotográficos, la resolución radiométrica viene determinada por el número de niveles de gris, que también se conoce como profundidad de color. En los sistemas óptico-electrónicos, a cada celda se le asigna un nivel digital (ND) que guarda una relación directa con la cantidad de energía recibida.
- **Resolución temporal:** La resolución temporal es la capacidad del sistema para discriminar los cambios sufridos en el tiempo por la superficie estudiada y hace referencia a la periodicidad con que el sensor, gracias a la plataforma portadora y a su propio diseño, puede adquirir una nueva imagen del mismo punto de la superficie terrestre.

4.1.4.2. Landsat; La constelación Landsat está formada por 9 satélites que provenían, tanto conceptual como estructuralmente, de los satélites para fines meteorológicos Nimbus. Llevaron a bordo diferentes instrumentos, siempre con la filosofía de captar mayor información de la superficie terrestre, con mayor precisión y a mayor detalle, de ahí sus mejoras radiométricas, geométricas y espaciales. El USGS ha desarrollado productos científicos de calidad de investigación, listos para aplicaciones, nivel 2 y nivel 3 que se pueden usar para monitorear, evaluar y proyectar cómo los cambios en el uso de la tierra. A continuación (Tabla 1), algunas características de los productos Landsat Pinilla (2020).

Tabla 1. *Características de bandas espectrales Landsat 4*

Banda	Resolución	Longitud de onda	Descripción
Banda 1	80m	475-575 nm	Visible
Banda 2	80m	580-680 nm	Visible
Banda 3	80m	690-830 nm	Visible
Banda 4	30m	0,5 a 0,6 μm	Visible
Banda 5	30m	0,5 a 0,6 μm	Visible
Banda 6	30m	0,7 a 0,8 μm	Infrarrojo cercano

Nota. (USGS, 2022)

Tabla 2. *Características de bandas espectrales Landsat 5*

Banda	Resolución	Longitud de onda	Descripción
Banda 1	30m	0,45 - 0,52 μm	Visible
Banda 2	30m	0.52 - 0.60 μm	Visible
Banda 3	30m	0,63 - 0,69 μm	Visible
Banda 4	30m	0,76 - 0,90 μm	Infrarrojo cercano
Banda 5	30m	1,55 - 1,75 μm	Infrarrojo cercano
Banda 6	30m	10,40 - 12,50 μm	Térmica
Banda 7	30m	2,08 - 2,35 μm	Infrarrojo medio

Nota. (USGS, 2022)

Tabla 3. *Características de bandas espectrales Landsat 8*

Banda	Resolución	Longitud de onda	Descripción
Banda 1	30m	0,43 - 0,45 μm	Aerosol costero
Banda 2	30m	0,450 - 0,51 μm	Azul
Banda 3	30m	0,53 - 0,59 μm	Verde
Banda 4	30m	0,64 - 0,67 μm	Rojo
Banda 5	30m	0,85 - 0,88 μm	Infrarrojo cercano
Banda 6	30m	1,57 - 1,65 μm	SWIR1
Banda 7	30m	2,11 - 2,29 μm	SWIR2
Banda 8	15m	0,50 - 0,68 μm	Pancromática

Nota. (USGS, 2022)

4.1.4.3. Sentinel; El satélite está equipado con un sensor multiespectral optoelectrónico para la topografía con una resolución Sentinel-2 de 10 a 60 m en las zonas espectrales visible, infrarroja cercana (VNIR) e infrarroja de onda corta (SWIR), incluidos 13 canales espectrales, lo que garantiza la captura de las diferencias en el estado de la

vegetación, incluidos los cambios temporales, y también minimiza el impacto en la calidad de la fotografía atmosférica, también te permitirá componer imágenes a color natural (bandas 4,3,2) o imágenes a falso color (Figura 4).

Figura 4. Características de bandas espectrales Sentinel 2

Banda	Resolución	Longitud de onda	Descripción
Banda 1	60m	443nm	Azul
Banda 2	10m	490nm	Azul
Banda 3	10m	560nm	Verde
Banda 4	10m	665nm	Rojo
Banda 5	20m	705nm	Rojo
Banda 6	20m	740nm	Ultra Rojo
Banda 7	20m	783nm	Rojo lejano
Banda 8	10m	842nm	Infrarrojo cercano
Banda 9	60m	940nm	Vapor agua
Banda 10	60m	1375nm	Onda corta infrarrojo
Banda 11	20m	1660nm	Onda corta infrarrojo
Banda 12	20m	2190nm	Onda corta infrarrojo

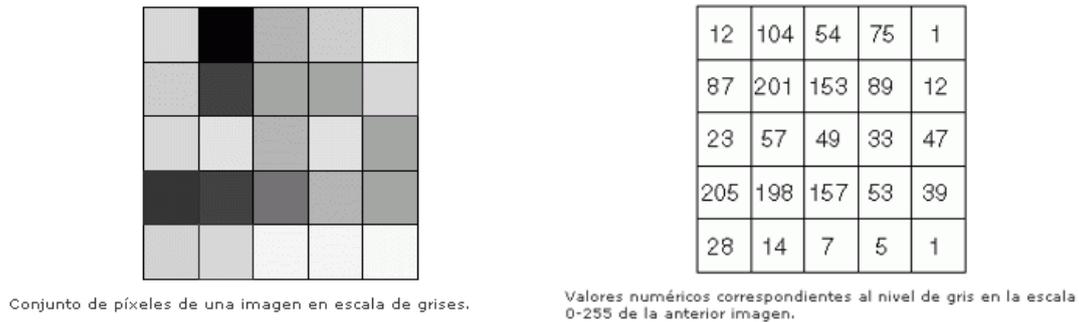
Nota. (Sentinel-2, 2019)

4.1.5. Imágenes satelitales.

Según Chuvieco (2010), los satélites poseen sensores calibrados para codificar en rango de valores de números enteros (entre 0 y 255) la cantidad de energía que es reflejada por unidad de superficie y traducirlos en una imagen digital. Cada píxel, que es la unidad mínima de muestra de la superficie terrestre (x,y), tiene un valor de reflectancia de acuerdo al elemento o elementos presentes dentro del mismo. En cada pasada del sensor, se obtienen imágenes de un mismo sitio en diferentes segmentos del espectro llamados "bandas espectrales", donde los valores bajos de reflectancia se corresponden con tonos oscuros y los valores altos con tonos claros. De esta forma, vinculando la firma espectral con la región captada por la banda (azul, verde, rojo, infrarrojo, etc.) es posible interpretar las imágenes e identificar los elementos de la cobertura terrestre

Entonces, una imagen satelital no es más que una fuente de datos consistente en una imagen de matriz bidimensional. Un dato particular (x,y) representa un elemento de la escena sobre la superficie de la tierra, llamado elemento imagen y representado como un píxel (Picture element o digital number) o simplemente Nivel Digital (ND) (Chuvieco, 2010). Por tanto, como una imagen satelital es una disposición matricial numérica, entonces es posible realizar análisis estadísticos en las mismas, independientemente del sensor del cual provenga la información.

Figura 5. Niveles digitales y energía reflectada



Nota. (Chuvieco, 2010).

4.1.5.1. Pixel

Una imagen está formada por una matriz de elementos, o píxeles, los cuales constituyen las unidades más pequeñas de la imagen. Los píxeles de la imagen son generalmente cuadrados y representan cierta área de la imagen. Es importante distinguir entre el tamaño de píxel y la resolución espacial. Si un sensor tiene una resolución espacial de 20 m y la imagen es presentada en máxima resolución, cada píxel representa un área de 20m x 20m sobre la Tierra. Sin embargo, es posible presentar a la imagen con un tamaño de píxel mayor a la resolución espacial (Herrera et al., 2018).

4.1.5.2. Escala

La razón entre una distancia en una imagen o mapa a la distancia real sobre la Tierra es llamada escala. Si se tiene un mapa con una escala de 1:100000, un objeto de 1cm de longitud sobre el mapa realmente será de 100000 cm (1km). Mapas o imágenes con una razón “mapa-a-tierra” pequeña, se dicen de pequeña escala (por ejemplo 1:100000) (menos detalles), y aquéllas con cocientes más grandes (por ejemplo, 1:5000) se denominan escala grande (más detalles) (Herrera et al., 2018).

4.1.5.3. Correcciones básicas de imágenes satelitales

Una imagen de satélite está sometido a una serie de interferencias que hacen que la información que quiere obtenerse aparezca perturbada por una serie de errores. Para esto se realizará las siguientes correcciones.

- **Corrección geométrica:** Cuartero y Felicísimo (2003), afirman que es un proceso de cambio de espacio de referencia; la imagen original tomada por el sensor está definida en un sistema local donde la localización de cada píxel queda determinada por su situación en filas y columnas, es el espacio imagen. La corrección geométrica ajusta esta imagen a un nuevo espacio de referencia donde cada píxel tiene asignado el valor

XY que le corresponda en un sistema de proyección geográfica determinado: es el espacio de proyección.

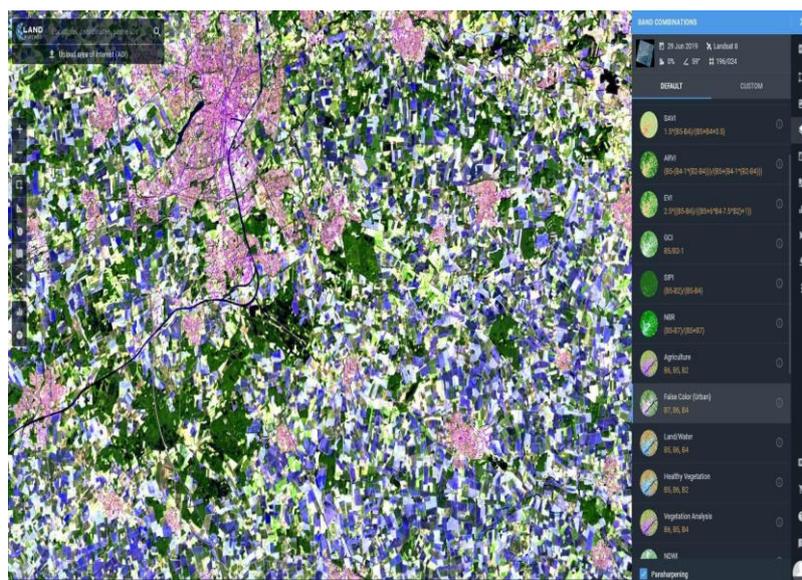
- **Corrección radiométrica:** Con esta corrección se busca obtener la máxima correlación entre la señal registrada y las características de la superficie observada. El efecto a corregir generalmente es la dispersión que provoca un aumento de la radiación detectada por el sensor y puesto que la dispersión no es constante en el tiempo ni en el espacio las correcciones serán sólo aproximaciones a la realidad (Pinilla, 2007).

4.1.6. Análisis visual de imágenes satelitales

Según Fernández (2001), el análisis visual de imágenes se realiza empleando tres bandas del sensor, coincidiendo con la capacidad de los monitores, empleados en informática y monitores RG. Los monitores poseen un total de tres cañones, RGB, red, green, blue, con los que, por combinación de estos tres colores básicos, se construyen el resto de los colores. Empleando estos tres colores tenemos la posibilidad de enviar en cada uno de ellos una de las bandas del sensor, combinándolos en nuestra pantalla y dando distintos colores y tonos. Estos colores y tonos se emplean para analizar visualmente la imagen, combinando las bandas, de manera que se da un primer acercamiento al contenido de la imagen.

Las combinaciones de colores se emplean para discriminar geología de la imagen, usos del suelo de la imagen, morfología urbana, etc. Para discriminar ciertas cubiertas hay que ir a otros análisis analizando imágenes consecutivas, o de otros años, análisis multitemporal y de contexto, en función del conocimiento previo que se tiene de la zona cubierta por la imagen.

Figura 6. Imagen de las bandas 7, 6, 4 del satélite Landsat 8



Nota. (EOS, 2021)

4.1.7. Combinación de bandas.

Tanto Landsat como Sentinel, son dos de los satélites más importantes que nos proporcionan imágenes para trabajar en teledetección

4.1.7.1. Usos agrícolas: Con la combinación de bandas 6, 5, 2 en Landsat y 11, 8A, 2 en Sentinel podemos realizar análisis para la detección de zonas de uso agrícola. Donde los campos con estos fines aparecerán representados en una tonalidad verde brillante.

4.1.7.2. Color natural: Esta combinación suele llamarse “color natural” pues involucra a las tres bandas visibles y se le asigna a cada una de ellas su verdadero color, resultando una combinación que se aproxima a los colores naturales de la escena. Podemos generarla utilizando la combinación 4,3,2 en Landsat 8 y 4,3,2 en Sentinel 2.

4.1.7.3. Falso color para detección de zonas urbanas: Las áreas urbanas aparecen en tonos magentas mientras que las praderas o pastos se representan en tonos verdes claros. De verde oliva a verde brillante indica áreas forestales (en general los bosques de coníferas son más oscuros que los de caducifolias). Este análisis puede realizarse con una combinación de bandas 7, 6, 4 en Landsat 8 y 12,11,4 en Sentinel 2.

4.1.7.4. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).; Es muy importante en la evaluación y análisis de los cambios y transformaciones a través del tiempo que se dan en la cobertura vegetal, Zhan (2002). Es calculado mediante la siguiente fórmula:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

Donde:

- NDVI: Índice diferencial de Vegetación normalizado
- NIR: Banda del infrarrojo cercano
- Red: Banda del Rojo

4.1.7.5. Normalized Difference Water Index (NDWI).; Propuesto por McFeeters (1996), consiste en un método desarrollado para delinear los cuerpos de agua. Este índice utiliza la radiación reflejada por la banda del infrarrojo cercano (NIR) y la luz verde visible para mejorar su presencia, mientras elimina características de la vegetación terrestre y el suelo. El índice es calculado mediante:

$$NDWI = (GREEN - NIR) / (GREEN + NIR)$$

Donde:

- NDWI: Índice diferencial de Agua normalizado
- NIR: Banda del infrarrojo cercano
- GREEN: Banda de la luz verde

4.1.7.6. Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI); Según Xu, (2006), Consiste en una modificación del MNDWI, reemplazando la banda NIR por la banda media del infrarrojo (MIR), Esta modificación mejora la información obtenida a partir de MNDWI para los cuerpos de agua, mientras elimina o remueve el ruido de las construcciones, vegetación y suelo. Se calcula a partir de:

$$MNDWI = (GREEN - MIR) / (GREEN + MIR)$$

Donde:

- MNDWI: Índice Diferencial de Agua Normalizado Modificado
- MIR: Banda del infrarrojo medio
- GREEN: Banda de la luz verd

4.1.8. Métodos para la extracción de datos.

4.1.8.1. Clasificación supervisada; Según Pinilla (2020), el analista deberá decidir qué clases buscará en la imagen, y una vez establecidas las categorías, habrá de definir en la escena los campos de entrenamiento (training fields), que son un conjunto de parcelas constituidas por celdas suficientemente representativas de cada clase. De la correcta selección de los campos de entrenamiento depende estrechamente el resultado de la clasificación. En primer lugar, la pureza de los píxeles es un requisito necesario. Las celdas recolectadas en los campos de entrenamiento deben representar solamente a la cubierta que se pretende caracterizar, sin contaminación de otras. Dicho de otro modo, hay que descartar los píxeles mixtos, situados sobre dos clases diferentes o en las proximidades de bordes de parcela, con las categorías que se pretenden representar.

4.1.8.2. Clasificación no supervisada.; Los métodos no supervisados o automáticos buscan en el espacio de características de la imagen agrupaciones espontáneas de los datos, de acuerdo a alguna función de similaridad. En la literatura, esas nubes de puntos aparecen con diferentes denominaciones: agrupamientos, clusters, grupos o racimos, y pueden considerarse como regiones continuas del espacio de características que contienen densidades relativamente altas de puntos, y que se encuentran a su vez separada de otras regiones de alta densidad por regiones cuya densidad de puntos es relativamente baja. El entrenamiento no supervisado ordinariamente va unido al propio proceso de clasificación y recorre un triple proceso. En primer lugar, se determinan las características de las celdas de entrenamiento, a continuación, se calcula la similaridad o distancia estadística entre casos y, finalmente, se aplica algún criterio de agrupamiento de los casos similares (Pinilla, 2020).

4.1.9. Teledetección multitemporal.

Pinilla (2020), la define como información periódica de un mismo lugar a lo largo del tiempo. Esta propiedad facilita significativamente la realización de estudios multitemporales sobre las zonas de interés, con el fin de poner de relieve la evolución de ciertos rasgos en el territorio. De hecho, el análisis de cambios se ha convertido en una pieza fundamental dentro de las aplicaciones de la teledetección. La identificación de los cambios entre dos imágenes de fechas diferentes ha sido abordada desde hace décadas mediante el análisis visual. La fointerpretación tenía en ello uno de sus objetivos primordiales. El intérprete analizaba las formas, los colores, las texturas, los matices, las sombras y cuantos atributos visuales, percibía y comparaba las dos imágenes para, finalmente, establecer los elementos que habían aparecido, desaparecido o, simplemente, cambiado en la escena.

Para este tipo de análisis, las imágenes multiespectrales, deben estar separadas como mínimo 3 años en el tiempo, lo cual es ideal para detectar los cambios del sector en estudio, además las imágenes deben ser de la misma estación, lo cual asegura una mejor interpretación, mayor confiabilidad de resultados y análisis de los datos.

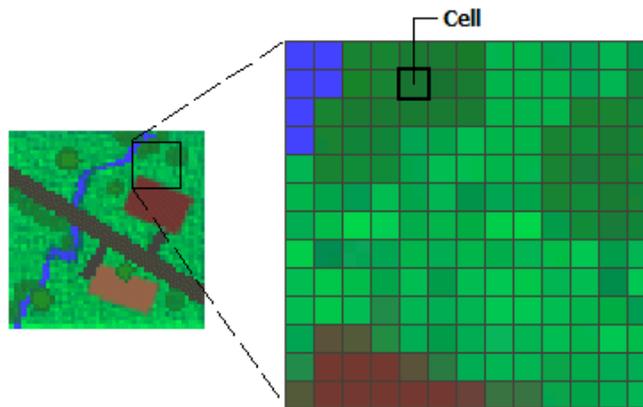
4.1.10. Sistemas de información geográfica (SIG).

Según (Lazo, 1999), los SIG son sistemas computarizados diseñados para soportar la captura, procesamiento y recuperación de datos referenciados espacialmente (en un ámbito geográfico) a fin de resolver problemas de planeamiento y administración. Los SIG han realizado un cambio intelectual y tecnológico, principalmente en el ámbito de las geociencias y la cartografía, estos cambios se consideran como el conjunto de procedimientos metodológicos y técnicos que permiten tratar la espacialidad de los datos y favorecer el estudio de la realidad desde enfoques multidimensionales e integrados (González, Fernández Freire, Forero Morente, & Pérez Asensi, 2012).

4.1.10.1. Modelos de representación o de datos

- **Modelo ráster.** Para este modelo se divide de manera sistematica la zona de estudio en una serie de unidades mínimas denominadas celdas, y para cada una de estas se recoge la información pertinente que la describe; esto conlleva a que, el modelo ráster centre su interés en las propiedades del espacio que en la representación precisa de los elementos que lo conforman. Cada una de esas celdas se considera como indivisible y es identificable por su número de fila y columna; y en cuanto a la información temática, a cada celda le corresponde normalmente un único valor relativo a la variable que se está representando, por ejemplo: altitud, uso del suelo, materiales geológicos, etc., (Olaya, 2014).

Figura 7. Modelos ráster



Nota. (Esri, 2021)

- **Modelo digital del terreno.** Este tipo de modelo es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, es decir son archivos ráster utilizados ampliamente extendida y en los cuales cada uno de los pixels representa el valor de una variable continua determinada, como por ejemplo temperaturas. Hay que tener presente que los MDT son modelos y no reconstrucciones de la realidad, por eso es importante utilizar un mismo modelo a la hora de realizar análisis sobre un mismo conjunto de datos, para que los resultados sean comparables entre sí (Capdevila & Mínguez, 2012).

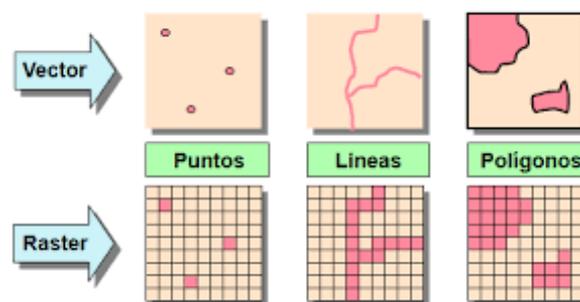
Figura 8. Modelos digitales del terreno



Nota. (Esri, 2021)

- **Modelo vectorial.** En este modelo, no existen unidades fundamentales que dividen la zona recogida, sino que se recoge la variabilidad y características de esta mediante entidades geométricas, para cada una de las cuales dichas características son constantes. La forma de estas entidades (su frontera), se codifica de modo explícito, a diferencia del modelo ráster, donde venía implícita en la propia estructura de la malla (Olaya. P, 2014).

Figura 9. Modelos vectoriales para la representación de datos



Nota. (Veracruzana, 2013)

4.1.11. Cartografía y planificación territorial

La cartografía constituye un sistema de comunicación gráfica cuya función principal es la de facilitar la visión de las cosas a representar. Un mapa es definido por Peña Monné (1997) como una representación gráfica, simplificada y convencional de datos de todo tipo y relaciones espaciales que tienen lugar en un espacio bi o tri dimensional con una relación de similitud denominada escala. El estudio integrado de una cuenca hidrográfica debe proporcionar un adecuado conocimiento de las características, jerarquía y dimensiones de los distintos cursos que la componen. La representación de la dinámica del escurrimiento, los procesos más relevantes, el régimen hídrico de los mismos y su relación con el tipo de suelo también debe ser integral, permite establecer las condiciones del escurrimiento en una cuenca, derivadas de las combinaciones de los diferentes procesos que definen un comportamiento hidrológico una cuenca hidrográfica. Se torna de esta manera en una herramienta indispensable para la interpretación visual y espacial del comportamiento hidrológico (Tricart, 1965; Capitanelli, 1998).

4.2. Geomorfología

4.2.1. Geomorfología fluvial

Según Richards (1995), la geomorfología fluvial es la explicación de las relaciones entre procesos físicos del flujo en canales de lecho móvil, la mecánica de transporte de sedimentos, forzado por el flujo y formas de las canales aluviales creadas por el transporte de sedimentos. Este subcampo suele traslaparse con el campo de la hidrografía, estudia la estructura y forma de los ríos, incluyendo la configuración transversal y longitudinal del cauce, la geometría de las secciones transversales y la forma del fondo, analizando los procesos dinámicos que llevan a la transformación a lo largo del tiempo de los principales parámetros característicos de los cursos de agua.

En sentido general, la geomorfología fluvial, estudia los patrones en que pueden caracterizarse los distintos sistemas fluviales, lo que podríamos llamar morfología fluvial y otra que estudia los distintos procesos dinámicos que modifican con el tiempo, estos patrones se llama dinámica fluvial (Artemisa, 2014).

Tabla 4. Factores que controlan la dinámica fluvial

Factores que controlan la dinámica fluvial
Geológicos: Se refiere a la influencia que tienen las características físicas de las capas superficiales de la corteza (suelos y afloramientos rocosos) sobre el escurrimiento fluvial. Los ríos que drenan cuencas impermeables adquieren características torrenciales mientras los terrenos permeables juegan un papel retardador y regulador
Geomorfológicos: Comprende las formas y procesos del modelado que se determinan a partir de la acción del agua superficial principalmente la encauzada. Esta última constituye el principal agente del modelado. Los agentes del modelado, en general contribuyen a una progresiva erosión y aplanamiento del relieve preexistente.
Tectónicos: El tectonismo se refiere a las transformaciones internas que sufre la corteza terrestre por medio del acomodamiento de las capas que la forman. Estas transformaciones se van dando muy lentamente a lo largo del tiempo.
Antrópicos: Es variable dependiendo de la actividad que el hombre realice en la cuenca. Las modificaciones antropogénicas generan cambios morfológicos importantes como, por ejemplo, una canalización o la construcción de una represa activando y/o favoreciendo mecanismos de transporte y sedimentación.

Nota. (Sergi, 2009)

4.2.2. Morfometría Fluvial

El término morfometría fluvial hace referencia a la medida de las propiedades geométricas de la superficie sólida de un sistema de erosión fluvial de forma que el análisis morfométrico de una cuenca se aplica a medir la erosión de los cursos de agua, interpretando las características geométricas de los elementos de las redes de drenaje para comprender la evolución del paisaje fluvial (Strahler, 1964). Es por ello que, los trabajos sobre morfometría fluvial o hidrografía, en el seno de la geografía, frecuentemente han estado orientados a la interpretación hidrológica y/o geomorfológica de los sistemas fluviales. Y ello porque la morfometría de los cauces es una respuesta de los ríos a las modificaciones que experimenta su entorno y, por tanto, ésta supone una ruptura en el equilibrio entre caudal y carga transportada.

Los estudios de dinámica fluvial están soportados por registros fotográficos, cartográficos y satelitales del cauce del río en un periodo de tiempo de por lo menos 30 años. (Vargas, 2012. p. 8).

4.2.3. Tipos de canales fluviales

Los tipos de canales fluviales se dividen en dos principalmente: Inactivo lateralmente (recto, estable y sinuoso), y activo lateralmente (meandriforme y trenzado). Los parámetros utilizados para esta clasificación son la sinuosidad (S_r) y multiplicidad (M); esta última depende del número de barras que divide la corriente en varios brazos (Álvarez, 2013). Según la geometría en planta que adopta el canal, se pueden clasificar los ríos en tres tipos:

4.2.3.1. Rectilíneo.; Estos ríos se caracterizan por una sinuosidad baja ($S_r < 1.05$) y un único canal. Son muy inestables, tendiendo a evolucionar a otros tipos de río, salvo cuando circulan o fluyen siguiendo una falla geológica. Poseen un caudal de alta energía y gran capacidad erosiva (Álvarez, 2013).

4.2.3.2. Meándrico.; Este tipo de río tiene sinuosidad alta ($S_r > 1.5$) y un canal único. Su característica principal es la unidad geométrica llamada meandro, curva completa sobre el canal, compuesta por dos arcos sucesivos. Las corrientes fluviales meandriformes combinan un carácter erosivo y sedimentario (Álvarez, 2013).

4.2.3.3. Anastomosado.; Estos ríos están sujetos a un proceso de sedimentación y poseen una sinuosidad (S_r) entre los valores de: $1.25 < S_r < 1.50$, también son llamadas trenzadas, presentan canales múltiples. Tienen una gran capacidad de transporte y sedimentación, además, menor energía que las corrientes rectilíneas, por lo que, al encontrarse con obstáculos, tienden a modificar su trayectoria adecuándose al relieve y a los sedimentos depositados en el fondo del cauce de granulometría heterogénea durante la época de aguas bajas, siendo el principal responsable de la división del cauce en los canales anastomosados. (Álvarez, 2013).

Figura 10. Clasificación de canales fluviales



Nota. (Gutiérrez, 2008)

4.2.4. Canales fluviales y su estabilidad

- La continua variación con el tiempo de los canales meandriformes es una de las características de las llanuras aluviales con meandros.
- Su velocidad de migración puede alcanzar valores de 8m/ año.
- En el cambio del canal con el tiempo crece de curvatura y la deriva y además puede producirse estrangulamiento y acortamiento.
- También puede haber abandono total del canal.
- Estos cambios tienen importantes implicaciones en los límites políticos y administrativos (Gutiérrez, 2008),

Hay que tener en cuenta en las clasificaciones de los canales aluviales no solo del tipo de canal, sino también las variables que influyen en la morfología del canal, las dimensiones del canal, estas dimensiones se deben básicamente al caudal de agua y la forma del canal, que se relacionan con la cantidad y el tipo de sedimento transportado, que, a su vez, es función del porcentaje de sedimentos (Schumm, 1981).

4.2.5. Erosión fluvial

Según Gutiérrez (2008), la erosión fluvial se lleva a cabo por los procesos de corrosión, corrasión y cavitación. La corrosión implica cualquier proceso químico que resulta de la meteorización del lecho y de las paredes del curso fluvial. La corrasión o abrasión consiste en el desgaste mecánico por impacto entre las partículas transportadas y la erosión mecánica del cauce, que puede originar pilancones o marmitas. La evorsión es un tipo de corrosión en la que el flujo del agua suaviza el lecho sin ayuda de las partículas. La cavitación solo se produce a grandes velocidades tales como en la base de cascadas y cataratas, en rápidos y en algunos conductos artificiales, los cursos fluviales pueden erosionar su lecho y sus paredes.

4.2.6. Cuenca hidrográfica

Las cuencas hidrográficas son espacios territoriales delimitados por un parteaguas (partes más altas de montañas) donde se concentran todos los escurrimientos (arroyos y/o ríos) que confluyen y desembocan en un punto común llamado también punto de salida de la cuenca, que puede ser un lago (formando una cuenca denominada endorreica) o el mar (llamada cuenca exorreica).

En estos territorios hay una interrelación e interdependencia espacial y temporal entre el medio biofísico (suelo, ecosistemas acuáticos y terrestres, cultivos, agua, biodiversidad, estructura geomorfológica y geológica), los modos de apropiación (tecnología y/o mercados) y las instituciones (organización social, cultura, reglas y/o leyes).

Las cuencas hidrográficas permiten entender espacialmente el ciclo hidrológico, así como cuantificar e identificar los impactos acumulados de las actividades humanas o externalidades a lo largo del sistema de corrientes o red hidrográfica, que afectan positiva o negativamente la calidad y cantidad de agua, la capacidad de adaptación de los ecosistemas y la calidad de vida de sus habitantes. (Ríos, E, et al,2013)

4.2.7. Parámetros de una cuenca hidrográfica

Strahler (1964), afirma que los parámetros geomorfológicos a través de cálculos matemáticos, permiten analizar la estructura de la cuenca hidrográfica y clasificarla. Estos parámetros están relacionados con procesos dinámicos y geológicos que transforman los ríos a lo largo del tiempo. Los parámetros geomorfológicos que se utilizan para caracterizar una cuenca son:

4.2.7.1. Área (A); El Área de una cuenca se define como el total de la superficie proyectada sobre un plano horizontal, que contribuye con el flujo superficial a un segmento de cauce de orden dado (Londoño Arango, 2001).

Tabla 5. Clasificación de cuencas hidrográficas según su rango

Clasificación de tamaños de cuenca	
Rango (km²)	Clasificación
<25	Microcuenca
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia-Pequeña
500 a 2500	Intermedia-Grande
2500 a 5000	Grande
> 5000	Muy grande

Nota. (Aranda, 1992)

4.2.7.2. Longitud (L); Es definida por la longitud del cauce principal, lo que equivale a la distancia que recorre el río entre el punto de desembocadura aguas abajo y un punto situado a mayor distancia aguas arriba.

4.2.7.3. Perímetro (P); Expresa la forma de la cuenca y constituye la longitud de la línea divisoria. Es un parámetro importante, pues en conexión con el área nos puede decir algo sobre la forma de la cuenca (Rizo, Et al, 2011).

4.2.7.4. Pendiente promedio de cuenca (%): Es la relación existente entre el desnivel altitudinal del cauce y su longitud. Dicho parámetro brinda información de la velocidad de escorrentía como así también de las características de los hidrogramas. Las cuencas de mayor pendiente tienden a responder con mayor celeridad ante las precipitaciones al aumentar los caudales (Horton, 1945; Strahler, 1964).

Tabla 6. Características del relieve de acuerdo a su pendiente

Características de relieve	
%	Terrenos
0 a 2	Llano
2 a 5	Suave
5 a 10	Accidentado medio
10 a 15	Accidentado
15 a 25	Fuertemente accidentado
25 a 50	Escarpado
> 50	Muy escarpado

Nota. (Perez, 1979)

4.2.7.5. Orden del flujo (U).; Strahler (1952), define al orden más pequeño o de primer orden a los canales; los de segundo orden están constituidos por la unión de los canales de primer orden; los canales de tercer orden son formados por la unión de los canales de segundo orden y así sucesivamente. Las cuencas de mayor orden presentan un mayor potencial erosivo, mayor transporte de sedimentos y por tanto mayor escorrentía, también determinan el grado de desarrollo fluvial (Rizo, Et al, 2011).

Tabla 7. Clasificación según su número de flujo

Tipo de orden de corriente	
Rango	Tipo
1 a 2	Bajo
2 a 4	Medio
4 a 6	Alto

Nota. (Rizo Et al, 2011)

4.2.7.6. Número de flujo (Nu).; Horton (1945), propone esta variable como la relación entre el número de flujos de un orden dado y el orden de flujo en término de una serie geométrica inversa. Además, Kumar et al. (2018), indica que es una característica hidrológica importante del área de la cuenca, puesto que provee información acerca de los factores de superficie de drenaje. Se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$Nu = N1 + N2 + N3 + \dots + N$$

4.2.7.7. Longitud del flujo (Lu).; Es un parámetro que expresa el máximo flujo de primer orden y decrece conforme incrementa el orden del flujo. Los flujos con longitudes cortas representan áreas con mayor pendiente y texturas finas, en contraparte los flujos largos representan áreas con menor pendiente (Strahler, 1964). Este parámetro se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$Lu = L1 + L2 + L3 + \dots + L$$

Tabla 8. Características del territorio según su longitud de flujo

Longitud de Flujo	
Longitudes cortas	Mayor pendiente y texturas finas
Flujos largos	Áreas con menor pendiente y texturas gruesas

Nota. (Strahler, 1964)

4.2.7.8. Longitud media del flujo (Lsm).; Según Strahler (1964), la longitud media del flujo (Lsm) es un parámetro adimensional de la cuenca fluvial que indica el tamaño de los componentes característicos de una red de drenaje y las superficies contribuyentes. Se lo calcula por medio de la siguiente ecuación: $Lsm = Lu/Nu$

4.2.7.9. Relación de longitud del flujo (RL).; Es la razón entre (Lu) y el próximo orden inferior de los segmentos de flujo en los arroyos de la cuenca. Representa los distintos cambios superficiales en la pendiente y la topografía, provocados por los diferentes agentes de erosión y meteorización, indicando la etapa joven y madura del desarrollo geomórfico en los canales fluviales de la cuenca (Horton, 1945a). Los valores de longitud de flujos bajos representan menor longitud y mayor energía concentrada bruscamente; y altos para los órdenes superiores que presentan grandes longitudes correspondientes a la parte baja de la cuenca, donde la concentración de caudales es más paulatina, mostrando la presencia de diferentes etapas erosivas (Senciales, 1999). Se calcula con la siguiente ecuación: $RL = Lu / Lu - 1$

4.2.7.10. Relación de bifurcación (Rb).; Es un parámetro adimensional que indica el nivel de integración que prevalece en las ramificaciones de los canales de varios órdenes en una cuenca hidrográfica. Se la calcula mediante la razón entre el número de cauces de un orden determinado (Nu) con el próximo orden superior en una red de drenaje (Rai et al., 2020). Se lo calcula a través de la siguiente ecuación: $Rb = Nn / Nn + 1$

Tabla 9. Características de una cuenca según su relación de bifurcación

Bifurcación	
2	Escaso relieve
3 a 5	Áreas Montañas
> 5	Fuerte dependencia a la estructura

Nota. (Senciales, 1999)

4.2.7.11. Densidad de drenaje (Dd).; Es uno de los principales indicadores de las geoformas que contiene el relieve, proporcionando el tamaño o dimensión de disección de los procesos de evolución del paisaje y el potencial de escorrentía. Se lo representa por medio de la relación entre la longitud del flujo de un orden (Lu) y el área total de la cuenca hidrográfica (Senciales, 1998). Se puede calcular a través de la ecuación:

$$Dd = Lu / A$$

Tabla 10. Factores según la vecindad de drenaje de una cuenca

Factores de densidad de drenaje		
Densidad de drenaje	Categoría	Interpretación
<1	Baja	Baja escorrentía y aumento de infiltración
1 a 2	Moderada	Tendencia media de escorrentía
2 a 3	Alta	Alta tendencia a fluir y a inundaciones
> 5	Muy alta	Alta tendencia a escorrentía y a la erosión

Nota. (Horton, 1945 y Strahler, 1957)

4.2.7.12. Frecuencia de flujo (Fs).; Es un buen indicador de las diferentes etapas de evolución que ha tenido el relieve, producto de los distintos procesos de erosión y meteorización. El nacimiento de los canales fluviales o ríos se debe en gran parte a la acción de la naturaleza, estructuras rocosas, vegetación, precipitaciones y permeabilidad del terreno. Este parámetro se la define como la razón entre los segmentos de órdenes de flujo y el área total de la cuenca hidrográfica (Horton, 1945), y puede ser representada a través de la siguiente ecuación:

$$Fs = Nu/A$$

4.2.7.13. Textura de drenaje (T).; Es uno de los parámetros más importantes en el concepto de geomorfología fluvial, ya que esta depende generalmente de la litología, capacidad de infiltración y el relieve de la superficie o corteza terrestre (López & Romero, 1987). Se representa a través de la siguiente ecuación:

$$T = Dd * Fs$$

Tabla 11. Categoría de drenaje

Textura de drenaje	
Textura	Categoría
<4	Gruesa
4 a 10	Intermedia
> 10	Fina

Nota. (Smith, 1950)

4.2.7.14. Relación de alargamiento (Re).; Representa las dimensiones de la morfología de una cuenca fluvial y depende básicamente de procesos endógenos y exógenos. Los valores de Re se clasifican en diferentes intervalos o rangos que varían desde 0.6 - 1.0 para gran parte de las cuencas; 0.6 - 0.8 para las zonas con alto relieve y 0.8 - 1.0 para un relieve muy bajo y de forma circular. Se la calcula como la razón entre el diámetro de un círculo de igual área que la cuenca y la longitud máxima de esta (S. A. Schumm, 1956). Es representada a través de la siguiente ecuación:

$$Re = D L = 1.128 * \sqrt{A} / L$$

Tabla 12. Relación de alargamiento de una cuenca

Relación de alargamiento	
Valor	Categoría
0,6 a 0,8	Zonas con alto relieve
0,8 a 1	Relieve muy bajo y de forma circular

Nota. (Schumm 1956)

4.2.7.15. Relación de circularidad (Rci).; Miller (1953), estableció este parámetro como la relación entre el área de la cuenca y el área de un círculo igual al tamaño de la cuenca, influenciada especialmente por las características litológicas de la subcuenca. El Coeficiente de Circularidad de Miller varía entre 0 y 1. Valores cercanos a 1 indican morfologías ensanchadas, mientras que un coeficiente de circularidad cercano a 0 indica que las cuencas son alargadas. Los valores disminuyen a medida que la cuenca es más alargada o rectangular y tienden a acercarse a la unidad para cuencas redondas, Además, los diferentes valores que arroje el (Rc) darán la indicación de que la cuenca se encuentra en una etapa joven, madura o senil, dependiendo de las medidas de sus índices circulatorios. Se representa con la siguiente ecuación:

$$Rci = 4\pi * A / p^2$$

4.2.7.16. Factor de forma (Ff).; Según Horton (1932), es directamente proporcional a las cuencas con lavabos anchos y circulares e inversamente proporcional a las cuencas con lavabos largos y angostos. Se lo representa por medio de la razón entre el área total de la cuenca y el cuadrado de la longitud máxima o axial de esta, las cuencas alargadas tienen un menor tiempo de concentración de flujos en comparación de las cuencas ensanchadas, lo que contribuye a que sus picos de crecidas sean menos fuertes. Se la representa a través de la siguiente ecuación:

$$Ff = A / L^2$$

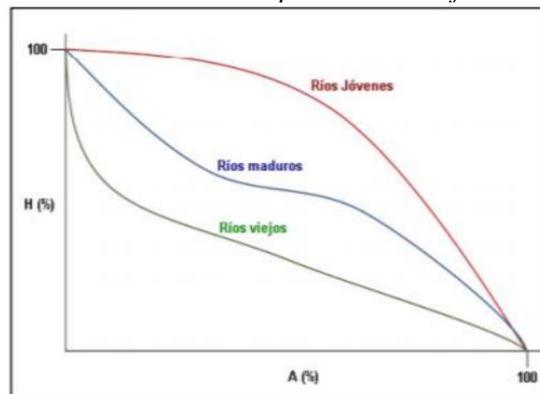
Tabla 13. Clasificación de una cuenca hidrográfica según su factor de forma

Factor de Forma	
Valor Aproximado	Forma de cuenca
<0,22	Muy alargada
0,22 a 0,30	Alargada
0,30 a 0,37	Ligeramente alargada
0,37 a 0,45	Ni alargada ni ensanchada
0,45 a 0,60	Ligeramente ensanchada
0,60 a 0,80	Ensanchada
0,80 a 1,20	Muy ensanchada
> 1,2	Redondeada

Nota. (Horton, 1932)

4.2.7.17. Curva Hipsométrica.; La curva hipsométrica representa el área drenada que varían en función de la altura de la superficie de la cuenca, es decir describe la relación entre la altura de la cuenca en un plano y su elevación. Cuando la curva hipsométrica se transforma en una función adimensional permite el estudio de similitudes entre dos cuencas y ayuda a determinar las edades de los ríos (Ibáñez et al., 2010). Según Strahler (1952), curvas convexas serán características de cuencas o ríos jóvenes, curvas con forma “S” representarán a una etapa madura, mientras que curvas cóncavas serán representativas de etapas avanzadas o “viejas”.

Figura 11. Variación de la curva hipsométrica en función de la edad del río

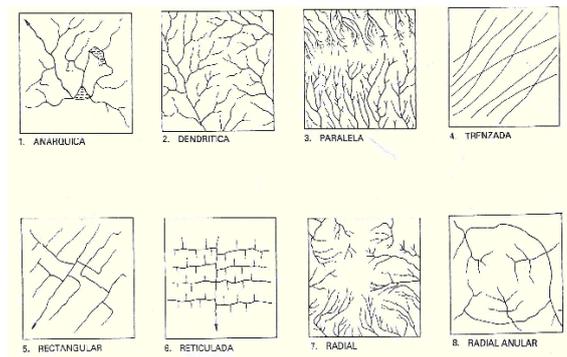


Nota. (Ibáñez et al., 2010)

4.2.8. Redes de drenaje

Corresponde a los medios por el cual el agua fluye a través de cursos fluviales desde las laderas de las montañas hasta la cuenca hidrográfica (Charlton, 2007). Existen varios tipos de drenajes en función de la forma que adoptan, entre ellos se diferencian: dendríticos, rectangulares, radiales, centrípeta, enrejada, paralela, anular y desordenada.

Figura 12. Clasificación morfológica de las redes de drenaje



Nota. (Ríos, 2013)

4.2.9. Tipos de ríos

Pérez, G, et al, (2019), determina que el ecosistema fluvial varía en cada tramo del río, desde el nacimiento a la desembocadura, Existen diferentes tipos de ríos y se pueden clasificar en base a su actividad, caudal, geometría, morfología o composición de las aguas. Pero también por factores como la cantidad de curvas o meandros, divisiones o bifurcaciones.

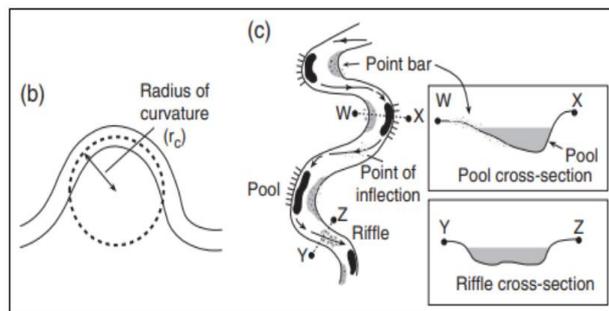
- **Ríos estacionales:** son los que están ubicados en zonas donde las estaciones son muy diferentes entre sí. Alternando las temporadas de sequía y de lluvias. Por tanto, presentan grandes diferencias de caudal en función de la estacionalidad. Suelen encontrarse en zonas de alta montaña, pero también en zonas bajas.
- **Ríos perennes:** Son los que se suelen ubicar en zonas con grandes precipitaciones. No es habitual que se presenten grandes cambios de caudal durante el año, ya que cuentan con un aporte de agua constante.
- **Ríos Alóctonos:** Son aquellos ríos que atraviesan zonas muy secas, áridas o incluso desérticas. Esto es así ya que su nacimiento se encuentra a muchos kilómetros y es una zona muy lluviosa o húmeda. Dos ejemplos son el río Colorado en USA o el Nilo.
- **Ríos transitorios:** Se encuentran en zonas de clima desértico o muy seco. Su caudal es muy variable. Puede fluir libremente durante varios kilómetros y posteriormente desaparecer durante varios meses, volviendo a surgir cuando caen fuertes lluvias. Este tipo de río representan un gran peligro, ya que cuando llueve fuertemente, pueden reaparecer con gran violencia en forma de fuertes riadas.
- **Ríos meandriformes:** Por norma general, tiene un canal único pero que en su discurrir, tiene o forma un gran número de meandros. Adoptando así una forma muy sinuosa que lo caracteriza. Y es que debido a que sus aguas tienen una velocidad variable por las curvas, son capaces de erosionar el terreno y a la vez crear zonas de sedimentos.

- **Ríos Anatomosados:** se caracterizan por contar con diferentes canales y son capaces de transportar gran cantidad de sedimentos y materiales. Al tener poca energía, si se topan con un obstáculo, en lugar de erosionarlo, los rodean si es posible. Los ríos anatomosados pueden formar en ciertas ocasiones islas sedimentarias.
- **Ríos Rectilíneos:** este tipo de río están formados por un canal principal y algunas pequeñas bifurcaciones inestables. Normalmente, y debido a su naturaleza, estas corrientes suelen tener una gran potencia y capacidad de erosión (Arias, P. 2017)

4.2.10. Parámetros de ríos

4.2.10.1. Radio de curvatura (Rc); El radio de curvatura (Rc) según Charlton (2007), es un indicador de la deflexión y extensión de las curvas que forman un río meándrico. Mide la distancia que hay desde el punto central de la morfología casi circular de uno de los meandros hasta uno de los extremos de la periferia del río (Arias, P. 2017).

Figura 13. Estimación del Radio de curvatura en un río



Nota. (Charlton, 2007)

4.2.10.2. Índice de Sinuosidad (SI); Charlton (2007), define este parámetro como un indicador de que tan flexible es un río o canal. Existen actividades antropogénicas, como las excavaciones aluviales en bancos de arena, que causan variación en el índice de sinuosidad (Sapkale, 2010). La sinuosidad (Sr) establece una relación inversamente proporcional entre la longitud del radio de curvatura del meandro y la longitud del valle, puede ser definida a través de la siguiente ecuación: $SI=L / l$

Además, Tiwari et al. (2016), propuso en base a los valores de sinuosidad una clasificación para los ríos meándricos. Esta clasificación se observa en la Tabla 6:

Tabla 14. Clasificación de los ríos en base a su índice de sinuosidad.

Índice de Sinuosidad (SI)	Clasificación
SI menor a 1,05	Recto
SI entre 1,06-1,25	Devanado
SI entre 1,25-1,50	Anastomosado
SI mayor a 1,50	Meándrico

Nota. (Tiwari et al., 2016)

5. Metodología

5.1. Descripción del área de estudio

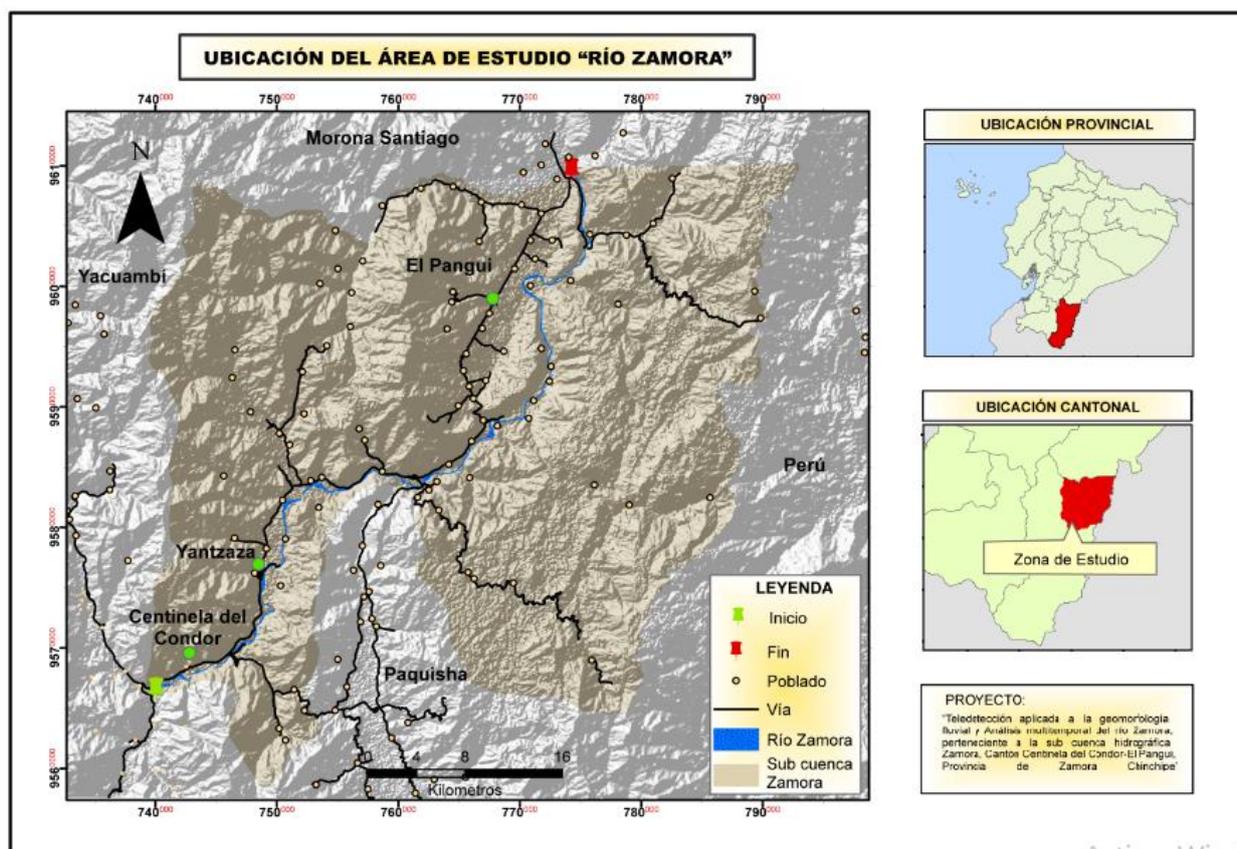
5.1.1. Ubicación

La subcuenca hidrográfica Zamora se encuentra en la región Oriental Sur del Ecuador, en la provincia de Zamora Chinchipe, principalmente sobre una orografía montañosa, esta presenta un área de 1796 km² (ver tabla 15 y figura 14). El río Zamora posee una longitud de 183 km, nace en las estribaciones del nudo de Cajanuma, en la provincia de Loja y desemboca en la provincia de Morona-Santiago donde se une al río Paute para formar el Santiago.

Tabla 15. Coordenadas y longitud del área de estudio

Área de estudio			
Puntos	X	Y	Altura
Inicio	740030m	9566605m	900m
Final	774623m	9609776m	1000m
Longitud del río a analizar			78 km

Figura 14. Ubicación del área de estudio



5.1.2. Clima

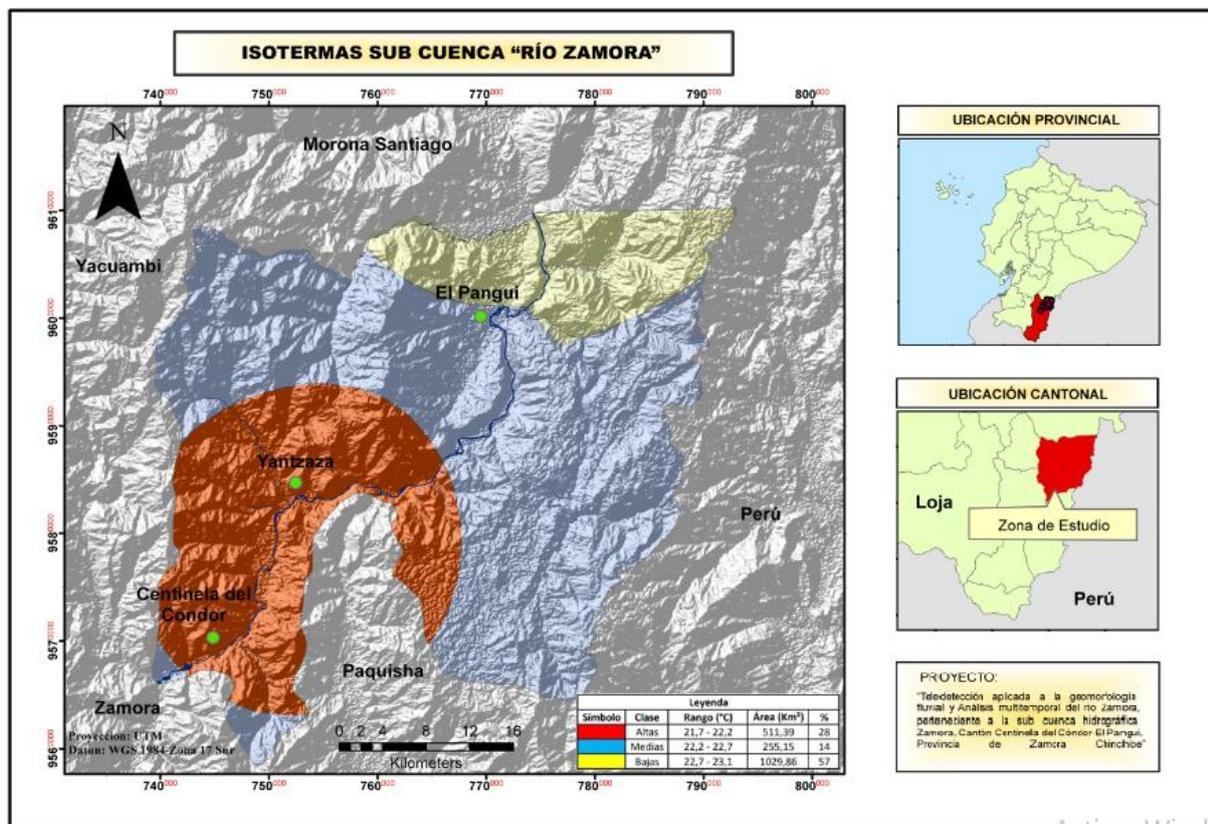
En cuando al clima del área de estudio, se recopiló información del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), en base a dicha información se identificó factores meteorológicos que condicionan el territorio, como lo es la temperatura y precipitación.

- **Temperatura**

El clima de la provincia de Zamora Chinchipe es típicamente mediterráneo (templado-cálido, seco-subhúmedo, progresivamente menos húmedo hacia el interior, con una neta disminución de la oceanidad y un notable aumento de la continentalidad de oeste a este.), con variaciones importantes en la cantidad de humedad y cantidad de lluvia, la temperatura baja o sube de acuerdo a la altitud y los vientos.

Con los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas (período 1994-2013): Gualaquiza (Código: M0189), Yantzaza (Código: M190), La Argelia (Código: M033), Vilcabamba (Código: M144), se elaboró el mapa de isotermas del área de estudio en la que se obtienen temperaturas de 21,7 a 23,1 °C (ver figura 15).

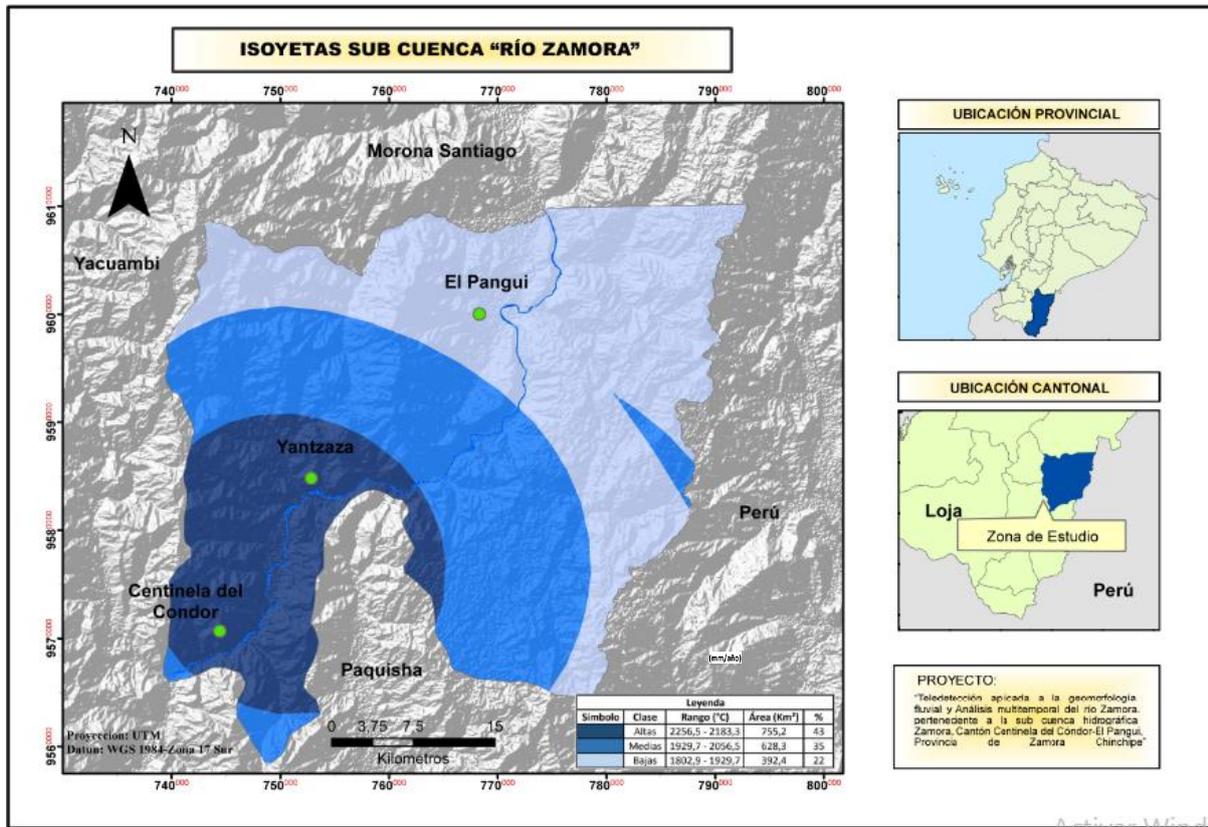
Figura 15. Mapa de temperaturas medial de la zona de estudio



- **Precipitación**

Para obtener el mapa de precipitación del área de estudio se lo realizó en base a datos de las estaciones meteorológicas (período 1994-2013): Gualaquiza (Código: M0189), Yantzaza (Código: M190), La Argelia (Código: M033), Vilcabamba (Código: M144), de esta manera se obtuvieron precipitaciones de 1802,9 a 2183 (ver figura 16).

Figura 16. Mapa de precipitación media de la zona de estudio



5.1.3. Hidrografía

El área de estudio se encuentra ubicada en la subcuenca hidrográfica Zamora perteneciente a la cuenca hidrográfica Santiago, el río Zamora es uno de los principales sistemas fluviales o red de drenaje del Ecuador, recorre 105 Km hasta llegar al cantón Zamora, drena un área de 11.369 km² desde su nacimiento en el parque nacional Podocarpus, específicamente del Nudo de Cajanuma hasta su unión con el río Namangoza, recibe aportes de afluentes importantes, producto de su abundante precipitación (ver tabla 16 y figura 17)

Por la margen izquierda el río Zamora recibe aportes de la vertiente oriental:

- Yacuambi
- Chicaña
- Chuchumletza
- Bomboiza
- Panantza e Indanza

Por la margen derecha, los ríos que drenan la cordillera Oriental del Cóndor:

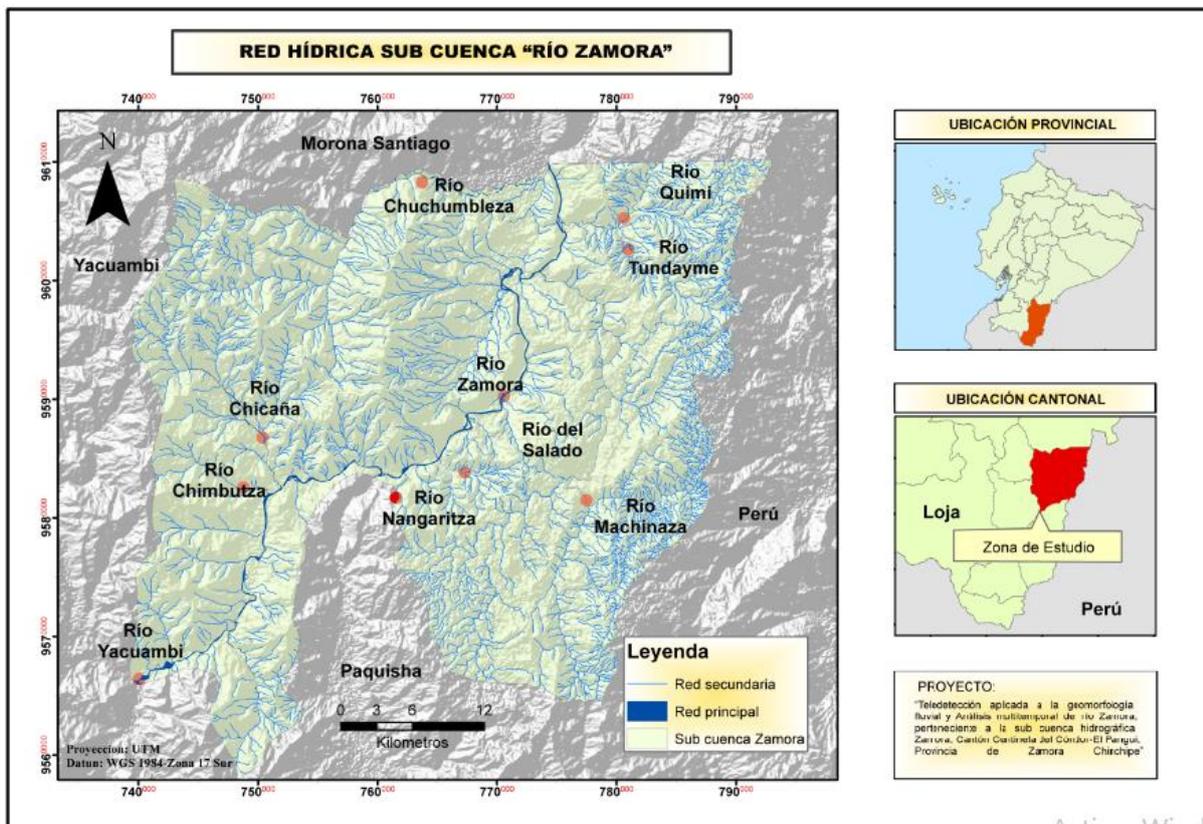
- Bombuscara
- Jambué
- Nangaritzza

Tabla 16. Red hidrográfica de la zona de estudio

Cuenca	Subcuenca	Afluentes	Longitud (km)
		Río Chicaña	24,2 km
		Río Chimbutza	11,8 km
		Río Chuchumbleza	25,9 km
		Río Del Salado	13,3 km
		Río Machinaza	45,2 km
Santiago	Zamora	Río Nangaritza	47,5 km
		Río Quimi	35,1 km
		Río Shaime	16,3 km
		Río Tundayme	47 km
		Río Yacuambí	85 km
		Río Zamora	183 km

Nota. Tomado de (IGM, 2015)

Figura 17. Mapa hidrográfico de la zona de estudio



5.1.4. Geología regional

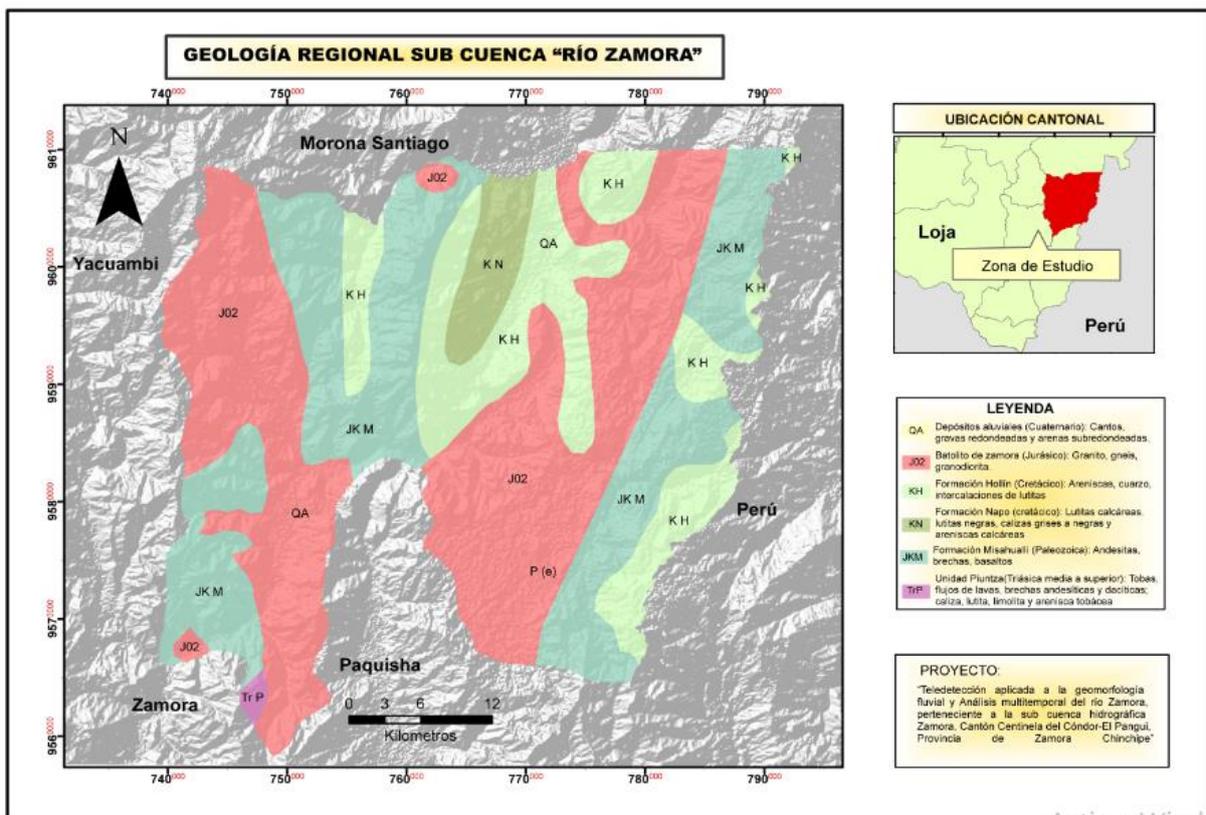
Las unidades geológicas que se identificaron entorno al área de estudio son 6, a continuación, se describen dichas unidades (ver figura 18):

- **Batolito de Zamora:** El Batolito de Zamora es una intrusión granitoidea de edad Jurásica, asociado sobre las rocas volcánicas de la unidad Misahualli (Litherland et. Al., 1994), en donde la Unidad Piuntza forma un techo erosionado y moderadamente plano, localizados en los terrenos topográficamente elevados en donde se puede notar sedimentos marinos superficiales y epicontinentales del Cretácico sobreyaciendo discordantemente al arco magmático (Cuenca, 2015).
- **Formación Hollín (KH):** Esta unidad se la evidencia a 3 k m al sur de Yantzaza en la vía Yantzaza-Zumbi, quebrada Cuji (UTM: 748 491E/9 572 979N) y en el sector de Nanguipa Bajo. La litología en la zona de estudio comprende areniscas de colores blanquecinos, estratificados, compuestos de cuarzo, con buen sorteo de granos, cementados con sílice producto de alteración hidrotermal y poco material ferruginoso. Las areniscas cuarzosas se presentan con intercalaciones de lutitas muy finas menores a 1 cm de espesor. (Watson y Sinclair, 1927).
- **Formación Napo (KN):** Se encuentra al oeste de Yantzaza, con claros afloramientos en la vía perimetral de la población de Yantzaza y en las quebradas de Pita y Yantzaza. Litológicamente se encuentran lutitas calcáreas de color negro, de textura filítica a pizarrosa, se presentan fílsiles y ocasionalmente se evidencia la estratificación. En el sector de Yantzaza, en la quebrada de Pita Alto, estas rocas fueron afectadas por un pórfido cuarcífero, que las está deformando especialmente en sus contactos y como resultado se tienen plegamientos locales y un leve metamorfismo de contacto. (Watson y Sinclair, 1927).
- **Formación Misahuallí (jm):** Rocas andesíticas de esta unidad afloran en la cumbre de la cordillera de El Cóndor entre Miazi y Maycu, yacen debajo de la Fm. Hollín. Son andesitas masivas gris verdosas, de textura afanítica a subporfirítica, se intercalan delgadas capas de brecha gris verdosa con clastos de basalto y andesita basáltica. No se dispone de datos geoquímicos de estas rocas; sin embargo, por su naturaleza petrográfica andesítica se interpreta como originada en un arco continental calco-alcalino compatible con la intrusión del Complejo Zamora (Romeuf et al., 1995).
- **Unidad Piuntza (TrP):** Formada por una serie estratificadas de volcanosedimentos continentales y marinos: tobas, flujos de lavas, brechas andesíticas y dacíticas; caliza,

lutita calcárea, limolita y arenisca tobácea. Su contacto con el Complejo Intrusivo de Zamora ha generado cuerpos metasomáticos de skarn aurífero localizados en las áreas mineras de Piuntza y Nambija; afloran en la Q. Nambija y se amplía hasta la Sultana del Cóndor y Guaysimi Alto. En el contrafuerte de Nanguipa aflora en sentido N-S, como techo colgante del Complejo Intrusivo de Zamora; yace sobre la U. Plan del Oso y bajo la U. La Saquea en contactos discordantes. (Litherland et al., 1994).

- **Depósitos Aluviales (QA).** Los depósitos aluviales más importantes se encuentran en las riberas de los ríos Zamora, Yacuambi, Chicaña y en las quebradas principales. Consisten de cantos, gravas redondeadas y arenas subredondeadas, es material transportado por los ríos y su composición depende de las unidades litológicas por donde atraviesa. Cabe mencionar que en algunos sitios de estos aluviales se ejecutan labores de extracción de oro (Litherland et al., 1994).

Figura 18. Mapa Geológico Regional de la subcuenca Zamora



Nota: Datos para elaboración obtenidos de: (SIGTIERRAS, 2015)

5.2. Materiales

5.2.1. Materiales de geoprocesamiento

Materiales de Geoprocesamiento			
Insumo	Escala	Fuente	Año
Carta geológica de Zamora	1:100 000	IIGE	2017
Cartas topográficas formato shp de Yantzaza, Zumbi, Los Encuentros, El Pangui.	1:50.000	IGM	2013
Geopedología	1:25 000	SIGTIERRAS	2015
Imágen de satélite subcuenca Zamora	5m/pixel	Bing Satélite	2022

Imágenes multiespectrales			
Insumo	Escala	Satélite	Fecha
LT05	30x30 m	Landsat 5	20/03/1985
LT05	30x30 m	Landsat 5	10/02/1990
LT05	30x30 m	Landsat 5	24/07/1996
LT05	30x30 m	Landsat 5	05/09/2000
LT05	30x30 m	Landsat 5	08/24/2007
LT07	30x30 m	Landsat 7	09/09/2010
LT08	30x30 m	Landsat 8	02/11/2015
LT08	30x30 m	Landsat 8	14/06/2022

5.2.2. Materiales de campo

- Herramientas de campo: machete, pala, mapas y/o cartas impresas, libreta de campo.
- Brújula
- GPS
- Cámara fotográfica.
- Equipos de protección: Casco, zapatos de campo, chaleco.
- Lupa Geológica

5.2.3. Materiales de oficina

- Memoria técnica de Geopedología y temáticas derivadas (SIGTIERRAS, 2015)
- Computadora
- Calculadora
- Software: ENVI, AutoCAD 2018, ArcGIS 10.5 Google Earth.

5.3. Métodos

Para el desarrollo de la presente investigación se siguieron los lineamientos de los análisis multitemporales, los cuales consisten en la obtención de información periódica de un mismo lugar a lo largo del tiempo, con el fin de poner en evidencia la evolución de ciertos rasgos en el territorio (Pinilla, 2020).

Para lograr los objetivos planteados, como primer punto, se realizó el cálculo de los parámetros de la cuenca hidrográfica propuestos por Horton, (1945a), Rai et al., (2020), López & Romero, (1987), S. A. Schumm, (1956)., lo que sirvió en un principio para conocer el comportamiento y naturaleza de la cuenca, para el análisis multitemporal se extrajo el modelo de los cuerpos de agua de cada periodo mediante imágenes satelitales aplicando el Normalized Difference Water Index (NDWI), propuesto por McFeeters (1996), este consiste en un método desarrollado para delinear los cuerpos de agua, maximizando la reflectancia del agua y minimizando la reflectancia de suelos y vegetación, posterior se realizó la extracción de estos cuerpos mediante métodos de clasificación no supervisada (Ministerio del Ambiente, 2013), la cual crea agrupamientos espectrales, los cuales al ser vectorizados sirven para la interpretación del comportamiento del río tomando en cuenta parámetros como: distancia de desplazamiento, dirección de desplazamiento, radio de curvatura y sinuosidad.

5.3.1. Metodología para el primero objetivo

“Calcular los parámetros morfométricos ligados a la subcuenca hidrográfica Zamora.”

5.3.1.1. Selección de información base.

Esta fase consistió en la recopilación de información cartográfica digital, visitas de campo para reconocimiento del terreno y levantamiento de información. Para el cálculo de parámetros morfométricos de la cuenca, se recopiló información digital del Geoportal IGM y del GAD Provincial Zamora Chinchipe, la información digital recopilada es:

- Cartas topográficas de libre acceso, escala 1:50.000, formato shp: Los Encuentros, Pangui, San José de Yacuambi, Yantzaza, Zumbi
- Cartas topográficas reservadas, escala 1:50.000, formato shp: Paquisha, Jiménez Banda, Río Cenepa, Cóndor Mirador.
- Subcuencas de la provincia de Zamora Chinchipe formato shp.

5.3.1.2. Procesamiento de la información cartográfica y cálculo de parámetros.

En esta fase se realizó el procesamiento de las curvas de nivel, red hídrica y el polígono de estudio (subcuenca Zamora) a fin de modelar el flujo de agua a través de una superficie y extraer información hidrológica necesaria para los cálculos, los datos que se obtendrán son:

área, longitud, perímetro, orden de flujo, longitud de flujo y número de flujo, aplicando las diversas herramientas de hidrología que ofrece el software ArcGIS (cuena, rellenar, acumulación de flujo, dirección de flujo, distancia de flujo, clasificación de cursos de agua, vínculos de cursos de agua, etc.).

Como primer paso se determinó el área, longitud, perímetro, altura máxima, altura mínima, pendiente media de cuena, orden de flujo, número de flujo y longitud del flujo en el software ArcGIS, con estos parámetros obtenidos se calculó los parámetros restantes mediante las fórmulas establecidas en la siguiente tabla:

Tabla 17. *Parámetros morfométricos*

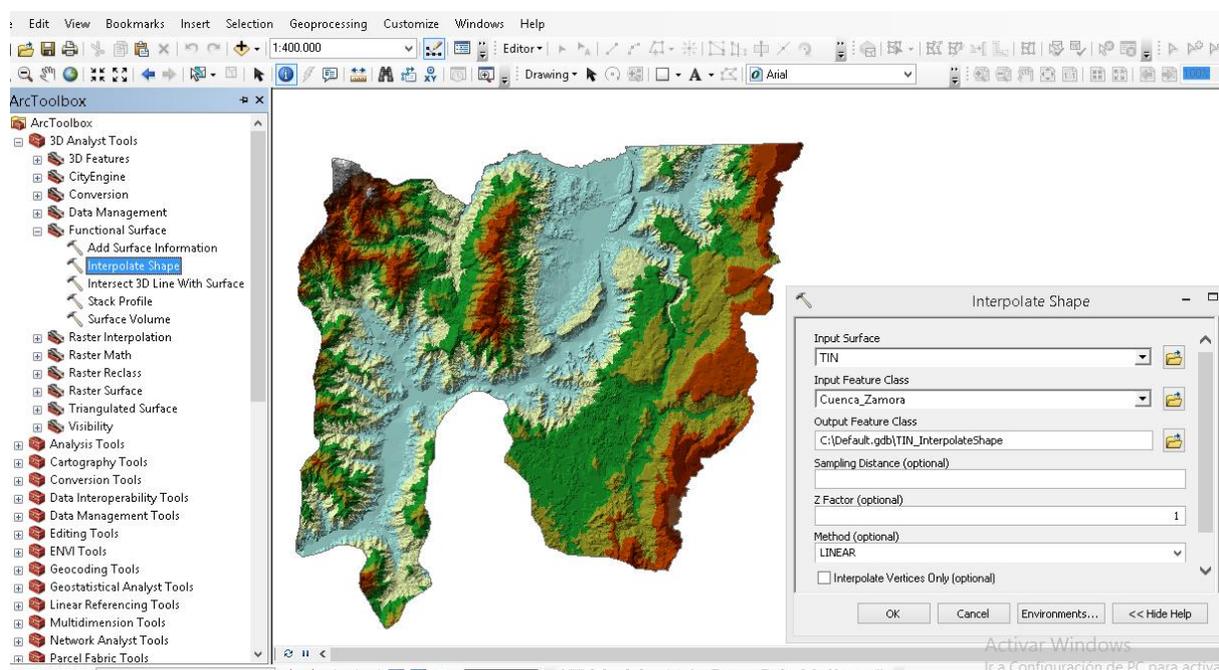
N°	Nombre	Símbolo	Fórmula
1	Área (km ²)	A	
2	Longitud (km)	L	
3	Perímetro (km)	P	
4	Pendiente promedio de cuena %	S	
5	Altura máxima	H	
6	Altura mínima	h	
7	Orden de flujo	U	
8	Número de flujo	Nu	$Nu=N_1+N_2+N_3+...N_n$
9	Longitud del flujo (km)	Lu	$Lu=L_1+L_2+L_3+...L_n$
10	Longitud media del flujo	Lsm	$Lsm=\frac{Lu}{Nu}$
11	Relación de longitud del flujo	Rl	$Rl=\frac{Lu}{Lu-1}$
12	Relación de bifurcación	Rb	$Rb=\frac{Nu}{Nu+1}$
13	Densidad de drenaje	Dd	$Dd=\frac{Lu}{A}$
14	Frecuencia de flujo	Fs	$Fs=\frac{Nu}{A}$
15	Textura de drenaje	T	$T=Dd*Fs$
16	Relación de alargamiento	Re	$Re=\frac{1,128*\sqrt{A}}{L}$
17	Relación de circularidad	Rci	$Rci=\frac{4\pi*A}{p^2}$
18	Factor de forma	Ff	$Ff=\frac{A}{L^2}$

Cálculo de área y perímetro

Para obtener el área, perímetro y otros elementos relativos a la elevación de la cuenca se realizó la interpolación entre el polígono de la subcuenca hidrográfica Zamora (ver figura 19) y la superficie TIN de la misma, para esto se realizó:

- ✓ Se añaden los datos vectoriales (polígono de estudio, curvas de nivel) al espacio de trabajo en ArcGIS, estos datos representan la subcuenca Zamora y las diversas alturas que ésta posee.
- ✓ Se crea el TIN a partir del polígono de estudio y las curvas de nivel con la herramienta *3D Analyst Tools* → *Data Management* → *TIN* → *Create*, en este modelo TIN se representa la morfología de la superficie mediante la triangulación de datos de las elevaciones de la cuenca.
- ✓ Se realiza la interpolación entre el TIN y el polígono de estudio mediante la herramienta *3D Analyst Tools* → *Functional Surface* → *Interpolate Shape* esto con el fin de crear un modelo vectorial de la cuenca interpolada a los valores de elevación de la superficie.

Figura 19. Interpolación entre el TIN y el polígono de la subcuenca



- ✓ Finalmente se realizó el cálculo de los datos, en el modelo vectorial interpolado *Open attribute table* → *Table Options* → *Add Field*, en esta ventana se elige el nombre del parámetro a calcular, tipo, precisión y escala, por último, en el campo creado se realiza el cálculo del área, perímetro y alturas máximas y mínimas con ayuda de la *Calculate Geometry*.

Pendiente promedio de cuenca (%)

El cálculo de la pendiente media se lo determina mediante el procesamiento del DEM, el modelo digital de elevación contiene un modelado cuantitativo y permite el análisis de la superficie topográfica relacionándola intrínsecamente con otros componentes característicos de la superficie del terreno (ver tabla 18), para esto se realiza:

- ✓ A partir del DEM se crea el modelo de pendientes de zona de estudio *Spatial Analyst Tools*→*Surface*→*Slope*, esta herramienta identifica la inclinación en cada celda de una superficie de ráster mediante el promedio de sus pendientes, mientras menor sea el valor de la pendiente, más plano será el terreno y mientras más alto sea el valor de la pendiente, más empinado será el terreno.
- ✓ Se reclasifica los valores del ráster de pendientes (slope) obtenido anteriormente, en intervalos iguales y 10 clases *Spatial Analyst Tools*→*Reclass*→*Reclassify*.
- ✓ Se realiza el resumen de los valores de las pendientes (Slope) dentro de las zonas de pendientes del ráster reclasificado (Slope_reclass) *Spatial Analyst Tools*-*Zonal*→*Zonal*→*StatisticsAsTable* este resultado se los obtiene como una tabla de datos.
- ✓ Finalmente, la pendiente media se obtiene mediante la razón entre el número de ocurrencias totales y el promedio de ocurrencias totales obtenidos en la tabla.

Tabla 18. Valores de ocurrencias para el cálculo de pendiente media

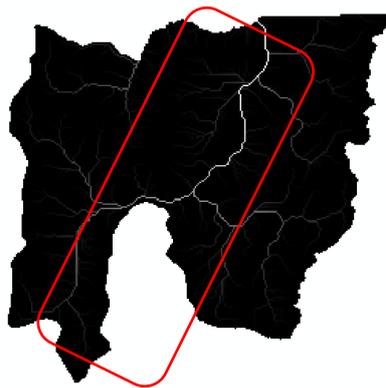
N	Cota			Número de ocurrencias	Promedio ocurrencias
	Min	Max	Promedio		
1	0	8,420231	8,420231	8983	75638,93507
2	8,42161	16,840357	8,418747	8251	69463,0815
3	16,84108	25,258961	8,417881	7328	61686,23197
4	25,261339	33,680759	8,41942	6126	51577,36692
5	33,687126	42,099312	8,412186	4270	35920,03422
6	42,10651	50,519482	8,412971	2257	18988,07555
7	50,523281	58,940102	8,416821	983	8273,735043
8	58,951462	67,214569	8,263107	281	2321,933067
9	67,379669	75,637703	8,258034	69	569,804346
10	75,790779	84,203682	8,412903	14	117,780642
Suma				38562	324556,9783
				Pendiente %	8,42

Cálculo de la longitud

Este parámetro se lo obtuvo calculando la longitud de la ruta de flujo más larga dentro de una cuenca, se calculó la distancia de la pendiente descendente a lo largo de la ruta de flujo, desde cada celda hasta la salida en el borde del ráster, esto se lo realizó con el modelo digital de elevación (DEM) (ver figura 20), ya que proporciona una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar de la cuenca.

- ✓ Para esto se utiliza el TIN creado anteriormente y la herramienta *3D Analyst Tools*→*Conversión*→*From TIN*→*TIN to Raster* a fin de obtener el modelo digital de elevación (DEM).
- ✓ Se realiza el relleno de sumideros en el DEM para quitar imperfecciones en los datos, esto debido a que existen celdas con una dirección de drenaje indefinida y las celdas que lo rodean son más bajas *Spatial Analyst Tools*→*Hydrology*→*Fill*.
- ✓ Se crea la dirección de flujo desde cada celda hasta su vecina con la pendiente descendente más empinada *Spatial Analyst Tools*→*Hydrology*→*Flow Direction*, esto se realiza luego de haber corregido las imperfecciones del DEM.
- ✓ Por último, se calcula la distancia aguas arriba (upstream), el cual es la longitud de la ruta de flujo más larga dentro de una cuenca dada, esto se realiza a partir de la dirección de flujo y la herramienta *Spatial Analyst Tools*→*Hydrology*→*Flow Length*.

Figura 20. Longitud de flujo más largo dentro de la cuenca



Orden de flujo

La clasificación de flujos es un método que asigna un orden numérico a los vínculos en una red de flujos. Este orden es un método para identificar y clasificar los tipos de flujos basado en la cantidad de afluentes. Para determinar este parámetro se aplica la clasificación de flujos propuesta por Strahler (1952), para esto se clasificó los flujos de la red hídrica de la subcuenca Zamora como flujos más pequeños o de primer orden a los canales que no tienen

efluentes; los de segundo orden están constituidos por la unión de los canales de primer orden; los canales de tercer orden son formados por la unión de los canales de segundo orden y así sucesivamente, hay que tener en cuenta que la intersección de dos flujos de distintos órdenes no aumentará el orden.

Número de flujo

Para determinar este parámetro se realizó la sumatoria del número total de flujos de primer orden con los flujos de segundo orden y así sucesivamente, el resultado será el número de flujos totales presentes en la subcuenca de estudio, el dato se obtuvo de forma automática mediante la herramienta de “Resumen estadístico” (ver tabla 19).

Tabla 19. *Número de flujos de cada orden*

Orden	Número de flujos
1	2280
2	534
3	129
4	30
5	8
6	3

Longitud de flujo

Para determinar este parámetro se realizó la sumatoria de las longitudes de flujo de primer orden con las longitudes de flujo de segundo orden y así sucesivamente, el resultado será la longitud de flujo total de la red hídrica de la subcuenca de estudio, el dato se obtuvo de forma automática mediante la herramienta de “Resumen estadístico”, en la tabla de atributos (ver tabla 20).

Tabla 20. *Longitud de flujo de cada orden*

Orden	Longitud de orden
1	1777,65
2	590,97
3	286,27
4	133,48
5	116,73
6	112,96

Longitud media del flujo

Este parámetro se determinó mediante la razón entre longitud de flujos y número de flujos obtenidos anteriormente.

Relación de longitud del flujo

Se obtuvo mediante la razón entre la longitud de flujo de un determinado orden y el próximo orden inferior de los segmentos de flujo de la cuenca, Ej.:

$$Rl = \frac{\text{Longitud total de flujos de orden 6}}{\text{Longitud total de flujos de orden 5}}$$

Relación de bifurcación

Se la calculó mediante la razón entre el número de cauces de un orden determinado con el próximo orden superior en una red de drenaje, Ej.:

Densidad de drenaje $Rl = \frac{\text{Número total de flujos de orden 5}}{\text{Número total de flujos de orden 6}}$

Este parámetro se obtuvo mediante la razón entre la longitud total de la red hidrográfica y el área total de la cuenca hidrográfica, se representa mediante la siguiente fórmula:

$$Dd = \frac{Lu}{A}$$

Donde:

Dd: Densidad de drenaje

Lu: Longitud total de la red hídrica

A: Área de la cuenca en Km²

Frecuencia de flujo

Se lo calculó mediante la división entre el número total de flujos de la cuenca hidrográfica y el área total de la misma, se representa mediante la siguiente fórmula:

$$Fs = \frac{Nu}{A}$$

Donde:

Fs: Frecuencia de flujo

Nu: Número total de redes de drenaje

A: Área de la cuenca en Km²

Textura de drenaje

Este parámetro se determinó mediante el producto de la frecuencia de flujo (Fs) y la densidad de drenaje (Dd), se representa mediante la siguiente fórmula:

$$T = Dd * Fs$$

Donde:

Dd: Densidad de drenaje

Fs: Frecuencia de flujo

Relación de alargamiento

Se lo calculó como la razón entre el diámetro de un círculo de igual área que la cuenca y la longitud máxima de esta, se representa mediante la siguiente fórmula:

$$Re = \frac{1,128 * \sqrt{A}}{L}$$

Donde:

Re: Relación de alargamiento

A: Área de la cuenca en Km²

L: Longitud del cauce principal

Relación de circularidad

Este parámetro se determinó mediante la razón entre la superficie de la cuenca hidrográfica y el área de una circunferencia de igual estatura o relieve de esta, se representa mediante la siguiente fórmula:

$$Rci = \frac{4\pi * A}{p^2}$$

Donde:

Rci: Relación de circularidad

A: Área de la cuenca en Km²

P: Perímetro de la cuenca

Factor de forma

Se lo calculó mediante la división entre el área final de la cuenca hidrográfica y el cuadrado de la medida longitudinal general de la misma; como se evidencia en la siguiente fórmula:

$$Ff = \frac{A}{L^2}$$

Donde:

Ef: Factor de forma

A: Área de la cuenca en Km²

L: Longitud del cauce principal

5.3.2. Metodología para el segundo objetivo

“Determinar y categorizar los principales cambios morfológicos del río Zamora mediante el uso de imágenes satelitales Landsat (1985-2022).”

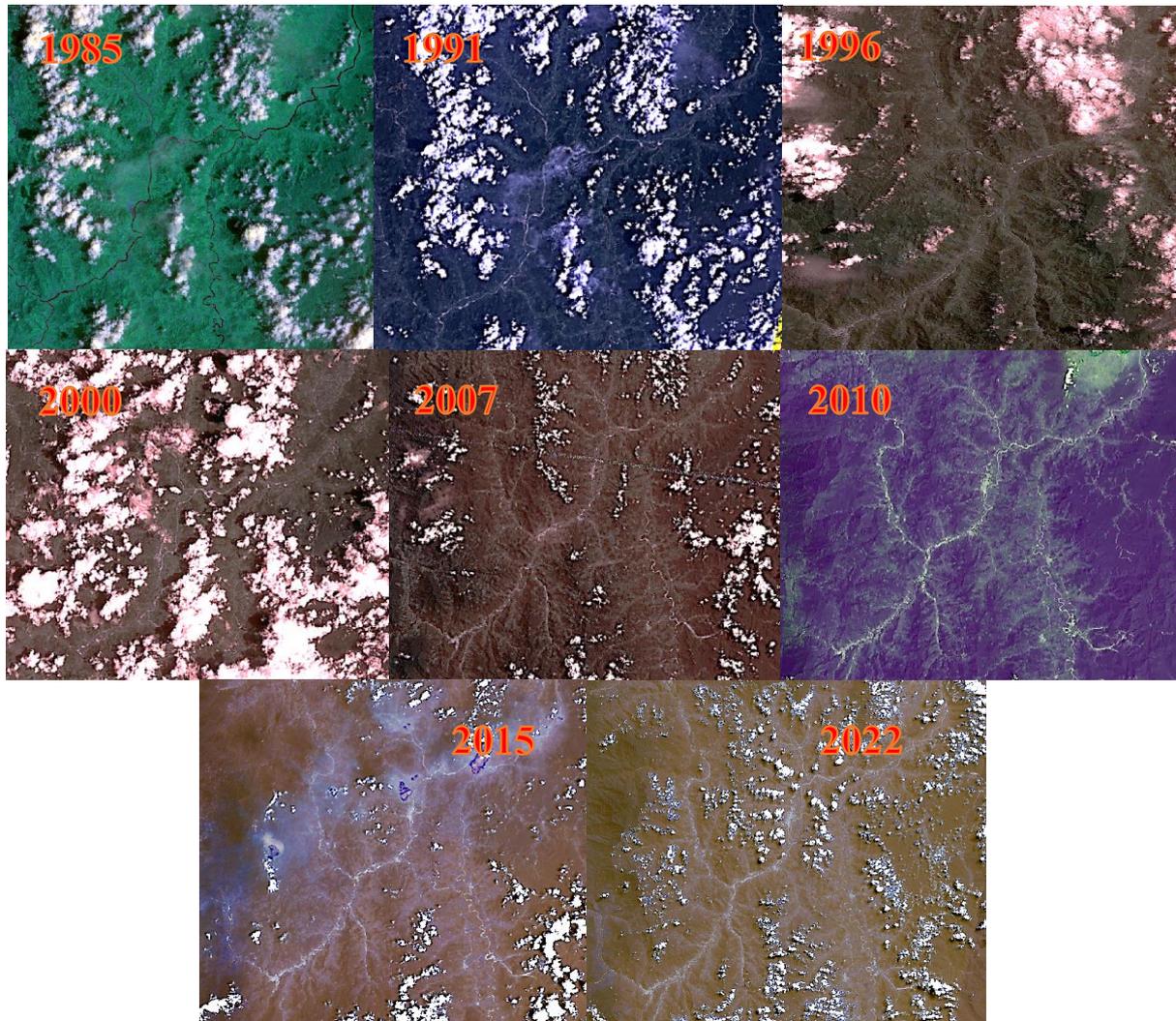
5.3.2.1. Selección de información base

Esta fase consistió en la recopilación de las imágenes satelitales, tomado en cuenta parámetros como: resolución de imagen, fechas de generación del producto, porcentajes de nubosidad, rutas y categorías de colección, la recopilación se realiza en la plataforma

EarthExplorer, USGS (Science for a changing world), en el cual se puede obtener imágenes satelitales de diferentes sensores Landsat.

Las imágenes satelitales seleccionadas para el análisis pertenecen a los años 1985-1991-1996-2000-2007-2010-2015-2022 (ver figura 21).

Figura 21. *Imágenes satelitales del periodo de estudio*



Nota. Imágenes captadas por el satélite Landsat y descargadas de la plataforma EarthExplorer

5.3.2.2. Preprocesamiento de imágenes satelitales

Esta fase consistió en corregir los errores que se manifiestan en las imágenes satelitales, estos errores ocurren debido a que una imagen satelital está sometida a una serie de interferencias producto de la interacción de la atmósfera con el sensor y hacen que la información que quiere obtenerse aparezca perturbada, para realizar el preprocesamiento se aplica la corrección radiométrica y atmosférica a todas las imágenes satelitales de los años

seleccionados a fin de disminuir o eliminar estas distorsiones y obtener resultados de mejor calidad.

El software en que se realizó el preprocesamiento y parte del procesamiento de las imágenes satelitales es ENVI 5.3, este software permite extraer información significativa de todo tipo de imágenes y es más eficiente en los procesos de análisis y visualización de la información.

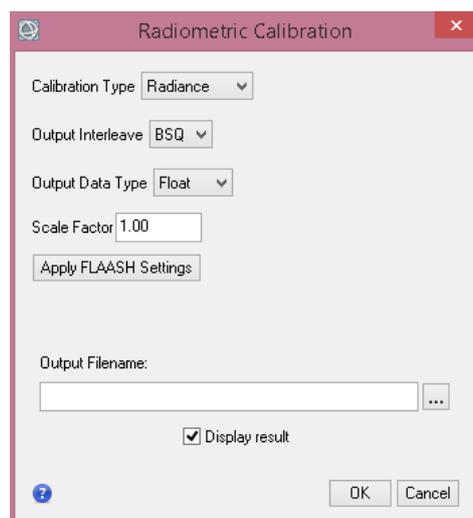
Para esto se aplica el siguiente proceso:

Se añade el archivo de imágenes satelitales al espacio de trabajo en ENVI mediante *File*→*Open as*→*Landsat*→ *Geo TIFF with metadata*→*Elegimos el archivo de imágenes satelitales*→ *ok*.

Como primer paso se realizó la corrección radiométrica, esta consiste en corregir los errores mecánicos en el sensor que generan valores erróneos en píxeles mediante la calibración de datos de la imagen según las temperaturas de radiación, reflectancia o brillo (ver figura 22), esta corrección se realiza con la herramienta *Toolbox*→*Radiometric correction*→ *Radiometric calibration*→*Seleccionamos la imagen multispectral a trabajar*→*ok*, en la selección de parámetros para la corrección radiométrica ubicamos lo siguiente:

- ✓ *Calibration type: Radiance*
- ✓ *Apply FLAASH Settings*
- ✓ *Guardamos con el nombre “radiancia”*
- ✓ *ok*

Figura 22. *Parámetros para la corrección radiométrica*



Para la corrección atmosférica se aplicó la herramienta *FLAASH Atmospheric correction*, esta modifica las longitudes de onda en las regiones visibles a través del infrarrojo

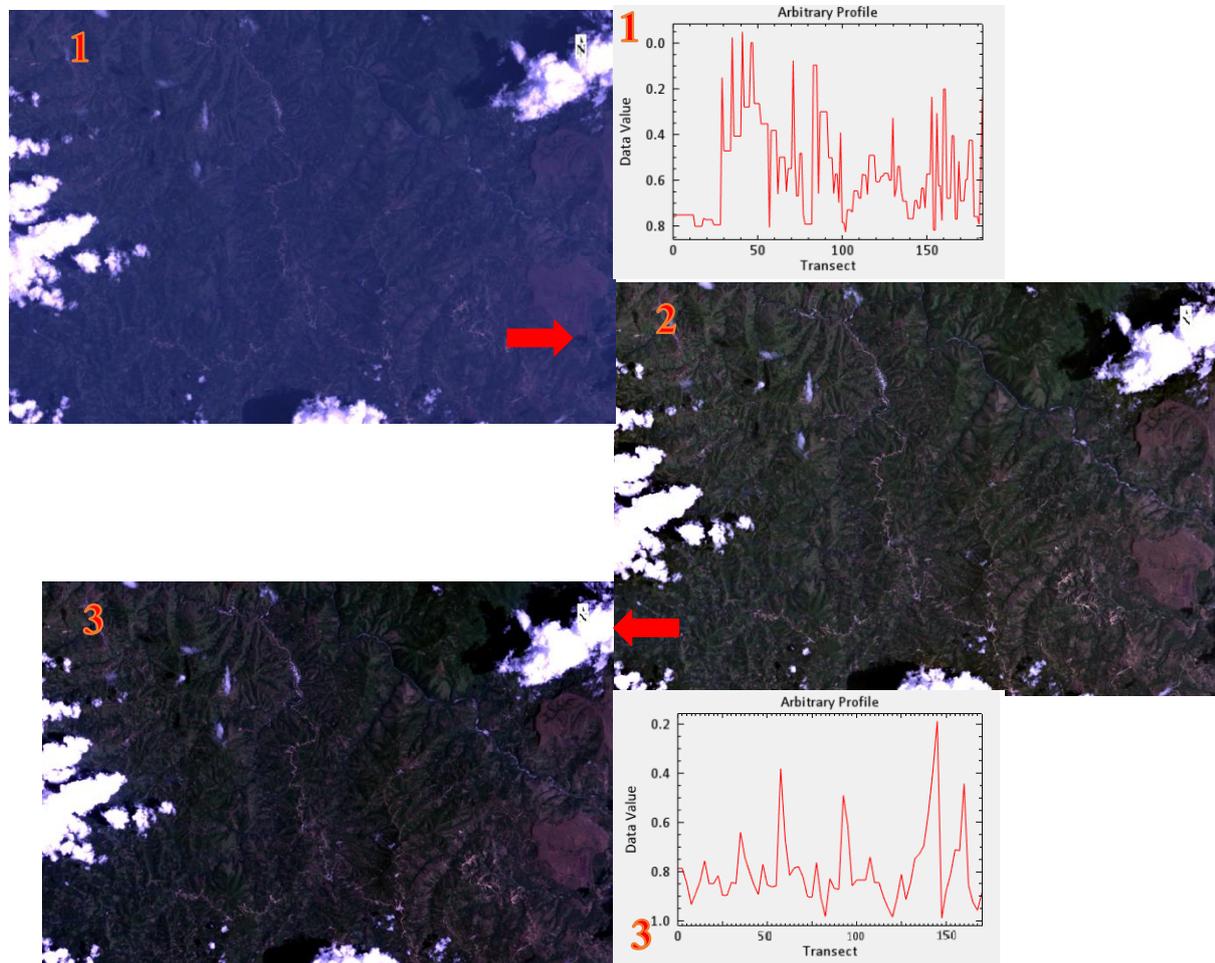
cercano y del infrarrojo de onda corta, a fin de eliminar la radiancia intrínseca que se introduce en el sensor y se ve reflejado en la imagen (ver figura 23), para esto se sigue el siguiente procedimiento *Toolbox*→ *Radiometric Correction*→*Atmospheric Correction Module* → *FLAASH Atmospheric correction*, en la selección de parámetros para la corrección atmosférica ubicamos lo siguiente:

- ✓ *Input radiance image*→*Seleccionamos el archivo de imágenes que efectuamos la corrección radiométrica anteriormente*
- ✓ *Radiance Scale Factors*→*Use single scale factor for bands*
- ✓ *Output Reflectance File* → *Colocamos el nombre de “R”*
- ✓ *Output Directory for FLAASH Files*→ *Seleccionamos la carpeta de trabajo*
- ✓ *Sensor type*→*Multispectral*→ *Seleccionamos el tipo de sensor que capto la imagen satelital, en nuestro caso “Landsat”*
- ✓ *Flight date*→*Ubicamos la fecha y hora en la que fue captada la imagen satelital, estos datos se encuentran en el archivo mtl.txt ubicado en la carpeta descargada de las imágenes satelitales*
- ✓ *Aerosol Retrieval*→*None*
- ✓ *Apply*

Figura 23.Parámetros seleccionados para la corrección atmosférica

El proceso de corrección radiométrica y atmosférica se repitió para cada archivo de imágenes de los años 1985-1991-1996-2000-2007-2010-2015-2022.

Figura 24. *Imagen sin correcciones (1), corrección radiométrica(2), corrección atmosférica(3).*



5.3.2.3. *Procesamiento de imágenes satelitales.*

Esta fase consistió en la extracción de información de las imágenes satelitales previamente corregidas, aplicando técnicas matemáticas y computacionales. Para la visualización de los cuerpos de agua se aplica el *Normalized Difference Water Index (NDWI)* el cual resalta el aspecto de las masas de agua identificando y clasificando los pixels de la imagen según su grado de saturación de humedad, una vez resaltado las masas de agua se aplica el método de clasificación no supervisada que consistió en identificar y clasificar automáticamente los pixels en función de similitud (en nuestro caso la humedad) para finalmente extraer las masas de agua para su respectivo análisis (ver figura 25).

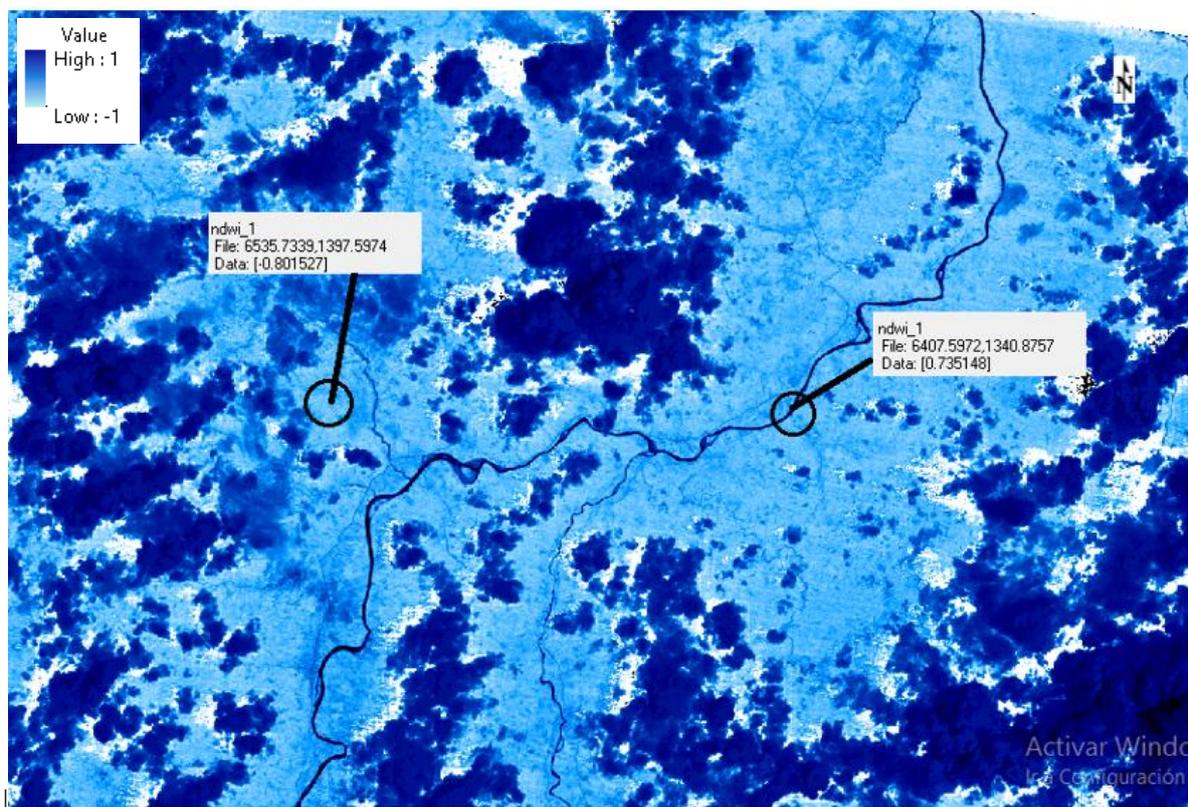
Para desarrollar esta fase se aplican los siguientes pasos:

- ✓ En el software de ENVI, se aplica el *Normalized Difference Water Index (NDWI)* con la herramienta *Toolbox* → *Band Algebra* → *Band Math* → se introduce la

expresion “ $(float(b3)-float(b2))/(float(b3)+float(b2))$ ” →ok→Variables to bands pairings →seleccionamos la banda 3 y la banda 5→ Elegimos el lugar de salida de datos→ ok.

Como resultados se obtuvo un nuevo modelo de datos (raster), donde los valores de las celdas varían entre -1 y 1, en la que las tonalidades azul oscuro (valores espectrales de 0 a 1) indican la presencia de cuerpos de agua y nubes con alto nivel de humedad, mientras que las tonalidades azul claro(valores espectrales de 0 a -1) indican la presencia de zonas con mínima o nula humedad (vegetación, suelo, zonas pobladas, etc.) (ver figura 25).

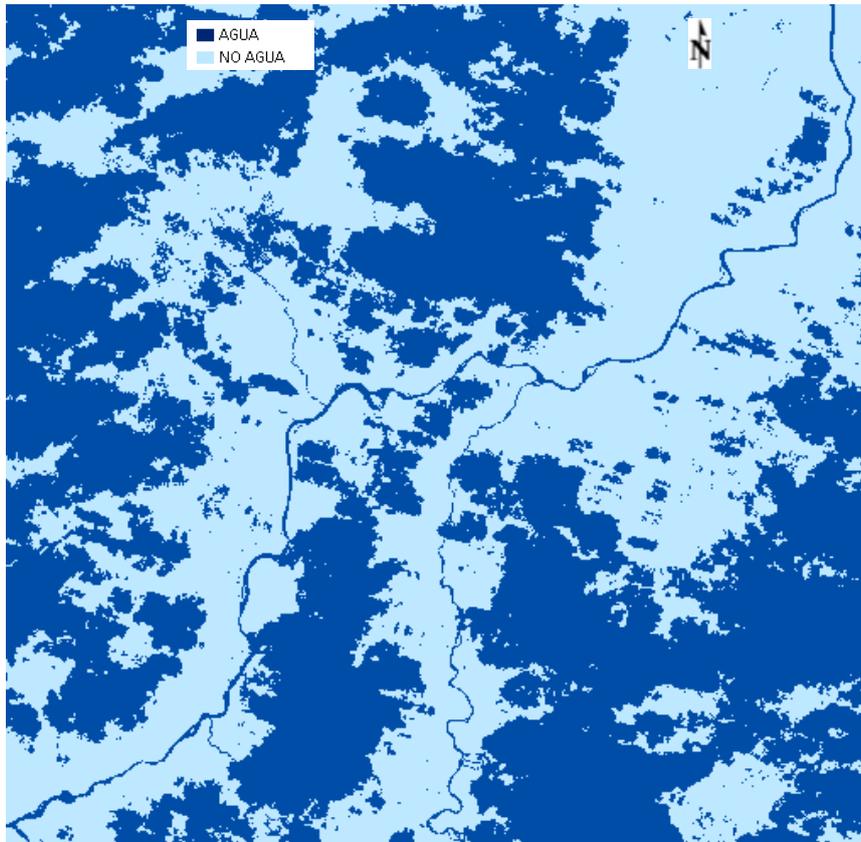
Figura 25. Imagen satelital con su aplicación del NDWI, las tonalidades oscuras poseen mayor índice de humedad y tonalidades claras poseen baja o nula humedad.



- ✓ Se realiza la clasificación no supervisada a partir del NDWI, mediante la herramienta *Toolbox* → *Classification*→*Unsupervised classification*→*K-Means Classification* → *Seleccionamos 2 para el número de clases*→ *Elegimos el sitio de salida de datos*→ ok.

Para la clasificación no supervisada, las clases se crean basándose en la información espectral de cada celda y es realizada automáticamente por la computadora. En este paso el analista especifica en 2 el número clases (cuerpos de agua y zonas con nula humedad) y se crean únicamente en función de la información numérica de las celdas. Como resultados tenemos un nuevo modelo de datos (raster) con dos únicas clases.

Figura 26. Clasificación por el método no supervisado, como resultado tenemos dos clases (cuerpos con elevada humedad y cuerpos con baja o nula humedad)



- ✓ A continuación se efectuó la conversión del modelo raster a vector para su posterior corrección manual, se realiza con la herramienta *Toolbox* → *Vector* → *Raster to vector* → *seleccionamos el archivo clasificado anteriormente en dos clases* → *Elegimos el sitio de salida de datos* → *ok*.

El procesamiento de las imágenes satelitales se repite para cada archivo de imágenes de los años 1985-1991-1996-2000-2007-2010-2015-2022.

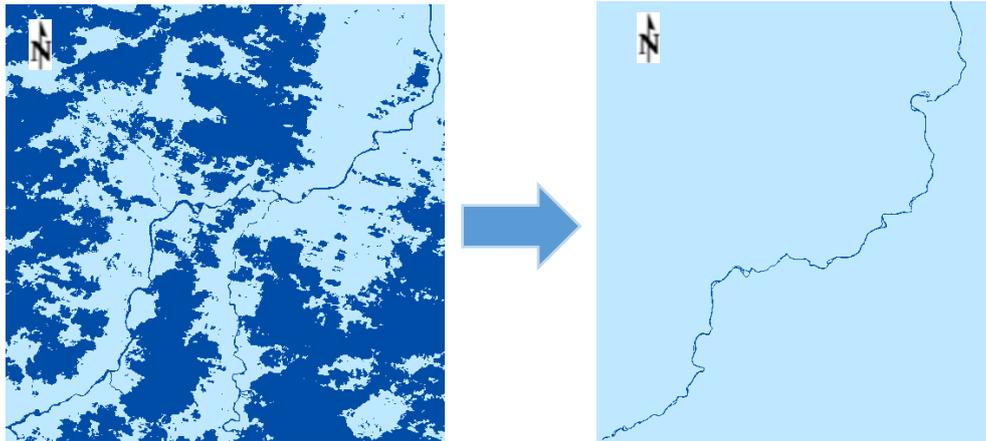
5.3.2.4. Corrección manual de datos

Para realizar la corrección, delimitación y depuración de los datos obtenidos al aplicar NDWI se utilizó el software ArcGIS debido a la facilidad para el manejo de los datos, accesibilidad y su variedad de herramientas de geoprocésamiento.

En esta fase, a criterio del analista, se eliminó manualmente la información relacionada (ver figura 27) con la nubosidad del sector y cuerpos de agua ajenos al cauce principal del río, estas correcciones se efectúan haciendo uso de la caja de herramientas de edición.

El proceso de corrección manual se repitió para cada año 1985-1991-1996-2000-2007-2010-2015-2022.

Figura 27. Río Zamora antes y después de las correcciones manuales

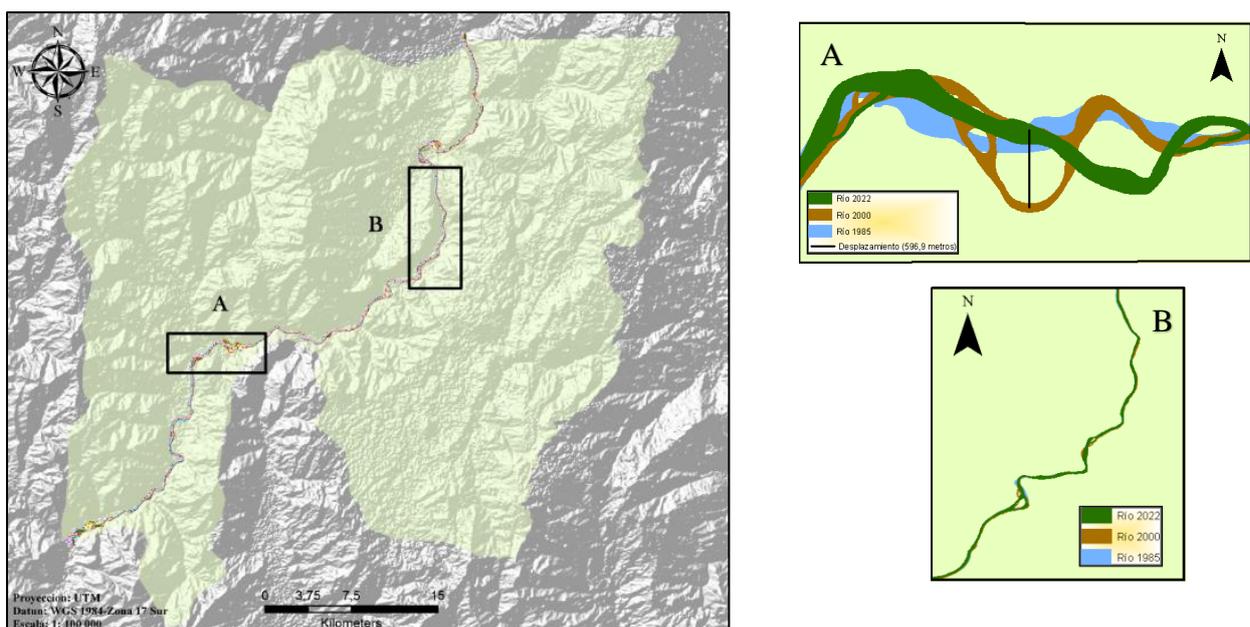


5.3.2.5. Análisis multitemporal

El análisis multitemporal de un río se ejecuta a fin de evidenciar y evaluar el comportamiento morfológico de un cuerpo hídrico a través del tiempo, este es un análisis de tipo espacial por lo que se demuestra de manera cuantitativa y cualitativa que el río Zamora posee una clara tendencia al cambio, debido a factores naturales y antrópicos que posee la zona.

En esta fase se realizó la comparación espacial de los cuerpos hídricos extraídos de las imágenes de satélite a fin de identificar todas las zonas con mayores cambios morfológicos en el tramo de estudio, esta comparación se realiza en el software ArcGIS, en el cual se agregó al espacio de trabajo todos los cuerpos hídricos extraídos previamente y se procedió a determinar tramos fluviales que presentan variaciones (ver figura 28).

Figura 28. En la imagen A se observa una zona con importantes variaciones morfológicas, mientras que en la imagen B se observa una zona bien definida.



5.3.2.6. *Parámetros geomorfométricos del río Zamora*

Los parámetros morfométricos de un río corresponden a la aplicación de procedimientos que, a través del estudio de su morfología, se caracteriza los rasgos propios de un río en valores numéricos, los cuales permiten comparar en forma exacta los tramos fluviales.

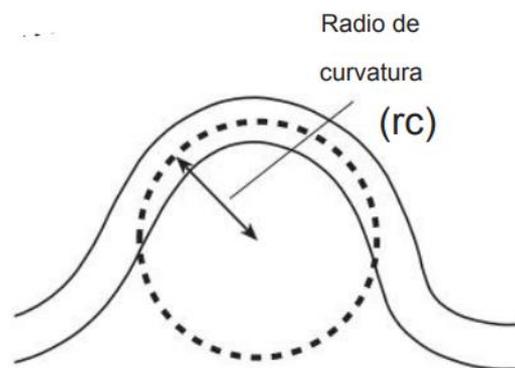
Según Charlton (2007), se utilizan varios métodos para cuantificar las características geométricas de los canales. Estos se basan en mediciones que se pueden realizar en campo, a partir de mapas, fotografías aéreas y, cada vez más, imágenes satelitales.

En esta fase se realizó el cálculo de sus parámetros geomorfométricos en de cada una de las zonas que presenta variaciones, a fin de describir la forma, deflexión y extensión de las curvas de sus meandros, tipo de tramo fluvial (recto, devanado, anastomosado, meandrico), ancho del canal y realizar la comparación de los diferentes canales obtenidos en cada periodo.

Radio de curvatura (Rc)

Para el cálculo del radio de circularidad según Charlton (2007), se mide la distancia en metros desde el punto central de la morfología casi circular de uno de los meandros hasta uno de los extremos de la periferia que conforma el canal del río (ver figura 29), este parámetro se calculó a fin de determinar la forma, angostamiento y ensanchamiento que adopta el meandro con el pasar del tiempo.

Figura 29.Radio de curvatura de un tramo fluvial



Nota. Charlton (2007)

Índice de Sinuosidad (Sr)

Este parámetro tiene una estrecha relación con el radio de curvatura, es una indicación de cuán 'curvo' es un canal, según Charlton (2007), este servirá para determinar el tipo de tramo fluvial y el aumento o disminución de la longitud del canal en la zona analizada, se calculó a partir de la razón entre el largo del canal (L) en metros y la longitud de onda del meandro (l) en metros; como se indica en la siguiente fórmula:

$$Sr = \frac{L}{l}$$

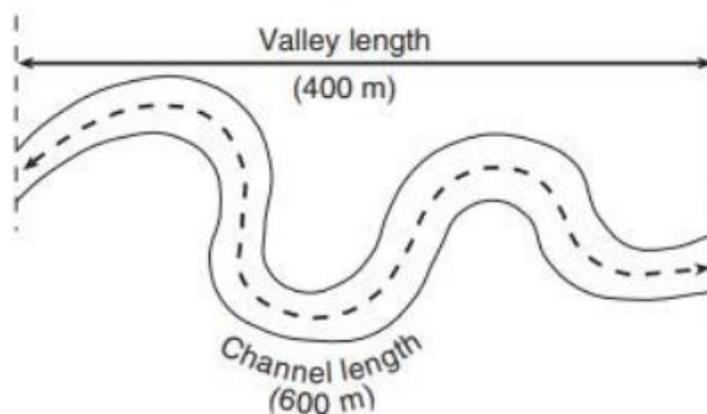
Donde:

Sr: Índice de Sinuosidad

L: Largo del canal

l: Longitud de onda del meandro

Figura 30. Largo del canal y longitud de onda del meandro



Nota. Charlton (2007)

5.3.2.7. Factores asociados a los cambios morfológicos del río Zamora

Se realizó una descripción de las zonas que poseen variaciones morfológicas, a través de recorridos en las áreas para observar las condiciones y hacer el examen respectivo de la geomorfología, geología y factores antrópicos que inciden en el comportamiento del río, se describen en términos generales la forma y composición del relieve, características presentes en la zona, como pendiente, litología, etc.

5.3.3. Metodología para el tercer objetivo

“Representar los cambios espaciales del curso del río Zamora periodo 1985-2022 (Centinela del Cóndor-El Pangui).”

5.3.3.1. Selección de información

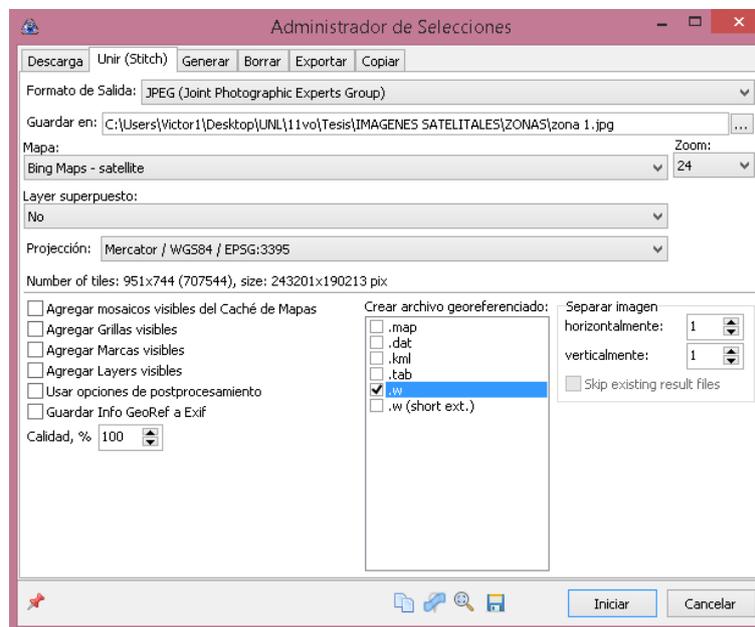
Esta fase consistió en la recopilación de las imágenes georreferenciadas color natural de las zonas de estudio, estas se obtienen del repositorio SAS.Planet el cual permite ver y descargar imágenes de satélite de alta resolución y mapas convencionales.

En el programa SAS.Planet, aplicando la herramienta *selección rectangular* seleccionamos la zona de interés, posterior a la selección aparece auténticamente la ventana para configurar la descarga y aplicamos lo siguiente: *seleccionamos el número de niveles de zoom en 24 para tener una mejor apreciación de los elementos presentes en la zona →Iniciar → Esperamos que concluya el proceso→salir.*

Como siguiente paso seleccionamos en la barra de herramientas la opción *Administradora de secciones*→*Última selección*→*Unir* en esta ventana se ubican las siguientes características para descargar la imagen (ver figura 31):

- ✓ *Formato de salida: Seleccionamos la carpeta de descarga de datos*
- ✓ *Zoom: Seleccionamos el nivel de zoom marcado en el anterior paso (24)*
- ✓ *Proyección: Mercator WGS 84*
- ✓ *Calidad: 100%*
- ✓ *Extensión: .w (esta Extensión permite descargar la imagen georreferenciada)*
- ✓ *Iniciar*

Figura 31. *Parámetros para la descarga de imagen*



5.3.3.2. *Representación espacial*

Los ríos cuentan con una dinámica geomorfológica, lateral y vertical, como mecanismo de regulación de las fluctuaciones de los caudales, intervención antrópica o por los mismos atributos de la llanura aluvial, por ende la representación espacial del comportamiento de un río es una manera de identificar zonas donde este no se mantiene estable y puede llegar a representar un peligro para la planificación de obras civiles, desarrollo económico, expansión urbana, afectaciones en los ecosistemas marinos y ambientes asociados.

La representación espacial consistió en la conjunción de la información obtenida en las fases anteriores, para esto se añadió al espacio de trabajo en ArcGIS las imágenes color natural de cada zona, a estas se sobreponen los cuerpos hídricos obtenidos en el análisis multitemporal conllevando todo ello a un resultado final de la identificación y representación de las zonas con cambios morfológicos del río Zamora perteneciente a la sub cuenca hidrográfica Zamora.

6. Resultados

6.1. Resultados para el primer objetivo

6.1.1. Parámetros asociados a la cuenca hidrográfica

Las características físicas de una cuenca tienen una relación estrecha con el comportamiento de los caudales que transitan por ella, las determinaciones de estos parámetros son necesarias para comprender el entorno de la zona de estudio y poder interpretar el comportamiento y características entre la superficie, el relieve y el drenaje de una cuenca hidrográfica, a continuación, se exponen los resultados cualitativos y cuantitativos pertenecientes a la zona de estudio:

- ✓ La subcuenca presenta un **área (A)** de 1796 km², esta es el área de drenaje del sistema de escorrentía de la cuenca, dirigida directa o indirectamente al cauce principal, según su área, ésta se clasifica con una cuenca Intermedia-Grande.
- ✓ La **longitud (L)** de la subcuenca hidrográfica Zamora es de 75,05 km, esta representa la longitud del cauce más largo de la cuenca.
- ✓ El **perímetro (P)** de la subcuenca hidrográfica Zamora es de 252 km, esta es la dimensión de la línea que limita la cuenca hidrográfica, a lo largo de la divisoria topográfica de aguas.
- ✓ La **pendiente promedio (S)** de la cuenca es de 8,42% según Pérez (1976) este valor pertenece a un terreno accidentado medio, esta cuenca tiende a responder con una celeridad media a aumentar los caudales ante las precipitaciones.
- ✓ La **altura máxima (H) y mínima (h)** presentes en la cuenca son de 3120m y 760m respectivamente.
- ✓ El **número de flujos (Nu) total** presente en la subcuenca es de 2984 (tabla 21).

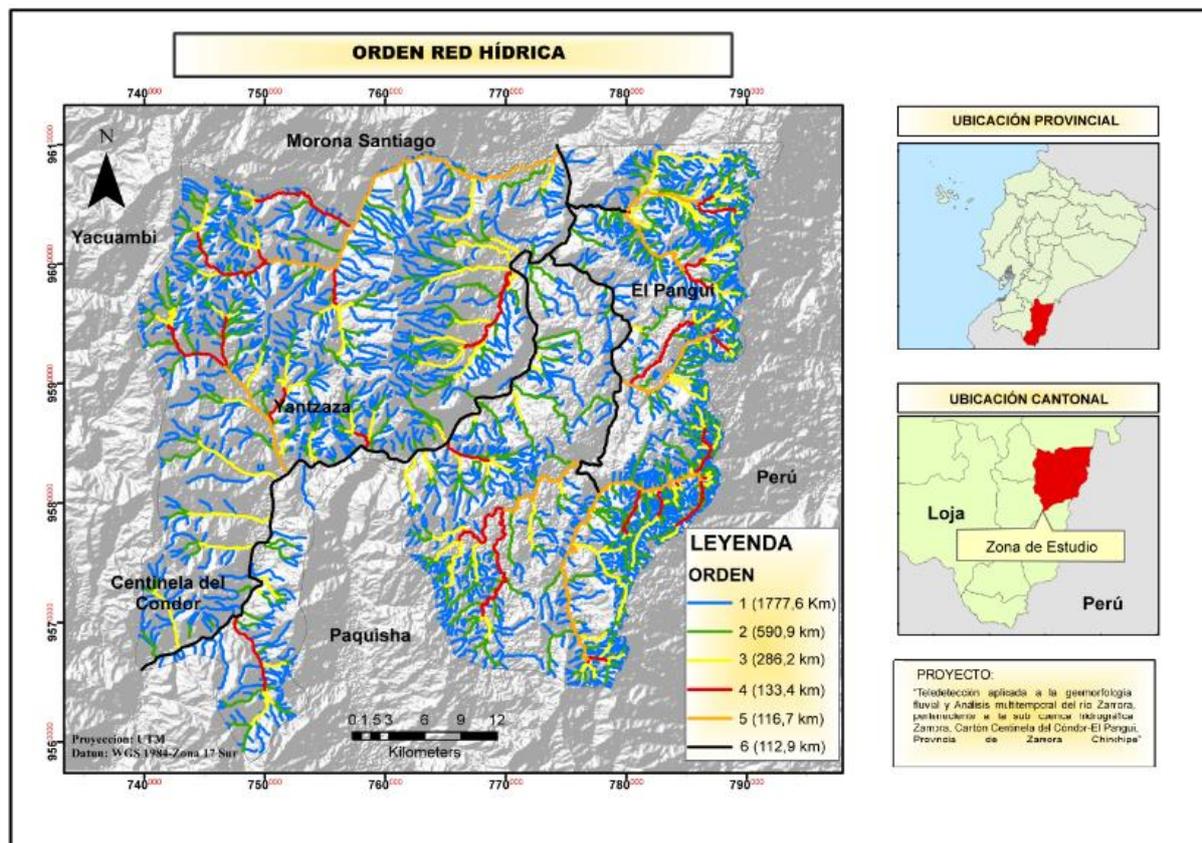
Tabla 21. *Número de flujo totales de cada orden*

Orden	Número de flujos
1	2280
2	534
3	129
4	30
5	8
6	3
Total	2984

- ✓ El **orden de flujo (U)** de la subcuenca es de sexto orden (ver figura 32), esto indica que presenta distintos ramales que permiten drenar sus aguas por los diferentes canales, por

lo que presenta un mayor potencial erosivo, mayor transporte de sedimentos y por tanto mayor escorrentía, también se determina que esta cuenca posee mayor grado de desarrollo fluvial (Rizo, Et al, 2011).

Figura 32. Orden de flujos del área de estudio



Nota. Datos para la elaboración tomados de (IGM, 2013)

- ✓ **Longitud del flujo (Lu)**, la longitud de flujo total de la red hídrica es de 3018,06 Km, en el área de estudio, se tienen flujos con longitudes cortas (flujos de orden menor) que representan áreas con mayor pendiente y texturas finas, y flujos largos que representan áreas con menor pendiente (flujos de mayor orden).

Tabla 22. Longitud total de flujos de cada orden

Orden	Longitud de orden (Km)
1	1777,65
2	590,97
3	286,27
4	133,48
5	116,73
6	112,96
Total	3018,06

- ✓ La **longitud media del flujo (Lsm)** es de 1,01
- ✓ La **relación de longitud del flujo (RI)** total de la cuenca es de 0,48, se obtienen valores bajos para las partes de altas de la cuenca (flujos de primer orden) donde se incrementa poco la longitud de los cauces mostrando mayor energía concentrada bruscamente; y valores altos para las zonas con órdenes superiores que presentan grandes longitudes correspondientes a la parte baja de la cuenca, donde la concentración de caudales es más lenta.

Tabla 23. *Relación de longitud de flujo de subcuenca*

Orden	Número de flujos	RI
1	2280	-
2	534	0,33
3	129	0,48
4	30	0,46
5	8	0,88
6	3	0,97
Total		

- ✓ El valor de **relación de bifurcación (Rb)** total es de 3,83 lo que indica que en la zona de estudio predominan áreas montañosas y con menor proporción zonas de escaso relieve, las zonas de escaso relieve al poseer áreas de escasa pendiente, están proclives a presentar eventos de inundación.

Tabla 24. *Valores de relación de bifurcación*

Orden	Número de flujos	Rb
1	2280	-
2	534	4,3
3	129	4,1
4	30	4,3
5	8	3,8
6	3	2,7
Total	2984	3,83

- ✓ El valor de **densidad de drenaje (Dd)** presente en la cuenca es de 1,68 este valor indica que la cuenca hidrográfica es moderada con tendencia media a la esorrentía y eficiente transportando los caudales de agua, lo que implica una erosión moderada en su entorno,
- ✓ El valor de la **frecuencia de flujo (Fs)** de la subcuenca es de 1,66, este parámetro, al igual que Dd es una medida de la textura del drenaje, Según Tricart (1965) el valor más

importante es el del primer orden, ya que son en definitiva estos cauces, los que tienen un mayor poder erosivo y mayor grado de disección del paisaje.

- ✓ El valor de **Textura de drenaje (T)** es de 2,8 este valor indica que posee una textura gruesa.
- ✓ En la **relación de alargamiento (Re)** se tiene un valor de 0,63 lo que indica que la cuenca posee zonas con alto relieve.
- ✓ Para el valor de **relación de circularidad (Rci) y factor de forma (Ff)** se tiene 0,35 y 0,31 respectivamente, esto indica que la subcuenca tiende a ser ligeramente alargada y con potencial de crecida moderado, estos valores también indican una tendencia media a concentrar flujos, lo que contribuye a que sus picos de crecidas sean fuertes.
- ✓ La **curva hipsométrica** nos muestra que el río Zamora es viejo, por lo que ha alcanzado su perfil de equilibrio, tiene un curso medio, su velocidad disminuye un poco debido al transporte de materiales y en estos se forman depósitos naturales de sedimentos, a lo largo de las márgenes.

Tabla 25. *Parámetros morfométricos subcuenca Zamora*

N°	Nombre	Símbolo	Valor
1	Área (km ²)	A	1796
2	Longitud (km)	L	75,051
3	Perímetro (km)	P	252
4	Pendiente promedio de cuenca %	S	8,42
5	Altura máxima	H	3120
6	Altura mínima	h	760
7	Orden de flujo	U	6
8	Número de flujo	Nu	2984
9	Longitud del flujo (km)	Lu	3018,1
10	Longitud media del flujo	Lsm	1,01
11	Relación de longitud del flujo	Rl	0,48
12	Relación de bifurcación	Rd	3,83
13	Densidad de drenaje	Dd	1,68
14	Frecuencia de flujo	Fs	1,66
15	Textura de drenaje	T	2,8
16	Relación de alargamiento	Re	0,63
17	Relación de circularidad	Rci	0,35
18	Factor de forma	Ff	0,31

6.2. Resultados para el segundo objetivo

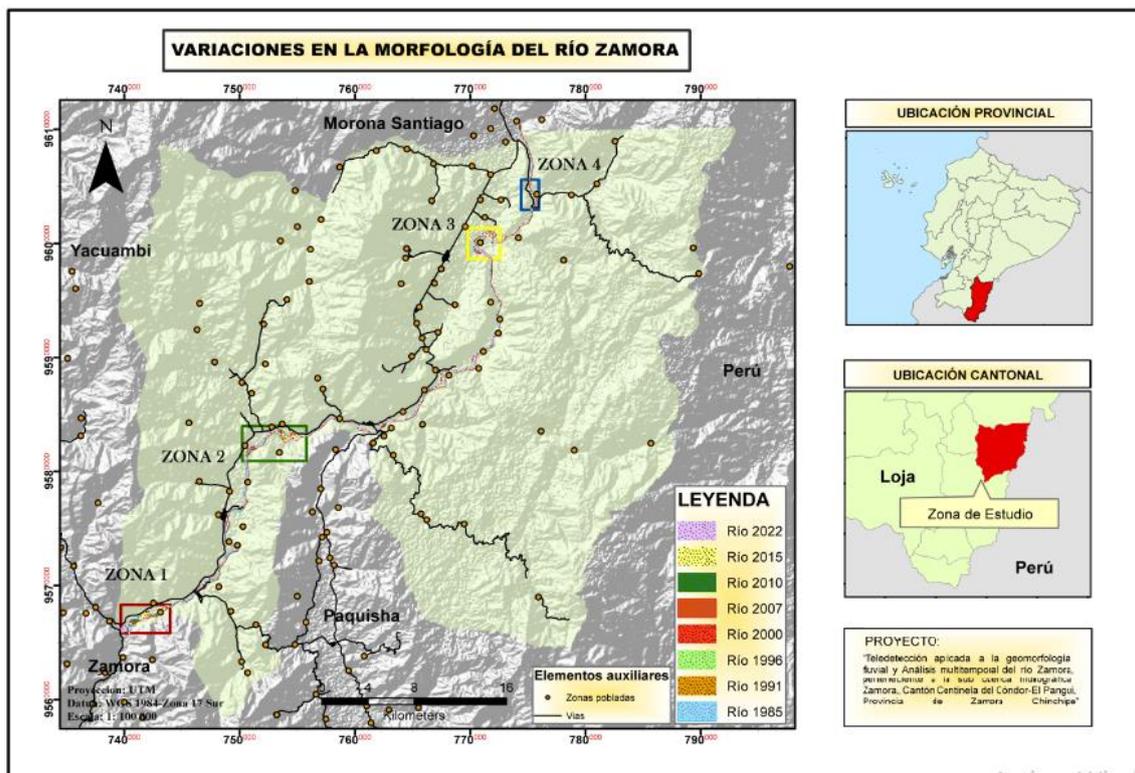
6.2.1. Zonas con variaciones morfológicas en el río Zamora (1985-2022)

La dinámica de un río es el reflejo combinado de la variabilidad climática, geomorfología, geología y los procesos antropogénicos que modifican su cauce, esto a partir de la conformación, reducción o adición de material sobre sus márgenes.

A continuación, se presentan los cambios morfológicos que ha tenido el río Zamora a través del tiempo, estas zonas han sido identificadas por medio de imágenes satelitales, seleccionándolas con intervalos de tiempo representativos, a fin de conocer el comportamiento del cauce y evitar actividades antrópicas en las periferias del mismo.

De los 75 km que constituyen cauce principal de la sub cuenca Zamora se identificaron 4 tramos con importantes variaciones que en conjunto alcanzan los 25 km, los tramos restantes presentan variaciones despreciables para el análisis multitemporal (ver figura 33), de las zonas identificadas, las que presentan mayor variación son la 1, 2 y 3, la zona 4 presenta variaciones menores en relación a las anteriores.

Figura 33. Zonas que presenta variación morfológica en el intervalo de tiempo 1985 -2022



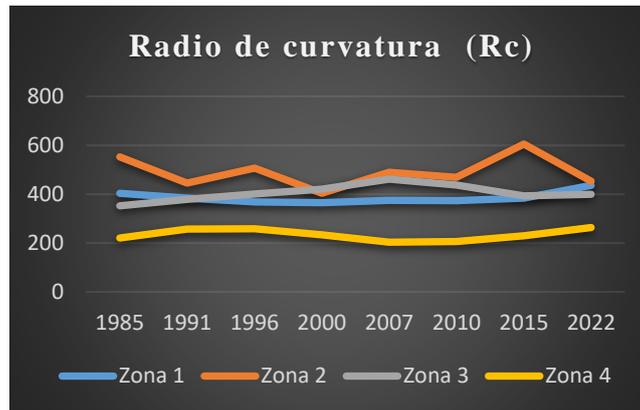
6.2.2. Parámetros morfométricos del río Zamora

6.2.2.1. Radio de Curvatura (Rc)

Este parámetro pone en evidencia mediante valores cuantitativos la existencia de cambios morfológicos. En la (ver figura 34) se observa que los valores del radio de curvatura

promedio de las zonas no tienen una tendencia lineal, esto denota que el río no se ha mantenido estable, ejemplo de esto tenemos a la zona 2, los valores no se mantienen constantes y varían desde 403,7m a 605m, es un indicador de la existencia de cambios y que los meandros están en constante desplazamiento, caso contrario, en zonas donde no existen variaciones los valores de (Rc) deben mantenerse lineales o con mínimas variaciones.

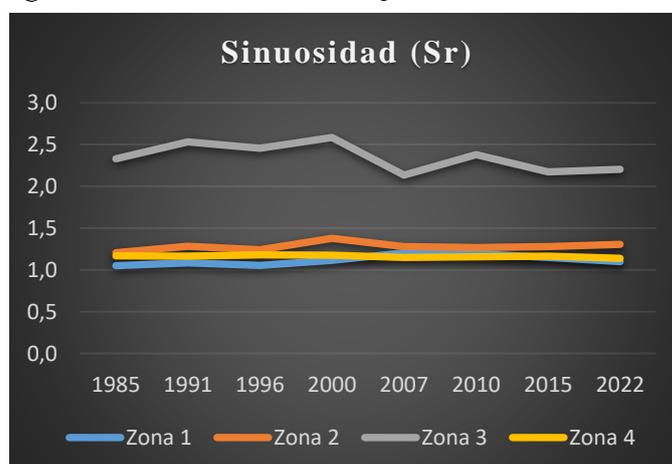
Figura 34. *Radios de curvatura promedio de las zonas de estudio*



6.2.2.2. Índice de Sinuosidad (Sr)

Este parámetro ayuda a analizar su evolución en el periodo determinado. La forma que adopta un río viene determinada por procesos de erosión y agradación que ocurren en los mismos y en algunos casos la intervención antrópica. En la (ver figura 35) se puede observar que los valores de sinuosidad de las zonas 1,2 y 4 se mantienen entre 1, 1 a 1,4, estos valores son un indicador que el río ha presentado un grado medio de sinuosidad y ha existido la presencia de pequeños canales situados en la parte lateral y bancos de arena que aparecen y desaparecen con el tiempo, en la zona 3 se tiene valores de 2,1 a 2,6, estos valores indican que es de tipo meandrica y ha mantenido gran cantidad de canales en los lados externos y planicies de inundación (bancos de arena) en el lado interno.

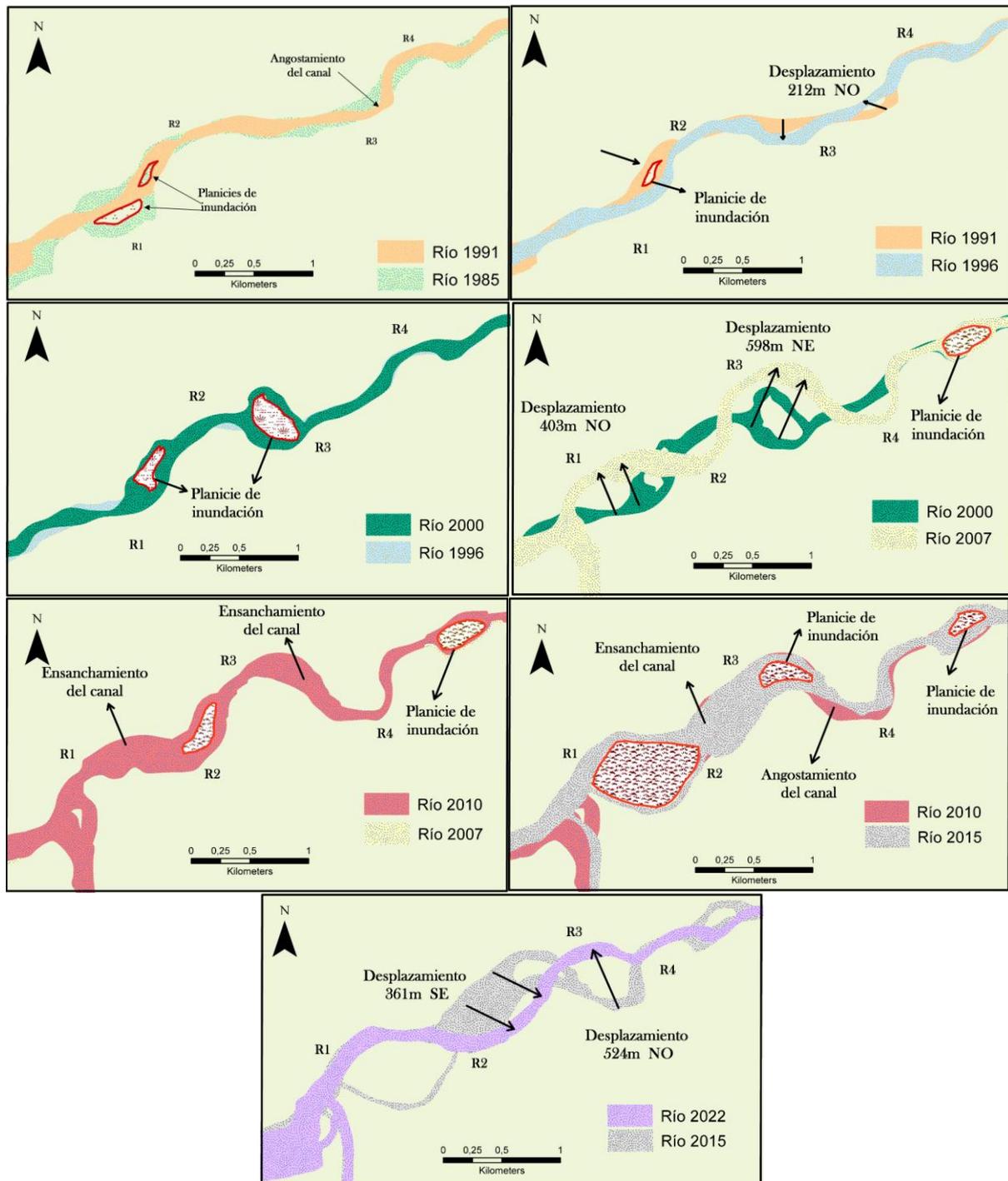
Figura 35. *Radios de curvatura promedio de las zonas de estudio*



6.2.3. Análisis multitemporal

6.2.3.1. Zona 1

Figura 36. Mosaico de imágenes para análisis multitemporal del periodo de estudio Zona 1

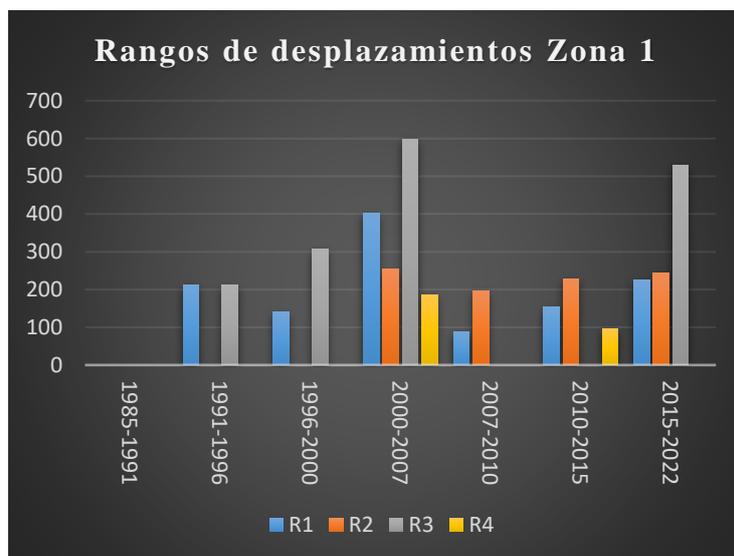
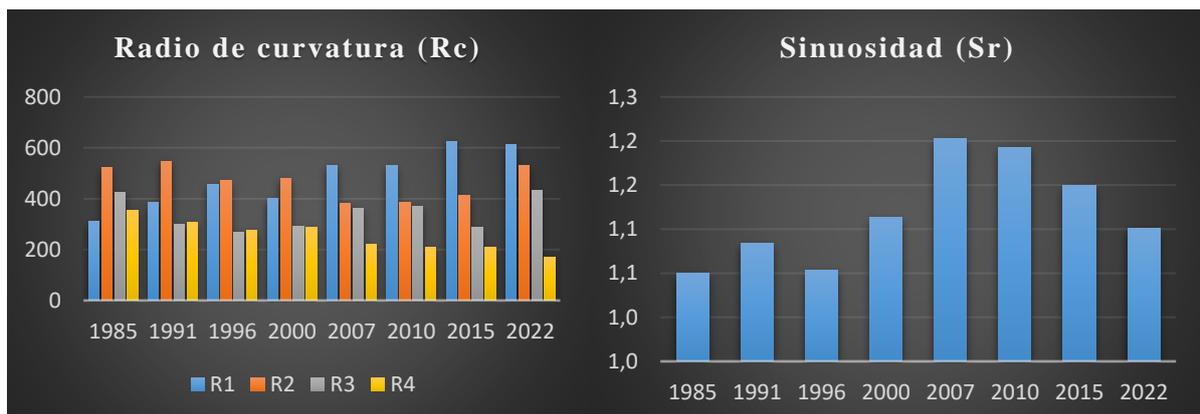


La zona 1 comprende los primeros 5,3 Km del río, se encuentra en la parroquia Zumbi, cantón Centinela del Cóndor, en el periodo de estudio este tramo fluvial presenta una forma irregular en sus meandros y se evidencia que ha sufrido grandes desplazamientos debido a la erosión en las periferias del canal, los principales cambios morfológicos que se visualizan son:

ensanchamiento, angostamiento del canal y el desplazamientos de los meandros que van desde los 212 a 598 metros (ver figura 36), las mayores variaciones morfológicas se sitúa en el extremo norte del río, se evidencia la formación y abandono de pequeños canales en los lados externos al canal principal y la formación de planicies de inundación (bancos de arena) dentro de las periferias del río, estos cambios morfológicos pueden estar relacionados con el aumento de la potencia de la corriente, producto de las precipitaciones y a los diversos atributos aleatorios de la llanura aluvial.

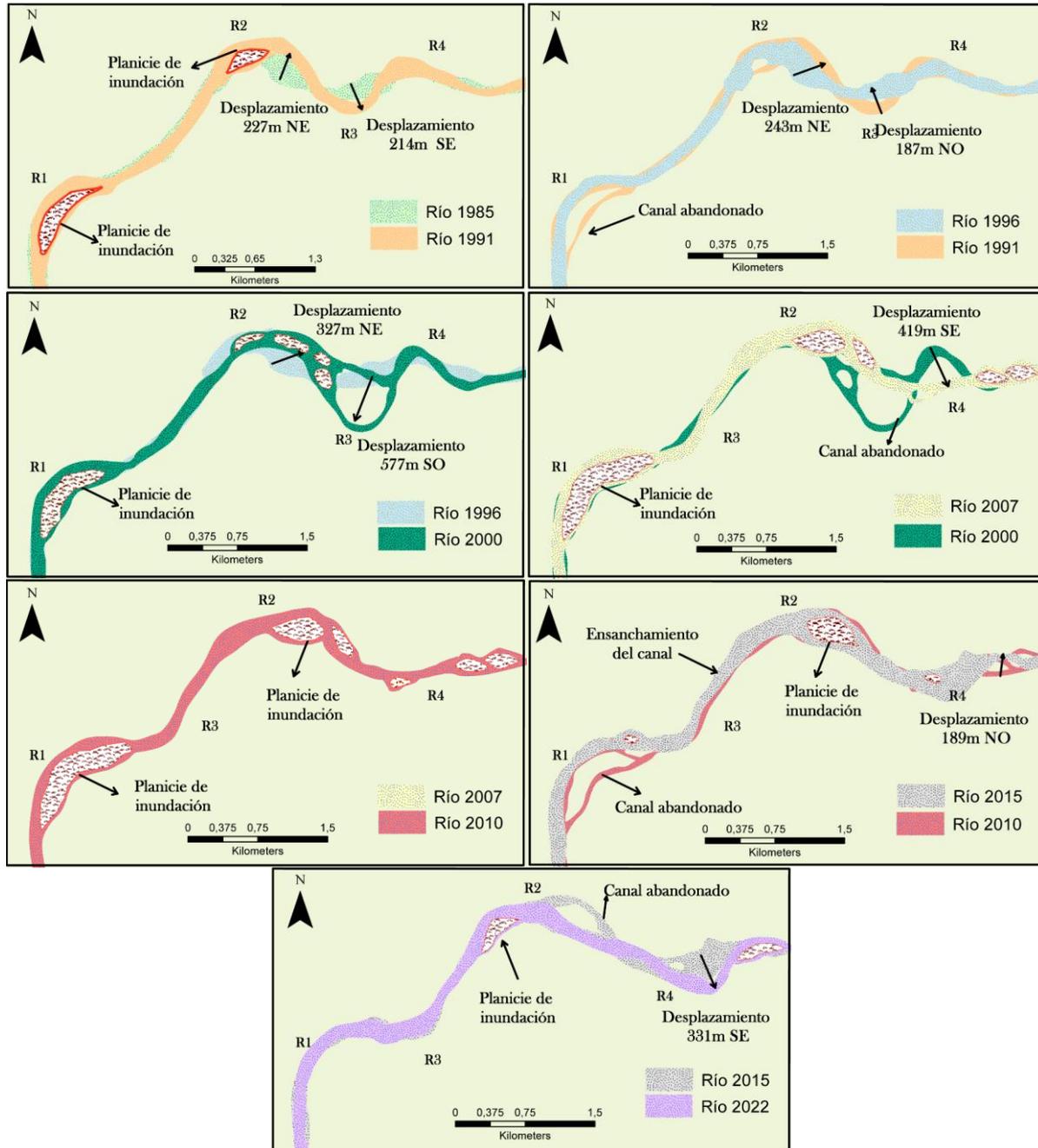
Los valores de (R_c) en la zona 1 (ver figura 37) varían desde 171 a 547, lo que demuestra un cambio constante en la curvatura de los meandros a través del tiempo, la variación de estos indica una zona inestable y en constante desplazamiento, el valor de sinuosidad promedio (S_r) es de 1,1 lo que indica que el tramo fluvial es de tipo devanado, esto denota que el canal a través del tiempo ha sido poco sinuoso y posee pequeños canales separados por bancos de arena que aparecen y desaparecen con el tiempo.

Figura 37. Radios de curvatura, desplazamientos e índice de sinuosidad de la zona 1



6.2.3.2. Zona 2

Figura 38. Mosaico de imágenes para análisis multitemporal del periodo de estudio Zona 2

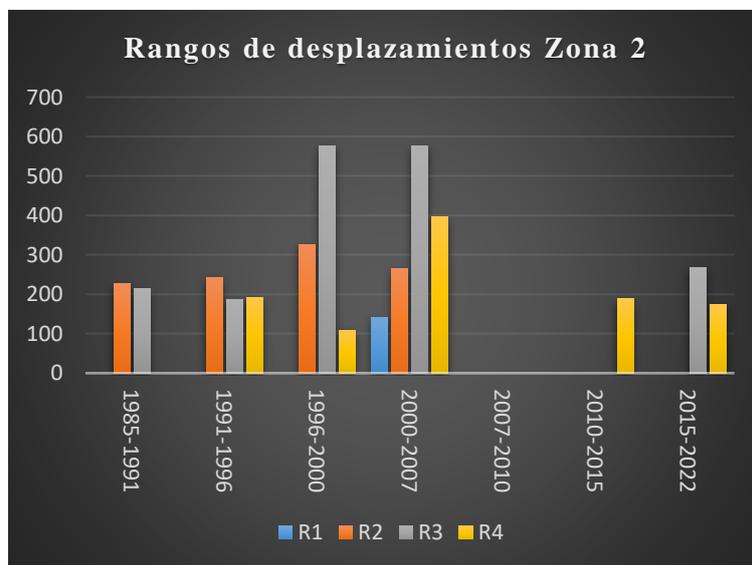
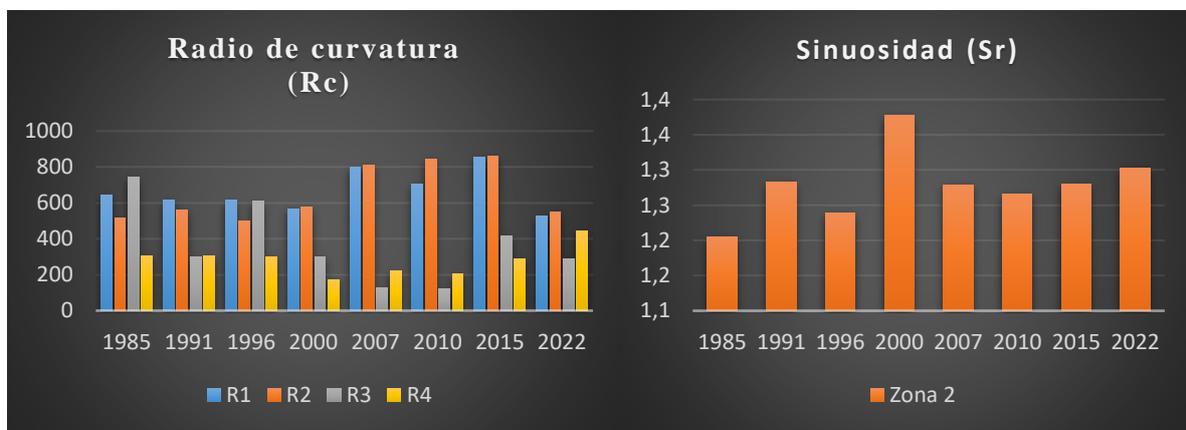


La zona 2 se sitúa entre el kilómetro 22,8 y 30,2 del río, parroquia Yantzaza, cantón Yantzaza, en el periodo de estudio este tramo fluvial presenta una forma irregular en sus meandros y se evidencia pequeños y grandes desplazamientos debido a la erosión en las periferias del canal, los principales cambios morfológicos que se visualizan son: ensanchamiento del canal, angostamiento del canal y el desplazamientos que van desde los 227 a 577 metros (ver figura 38), los mayores desplazamientos se sitúan en el parte sur del río. Al igual que la zona 1, se evidencia la formación y abandono de pequeños canales en los lados

externos al canal principal y la formación de planicies de inundación (bancos de arena) dentro de las periferias del río, estos cambios morfológicos pueden estar relacionados con el aumento de potencia de la corriente, producto de las precipitaciones, actividad antrópica y a los diversos atributos aleatorios de la llanura aluvial.

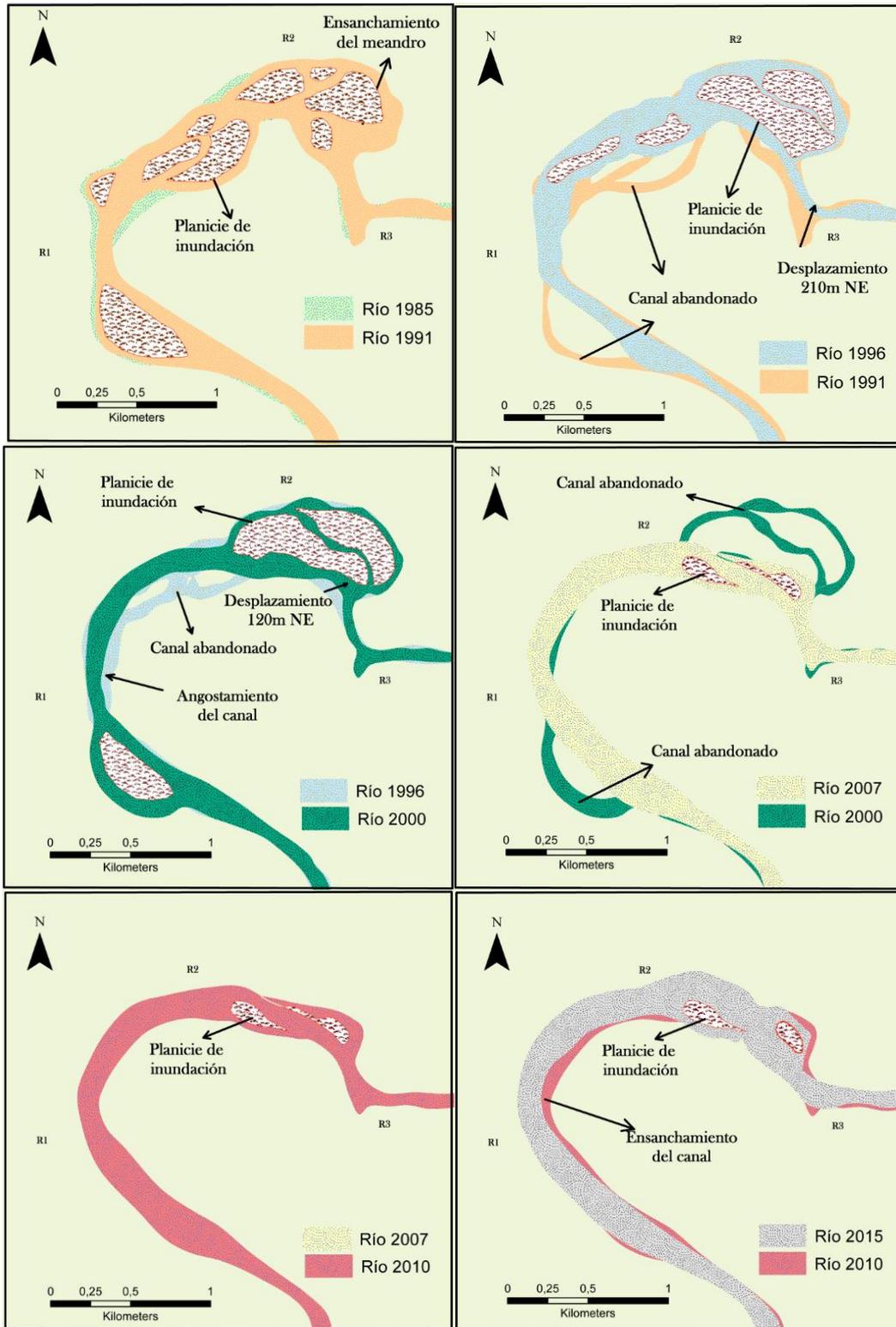
La variación en los valores de (R_c) van desde 121 a 858, indicando el tramo fluvial en el periodo de estudio no tiene una tendencia definida en la forma y curvatura de sus meandros, el valor de sinuosidad promedio (S_r) es de 1,3 lo que indica que el tramo fluvial es de tipo anastomosado, esto indica que es sinuoso y forma en ciertas ocasiones islas sedimentarias.

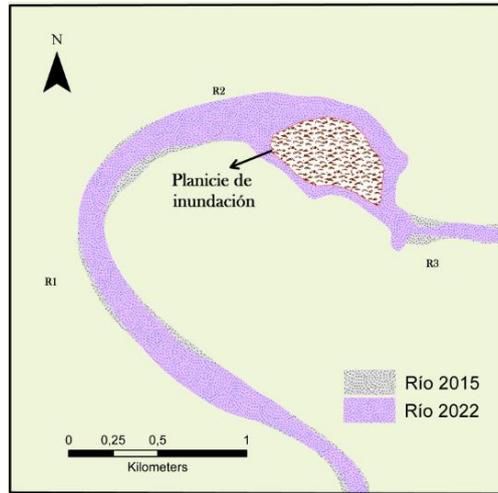
Figura 39. Radios de curvatura, desplazamientos e índice de sinuosidad de la zona 2



6.2.3.3. Zona 3

Figura 40. Mosaico de imágenes para análisis multitemporal del periodo de estudio Zona 3

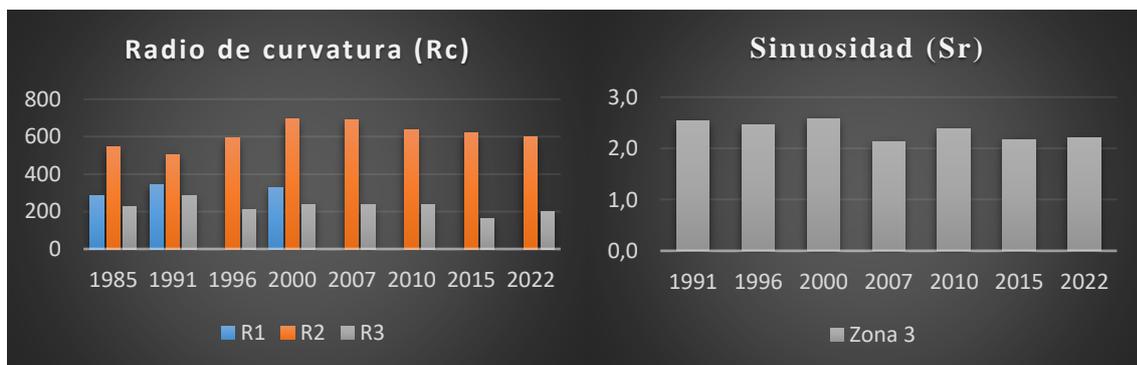


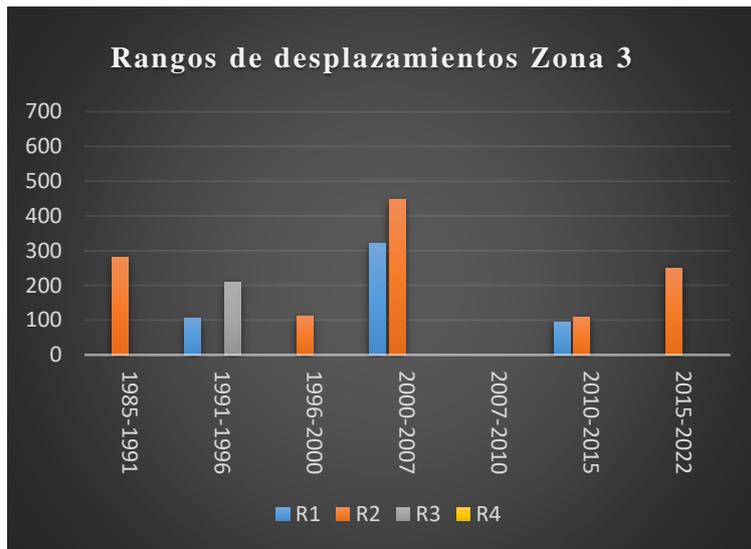


La zona 3 se sitúa entre el kilómetro 60,4 hasta el kilómetro 65,6 del río, parroquia El Pangui, cantón El Pangui, este tramo fluvial el periodo de estudio a diferencia de las zonas anteriores presenta el abandono de canales situados en la parte norte y desplazamientos menores, tiene una forma irregular en sus meandros y posee grandes bancos de arena dentro de las periferias del río, los principales cambios morfológicos que se visualizan son: ensanchamiento, angostamiento del canal y pequeños desplazamientos de los meandros que varían de 120 a 210 metros (ver figura 40).

Loa valores de (R_c) varían desde 165 a 695, lo que indica que no tiene una tendencia definida en la forma y curvatura de sus meandros, en la (figura 41) se observan que algunos valores de RC desaparecen, esto se deriva debido a que las fuerzas erosivas de los flujos aguas abajo han sido mayores que la resistencia del terreno, lo que provoca que la curvatura de los meandros desaparezca, el valor de sinuosidad promedio (S_r) es de 2,3 lo que indica que es de tipo meandrico en todo el periodo de estudio, y que en su discurrir, tiene un gran número de meandros debido a que sus aguas tienen una velocidad variable por las curvas y es capaz de erosionar el terreno y a la vez crear zonas de sedimentos.

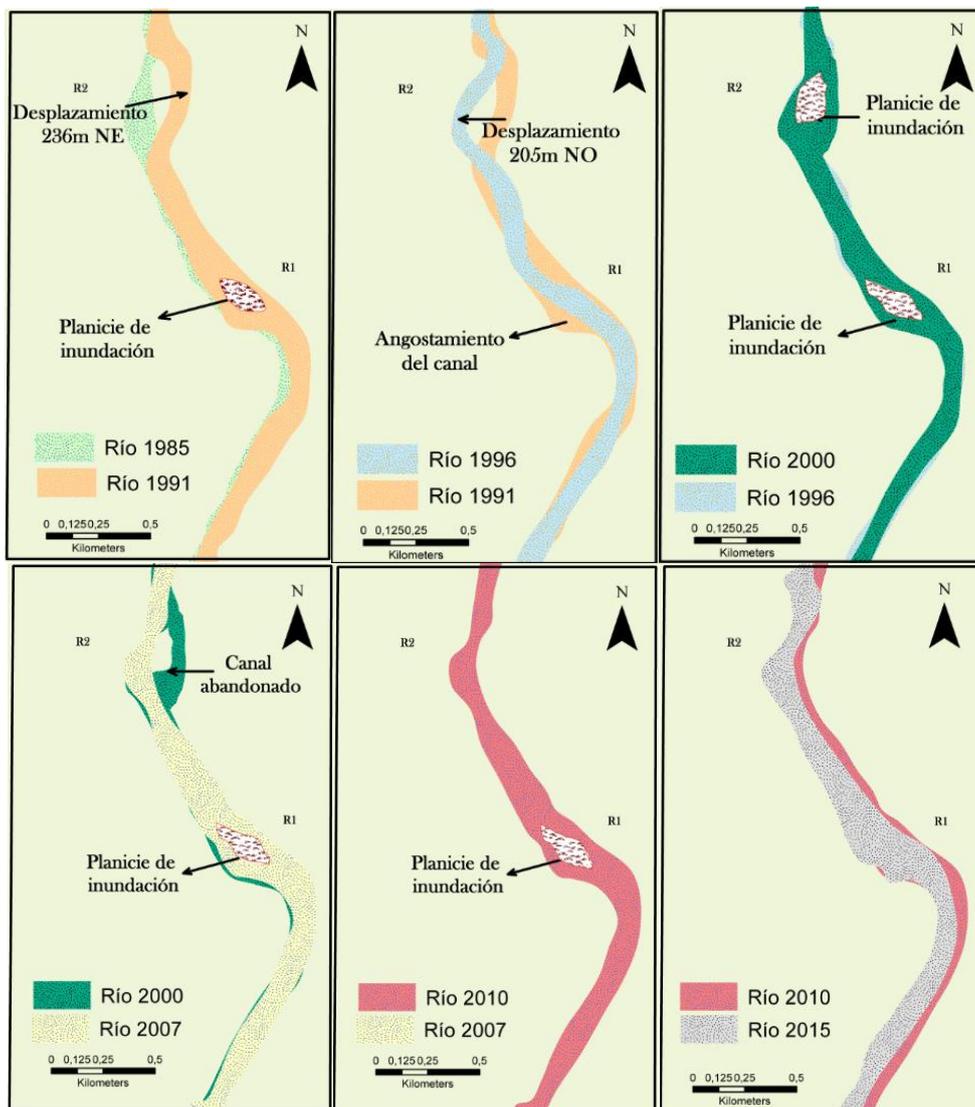
Figura 41. Radios de curvatura, desplazamientos e índice de sinuosidad de la zona 3

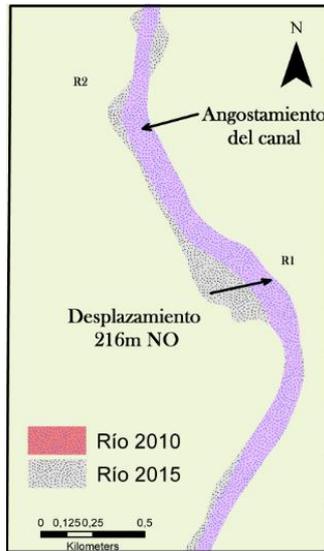




6.2.3.4. Zona 4

Figura 42. Mosaico de imágenes para análisis multitemporal del periodo de estudio Zona 4



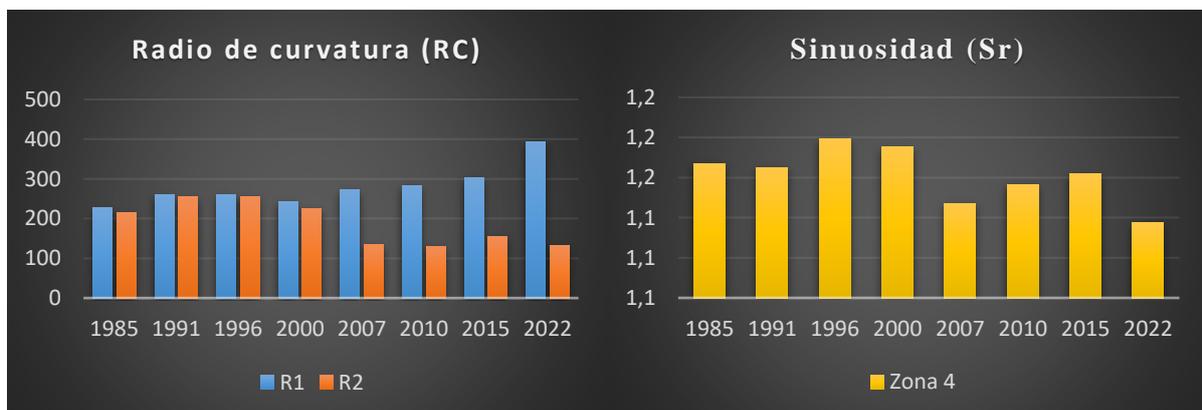


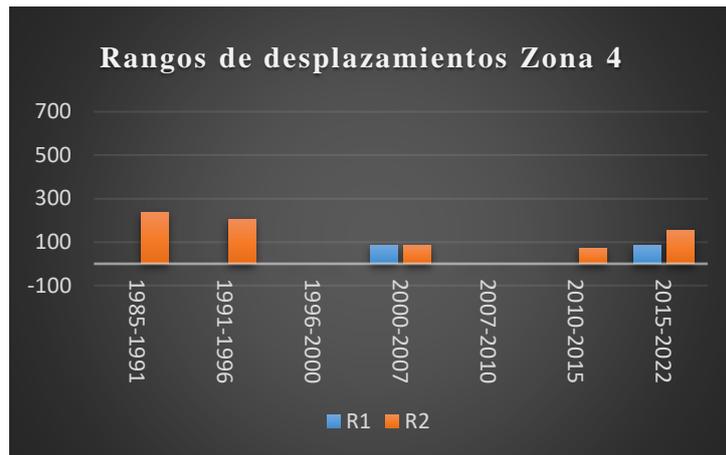
Se sitúa entre el kilómetro 69,8 hasta el kilómetro 72,9 del río, parroquia El Guismi, cantón El Panguí, este tramo fluvial presenta poca variación en comparación a las zonas analizadas anteriormente, sin embargo, puede observarse una forma irregular en sus meandros y se evidencia pequeños desplazamientos, los principales cambios morfológicos que se visualizan son: ensanchamiento, angostamiento del canal y desplazamientos menores que varían de 205 a 236 metros (ver figura 42).

En esta zona, el desplazamiento y ensanchamiento de los meandros son pequeños, en la mayor parte de este tramo fluvial la fuerza erosiva del flujo es insuficiente para vencer la resistencia de las orillas del canal, por ende, el desplazamiento de los meandros no tiene lugar y el canal se mantiene estable.

La variación en los valores de (R_c) varían desde 130 a 294 indicando que no tiene una tendencia definida en la forma y curvatura de sus meandros, el valor de sinuosidad promedio (S_r) es de 1,2 lo que indica que el tramo fluvial en el periodo de estudio es de tipo devanado, esto denota que es poco sinuoso y posee pocos canales separados por bancos de arena.

Figura 43. Radios de curvatura e índice de sinuosidad de la zona 4





6.2.4. Factores asociados a los cambios morfológicos del río Zamora

6.2.4.1. Geológicos y geomorfológicos

Las zonas de estudio se encuentran en la unidad Misahuallí, Complejo Intrusivo de Zamora y la formación Hollín pertenecientes al periodo Jurásico/Cretáceo, estas zonas se relacionan con la depositación de materiales transportados por consecuencia de los procesos mecánicos que permiten la desintegración de los materiales. El trabajo de campo permitió la identificación de 3 formas de relieve (terrazas aluviales, planicies y pie de monte) que predominan en las 4 zonas que presentan variaciones:

- **Zona 1**

La descripción litológica y geomorfológica de la zona 1 determino que está influenciada por 3 tipos de geoformas: Terrazas aluviales compuestas por materiales de arrastre, como cantos de varios tamaños redondeados y subredondeadas de rocas volcánicas y sedimentos de granulometría variable, desde gravillas, arenas y material muy fino del Cuaternario; planicies que presentan una topografía plana, constituida por limos y sedimentos de arcillas; en cuanto al pie de monte, geológicamente, este tipo de relieve se ha desarrollado en rocas graníticas atribuidas al Complejo Intrusivo de Zamora (ver figura 44).

Figura 44. Terrazas aluviales (1) y depósitos aluviales (2) de la zona 1.



- **Zona 2**

En lo que se refiere a la litología y geomorfología que se distribuye en la zona 2 se tiene la presencia de: Terrazas aluviales que se ubican a lo largo del río Zamora, estas terrazas están compuesta por depósitos poco consolidados formados con arenas, cantos de formas muy variadas, desde sub angulosas a muy redondeadas de varios tamaños; planicies con la presencia principalmente de arcillas y pie de monte, esta última geoforma se ubica a lo largo de la vía teniendo Hugo Ortiz y está compuesta por rocas ígneas intrusivas granodioritas pertenecientes al batolito de Zamora (ver figura 45).

Figura 45. *Materiales presentes en la zona de estudio, arcilla (1) y granodiorita (2)*



- **Zona 3**

En cuanto a la zona 3, las zonas bajas están compuestas principalmente por material sedimentario como depósitos aluviales, arenas y gravas a los márgenes del cauce, las planicies se caracterizan por la presencia de arcillas rojizas, amarillentas y suelo arcillo arenoso con tonalidad rojiza que se acentúan en la superficie y predominan en la zona (ver figura 46).

Figura 46. *Material litológico presente en la zona 3 (depósitos aluviales, arcillas rojizas)*



- **Zona 4**

En lo que refiere a la litología y geomorfología que se distribuye en la zona 4 se tiene la presencia de: Terrazas aluviales que se ubican a lo largo del río Zamora, estas terrazas están compuestas por arenas, gravas, cantos de formas muy variadas, desde sub angulosas a muy redondeadas de varios tamaños y material fino del cuaternario; planicies con la presencia principalmente de lutitas, arcillas, limos; y áreas de pie de monte, esta última geo forma sé en

las bases del relieve montañoso y está compuesta principalmente por areniscas pertenecientes a la Formación Hollín (ver figura 47).

Figura 47. Terrazas aluviales (1) y afloramiento de areniscas (2) en la zona 4.



6.2.4.2. Hidrológicos y climáticos

Según el PDOT-2019-2023 Zamora, el clima muestra una tendencia de aumento de los días al año con lluvias extremas de 3 a 6 días más hacia el año 2015, con relación al año 1981, presentándose las más altas en el centro de ella, bajo los escenarios del cambio climático esta tendencia sería mayor con un incremento de lluvias extremas hacia el año 2040 (Precipitación anual promedio de 3.000 mm.)

Los incrementos de precipitación debido al cambio climático y principalmente al fenómeno del niño, el cual sus registros históricos indican que el período alrededor de marzo a junio tiene el pico máximo de lluvias (Precipitaciones marzo 2021, Precipitaciones junio 2011, Precipitaciones marzo 2015), esto sumado a las características de la cuenca a concentrar el escurrimiento de lluvias para formar grandes crecidas, y los grandes aportes de los sistemas de drenaje aguas arriba que aumentan el caudal del río, son algunos de los factores que inciden en el río Zamora muestre una morfología cambiante en las zonas analizadas.

6.2.4.3. Antrópicos

El río Zamora ha sido expuesto a distintas actividades, una de las principales es la explotación de depósitos aluviales especialmente para obras ingenieriles, estas actividades se ejecutan en las zonas de estudio debido a que presentan grandes bancos de arenas y grabas que resultan del arrastre y depósito de sedimentos, en este contexto, las tasas de erosión geológica natural son sostenibles para la naturaleza, sin embargo, las actividades para la obtención de materiales petreos impactan directamente en su aumento, por lo que, la alteración física de estas zonas incrementan las tasas de erosión, dando paso a cambios en la dinámica natural del río.

Se tiene la extracción de materiales en la zona 1, 2 y 4 (ver figura 48).

Figura 48. Zonas de extracción de materiales pétreos zona 1



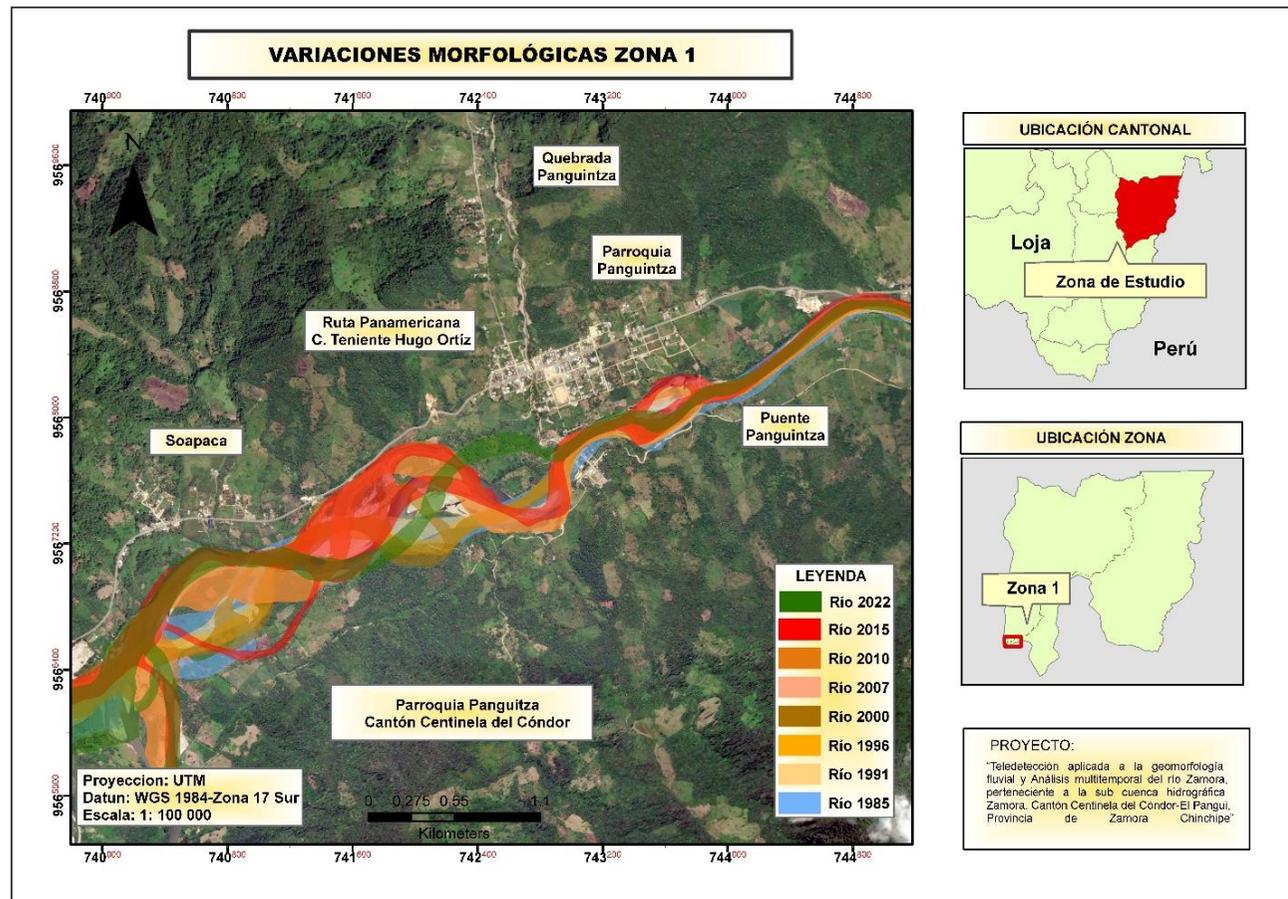
Nota: Material pétreo, principalmente grava y arena

6.3. Resultados para el tercer objetivo

Finalmente, se determinaron 4 zonas con variaciones morfológicas, que han sido interpretadas en base a la forma y geometría de sus tramos fluviales, siendo la zona 1 el sector que presenta mayores cambios morfológicos y la zona 4 la zona con menores cambios.

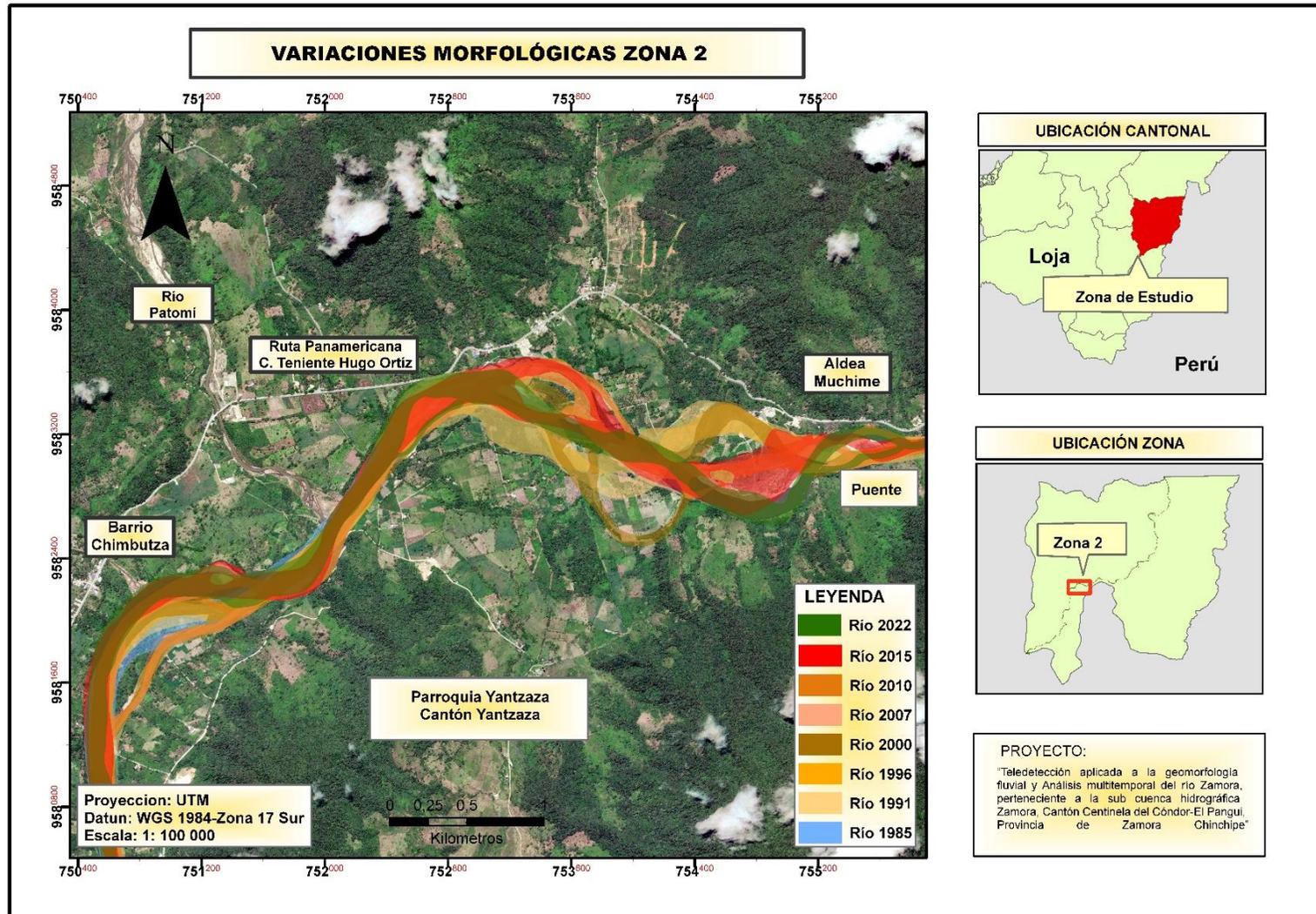
6.3.1. Zona 1

Figura 49. Representación espacial de las variaciones morfológicas zona 1



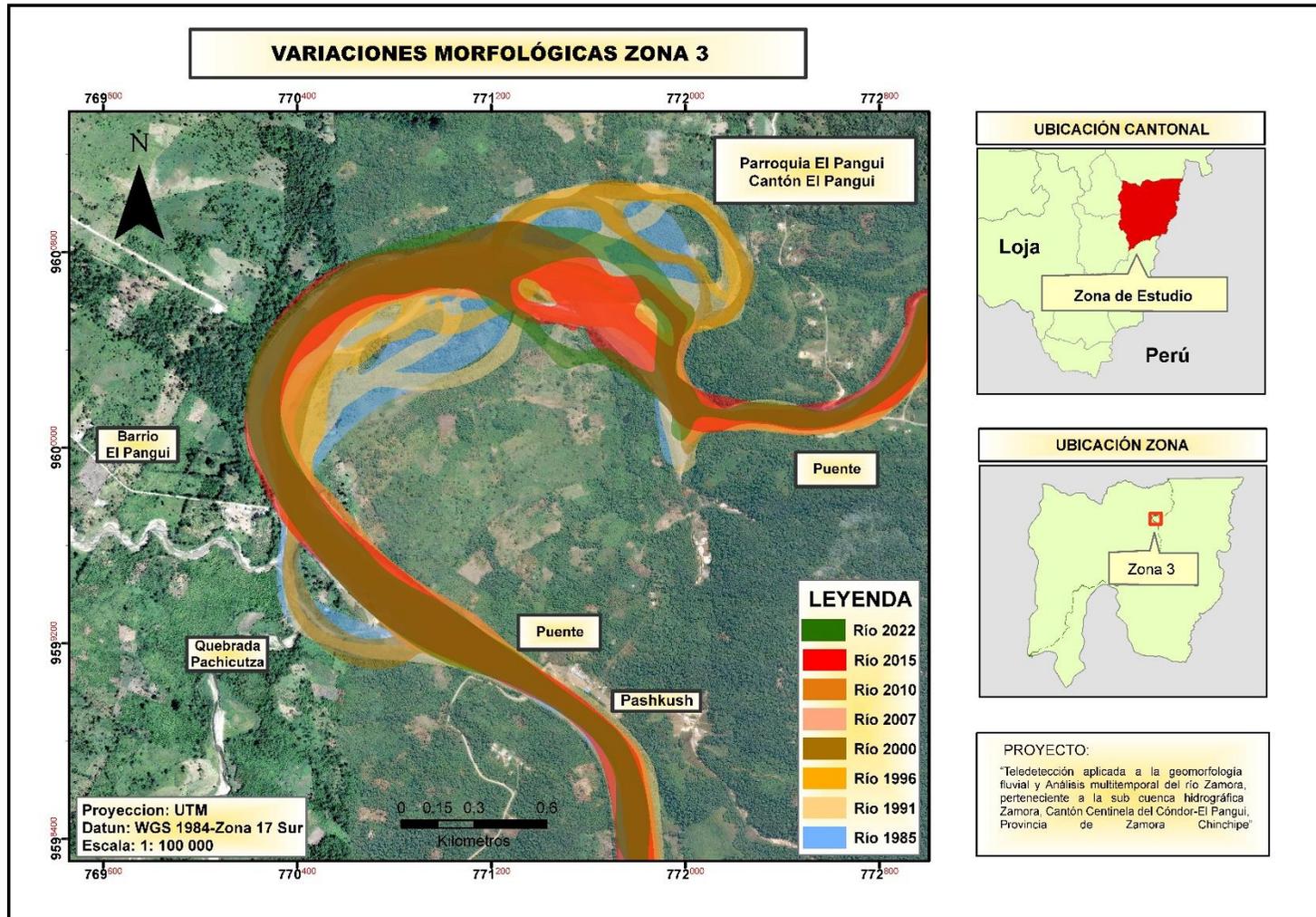
6.3.2. Zona 2

Figura 50. Representación espacial de las variaciones morfológicas zona 2



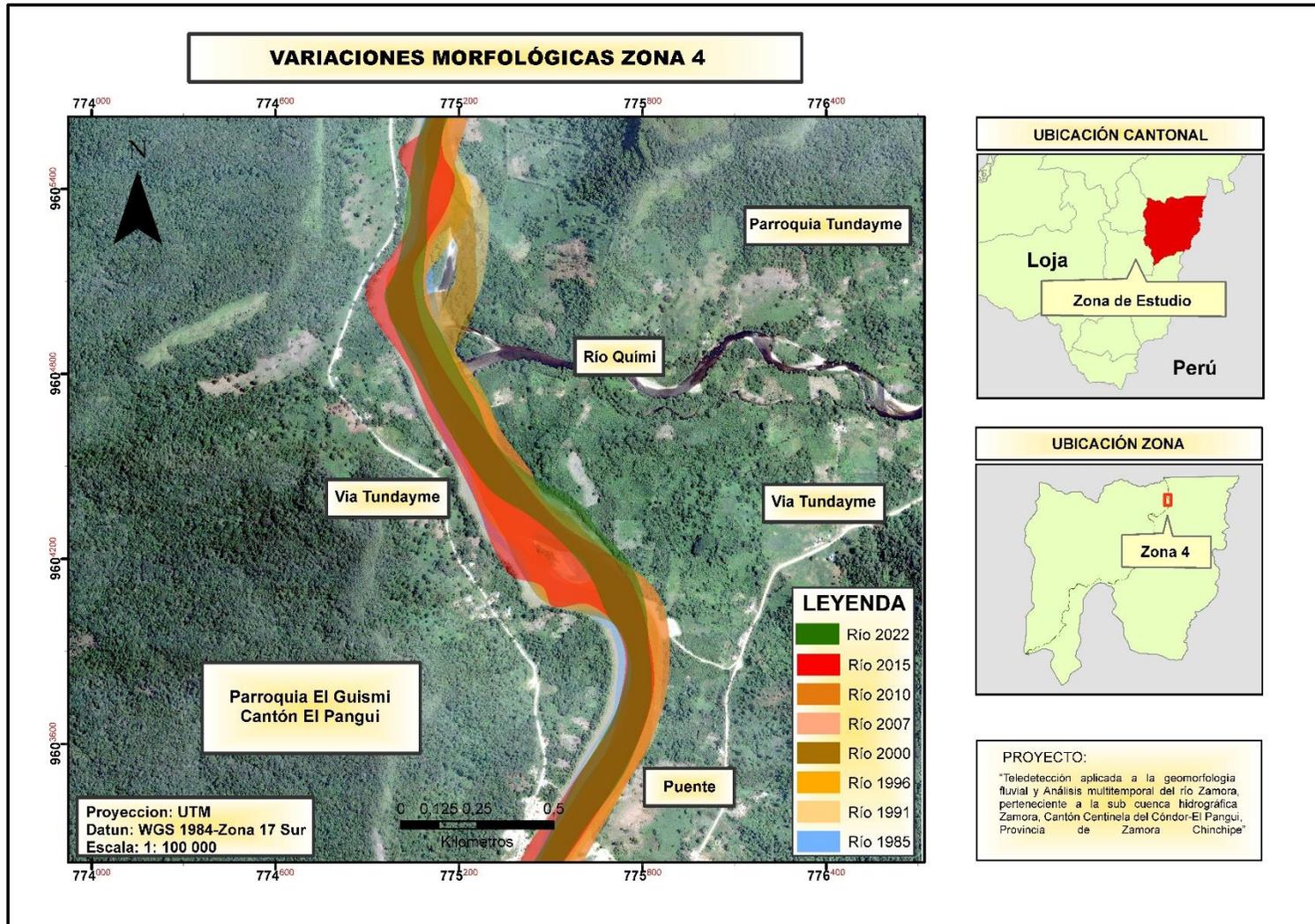
6.3.3. Zona 3

Figura 51. Representación espacial de las variaciones morfológicas zona



6.3.4. Zona 4

Figura 52. Representación espacial de las variaciones morfológicas zona 4



7. Discusión

La importancia de conocer el comportamiento morfológico de un río y los factores que inciden a estos cambios, es fundamental para su uso como herramienta en la gestión del territorio, ya que, los cauces fluviales no son cuerpos móviles y están en constante evolución. A partir del conocimiento de su comportamiento es posible la ejecución idónea de proyectos, obras, actividades económicas y expansión urbana que ayudan al desarrollo de la población.

Mediante la obtención de las características morfométricas propuestas por Horton, (1945a), Rai et al., (2020), López & Romero, (1987), S. A. Schumm, (1956), Pérez (1976), se definió que la cuenca del río Zamora al poseer características tales como su pendiente media de (S), gran cantidad de flujos(Nu) y longitud (Lu) favorece la capacidad de erosión e incrementos en la velocidad del caudal en caso de tormentas, en los valores de bifurcación (Rb), densidad (Dd) y textura de drenaje (T), los cuales son reflejo de una cuenca eficientemente drenada con presencia de materiales permeables y relieves montañosos que generan un menor tiempo de concentración de aguas, todos estos valores señalados favorecen a producir buenos picos de crecidas y arrastre de sedimentos en zonas bajas incidiendo directamente en las variaciones morfológicas, estas características mencionadas se ven sustentadas en los valores obtenidos para Re, Rci, Ff. Llama la atención los valores obtenidos en los parámetros de esta sub cuenca que en comparación a los estudios realizados en la sub cuenca del río Vinces por Muñoz (2021) que por sus parámetros esta se define como una cuenca exorreica de sexto orden, de etapa madura, y es alargada con sus lavabos largos y angostos, la sub cuenca del río Vinces al no presentar la misma torrencialidad que posee la sub cuenca Zamora, sus cambios morfológicos se encuentran controlados principalmente por lineamientos presentes en la misma.

Como resultado del procesamiento de las imágenes satelitales mediante la metodología propuesta por (Pinilla, 2020), se identificaron 4 zonas con desplazamiento de sus meandros que varían desde 120 a 598 m en donde se observa que a pesar de que el río presenta una alta variación morfológica tanto lateral como vertical este hasta el periodo estudiado (2022) opta por tomar la forma natural del cauce, sufriendo en el proceso el ensanchamiento y angostamiento del canal, formación de bancos de arena y brazos de agua en las partes laterales, las zonas donde predominan estos fenómenos es en el sur oeste y la parte céntrica de la cuenca, a partir de estos resultados se determina que las zonas que poseen mayor variación morfológica se dan en el respectivo orden: zona 1(Cantón Centinela del Cóndor), 2(Yantzaza) y 3(Pangui), en cuanto a la zona 4 a diferencia de las anteriores presenta menores variaciones, esta categorización pueden corroborarse en los valores obtenidos del cálculo de radio de

circularidad (200-00 Rc), índice de sinuosidad (1,1-2,6 Si) y las distancias de desplazamiento de cada zona.

En cuanto a los picos más altos de variación la zona 1, estos se dan en el periodo 2000-2007 con valores de 598; 2015-2022 con desplazamientos de 529m; 1996-2000 con valores de 577 m de desplazamiento, en los periodos restantes se tiene una variación constante de sus meandros que varía desde los 100m a 300m.

Las zonas 4 zonas de estudio presentan planicies, terrazas aluviales y pies de montaña, en cuanto a la composición litológica de nuestras zonas de interés, las partes laterales al río se caracterizan por la presencia mayoritaria de materiales sedimentarios sensibles a la erosión: arenas, gravillas, cantos de diversos tamaños, material muy fino del cuaternario y arcillas que presenta escaso desarrollo de cobertura vegetal, en cuanto a actividades antrópicas se tiene la extracción de materiales pétreos en la zona 1,2, y 4.

Para que se den estas variaciones existe una relación entre procesos naturales, procesos antrópicos y las características intrínsecas de la cuenca que se describen a continuación: Actividades antrópicas, las zonas de estudio al ser de tipo meándricos y sinuosas, tienden a formar grandes bancos de arena y gravas en los márgenes del río, los cuales son aprovechados con frecuencia, debilitando las partes laterales del cauce y modificando la dirección natural del río aguas abajo; factores climáticos como el incremento de precipitación debido principalmente al fenómeno del niño, ejemplo de esto tenemos las fuertes lluvias del 2021 (marzo a junio) donde el pico más alto de precipitación fue de 54,1 mm/h, incidiendo en los desplazamientos del cauce del río Zamora identificados en el periodo 2015-2022, al existir agresivos incrementos del caudal, estos aumentan la fuerza erosiva del flujo y vencen la resistencia de las orillas dando paso al desplazamiento de meandros; características de la cuenca: sus parámetros indican que esta cuenca tiende a drenar de una forma más eficiente sus aguas y aumentar la potencia de la corriente, lo que contribuye a una mayor movilización de agua suficiente como para producir buenos picos de crecidas y arrastre de sedimentos.

De esta manera, finalmente, el resultado de la investigación se expresó a través de la representación espacial de los cuerpos hídricos extraídos de cada periodo, en el que se representa cada una de las zonas identificadas en el análisis multitemporal.

Trabajos de análisis multitemporal no se han realizado a detalles dentro de la zona de estudio, por lo que el presente trabajo es de gran importancia al momento de ejecutar proyectos a riberas del río.

8. Conclusiones

La subcuenca por sus parámetros morfométricos se define como una cuenca de sexto orden, con una forma semicircular que posee gran cantidad de ramales que permiten drenar sus aguas de manera más eficiente y, por tanto, en zonas bajas los picos de crecidas, erosión y transporte de sedimentos será más altos.

Existen 4 zonas con variaciones morfológicas en el periodo de estudio (1985-2022) con una longitud del río de 21km, estas variaciones están directamente relacionadas con actividades antrópicas realizadas en la zona, características de la cuenca y los diversos atributos propios de las zonas de estudio.

Los mayores cambios en la morfología se evidencian con más frecuencia en el sur oeste de la cuenca, en la zona 1, 2, 3 y con menor frecuencia en la zona 4. Los principales cambios que se desarrollan son: ensanchamiento y angostamiento del canal, desplazamiento de meandros, formación de bancos de arena y canales o brazos de agua en las partes laterales, estos fenómenos afectan constantemente a infraestructuras aledañas al río, actividades agrícolas y ganaderas.

Los valores de los índices de sinuosidad (S_r) y radio de curvatura (R_c) que se obtuvo en las 4 zonas analizadas, indican que en el periodo de estudio 3 de estas zonas han mantenido variaciones sinuosas y una meandrica, este tipo de zonas dan paso a la formación de grandes bancos de arena y gravas de gran interés para el sector de la construcción.

En cuanto a los métodos de extracción de las masas de agua, se comprobó que el NDWI presenta resultados exactos y fáciles de tratar que otros métodos, esto debido se reduce considerablemente la reflectancia del suelo y la vegetación, lo que permite que dichas masas de agua destaquen en la imagen.

La identificación y representación espacial de zonas con cambios morfológicos se realiza a partir de los cuerpos hídricos extraídos de imágenes satelitales del periodo de estudio, mediante el índice NDWI en el ENVI y su respectivo análisis en el software ArcGIS.

9. Recomendaciones

Para este tipo de análisis, las imágenes multiespectrales, deben estar separadas como mínimo 3 años en el tiempo, lo cual es ideal para detectar los cambios del sector en estudio, además las imágenes deben ser de la misma estación para una mayor confiabilidad de resultados y análisis de los datos.

Las imágenes satelitales deben ser elegidas con un porcentaje de nubosidad menor al 20% a fin de obtener de manera más completa el cuerpo hídrico a estudiar y sin zonas faltantes de información.

La delimitación de los cuerpos de agua debe ser complementada por una supervisión manual por parte del usuario, debido al error que se pueden generar por la presencia de nubes o a lo largo del procesamiento de datos.

La resolución de la imagen satelital condiciona y define los resultados esperados, por ello es recomendable una buena resolución para emplear este tipo de análisis orientada a una clasificación basada índice de humedad de los píxeles, ya que en dependencia de ello se darán mejores resultados al separar, delimitar y diferenciar los cuerpos de agua con la vegetación.

Es muy importante el uso de cartografía homóloga de diferentes fuentes o escalas, con la finalidad de tener indicios al momento de realizar trabajos de campo y en oficina.

10. Bibliografía

- Acosta, G. M. (2016). Modificación de los cauces de los ríos por causas naturales y por influencias del hombre. ISSU. II. 60-6. Issuu.com: https://issuu.com/auge21/docs/5-a21-modificacion_de_cauces_de_rio
- Agencia Espacial Europea (ESA), (2015). Guía técnica de Sentinel-2 MS. Sentinel.esa.int. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-ms>.
- Artemisa, U. (2014). Geomorfología fluvial. Universidad del Cauca. Yumpu. <https://doczz.es/doc/470566/procesos-fluviales---universidad-del-cauca>
- Arias, P. 2017. Curiosfera. Qué es un río, partes y tipos. Tomado de: <https://curiosferaciencia.com/que-es-un-rio-definicion-tipos-partes/>
- Bustos, O. 1993. Introducción a los procesos markovianos en el análisis y procesamiento de imágenes, Universidad Nacional de Córdoba, Tomado de: https://www.researchgate.net/publication/228635353_Introduccion_a_los_procesos_markovianos_en_el_analisis_y_procesamiento_de_imagenes
- Capdevila, E., & Mínguez, C. (2012). Introducción a los Sistemas de Información Geográfica.
- Charlton, R. (2007). FUNDAMENTALS OF FLUVIAL GEOMORPHOLOGY.
- Clarín (2017, 17 de marzo). Inundaciones provocadas por el río Paraná. Clarín.com. <https://www.clarin.com/ultimo-momento/700-evacuados-zonas-riberenas>.
- Chuvieco E. (2010): *Teledetección Ambiental*. Ira Ed. Planeta S.A Barcelona, España. 590 p.
- Lazo, O. R. (1999). SISBIB. Obtenido de http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/indata/v02_n2/sistemas.htm
- Cuenca, Á. (2015). Gobierno Autónomo Descentralizado de la Parroquia San Carlos de las minas. Obtenido de: https://gadparroquialsancarlosdelasminas.gob.ec/wpcontent/uploads/2020/10/1960139380001_PDOT-SCM-FINAL-IMPRIMIRNXPowerLite_30-10-2015_23-47-12_compressed.pdf
- Fernández, I. (2001). El satélite Landsat. Análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+ satélite Landsat. Valladolid. https://www.academia.edu/6708074/An%C3%A1lisis_Visual_de_Im%C3%A1genes_Obtенidas_del_Sensor_ETM_Sat%C3%A9lite_Landsat
- García Sánchez J. y Maza Álvarez J. A. (1995) Cap. 11 del Manual de Ingeniería de Ríos “Morfología de Ríos”. Instituto de Ingeniería de la UNAM
- Gobierno autónomo descentralizado provincial de Zamora Chinchipe (2019). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial 2019-2023. Zamora-chinchipe.gob.ec: <https://zamora-chinchipe.gob.ec/wp-content/uploads/2020/08/PDOT-2019-2023-ZAMORA-CHINCHIPE.pdf>
- Hernández, L., (2014). Dinámica de la corteza terrestre. Geografia99.webnode.mx <https://geografia99.webnode.mx/a2-2-dinamica-de-la-corteza-terrestre-/>

- Herrera, M.; Porras, L.; Estrella, C. 2018. Propuesta de declaración del espectro electromagnético para Ecuador. *Geoespacial*, 15(1): 15-32.
- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 13(1), 350–361. <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350> Horton, R. E. (1945).
- Horton, R. E. (1932a). Drainage-Basin characteristics. *TRANSACTIONS, AMERICAN GEOPHYSICAL UNION*, 13(1), 350–361.
- Horton, R. E. (1932b). Drainage-basin characteristics. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 13(1), 350–361. <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>
- Horton, R. E. (1945a). Erosion development in stream and their drainage basins. *Geological Society Of America Bulletin*, 56(1), 275–370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56)
- Horton, R. E. (1945b). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 56, 275–370.
- IAGD, 2019. Fundamentos de teledetección. Energía electromagnética. Tomado de: <https://innovacione.eu/2019/06/24/fundamentos-de-teledeteccion/>
- López Bermúdez, F., & Romero Díaz, M. (1987). Morfometría de redes fluviales: revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al alto Guadalquivir. *Papeles de Geografía*, 12, 47–62.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Navarro, J. (julio, 2017). Definición de Imagen Satelital. Definición ABC. <https://www.definicionabc.com/tecnologia/imagen-satelital.ph>
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. España: Create Space
- Pérez, G. Rodríguez, J. Molina, J. (2019). Ingeniería de ríos. Michoacana. <https://www.academia.edu/34125526/INGENIERIA%20DE%20RIOS>
- Pinilla, C. (2020). *Teledetección: teoría y aplicaciones*, Primera edición, Dominio Público. <https://archive.org/details/teledeteccion/00-Teledeteccion%20teoria%20y%20aplicaciones/>
- PÉREZ J. 1979. *Fundamentos del ciclo hidrológico*. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Departamento de Meteorología e Hidrología. Caracas - Venezuela. 01 - 38.
- Rai, P. K., Singh, P., Mishra, V. N., Singh, A., Sajan, B., & Shahi, A. P. (2020). Geospatial approach for quantitative drainage morphometric analysis of varuna river basin, India.

Journal of Landscape Ecology(Czech Republic), 12(2). <https://doi.org/10.2478/jlecol-2019-000>

- Richards, K. 1987, Fluvial geomorphology. Journals. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/030913338701100309>.
- Ríos, E. Avalos, H. González, I. Pineda, R. (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. Publisher. Primera Edición. https://www.researchgate.net/publication/280938710_Cuencas_hidrograficas_Fundamentos_y_perspectivas_para_su_manejo_y_gestion
- Rodrigo, R. (2021). ¿Cuáles son los principales problemas que enfrenta la cuenca Murray-Darling? Estudiando.com.<https://estudiando.com/cuales-son-los-principales-problemas-que-enfrenta-la-cuenca-murray-darling/>
- Rodríguez, F. (2020, 20 de julio). MTOP interviene la vía Zamora – Chuchumbleta, sector Quiringue. obraspublicas.gob.ec: <https://www.obraspublicas.gob.ec/mtop-interviene-la-via-zamora-chuchumbleta-sector-quiringue/>
- Schumm, S. A. (1956). Geological Society of America Bulletin EVOLUTION OF DRAINAGE SYSTEMS AND SLOPES IN BADLANDS AT PERTH AMBOY , NEW JERSEY. Geological Society Of America Bulletin, 67(5), 597–646. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67)
- Senciales González, J. M. (1998). El análisis morfológico de las cuencas fluviales aplicado al estudio hidrográfico. Norba. Revista de Geografía., 10, 155–183
- Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), (2013). Misiones Satelitales Landsat. USGS. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In Chow VT (Ed) Handbook of Applied Hydrology. McGraw Hill Book Compan.
- Strahler, A. N. (1952). HYPOMETRIC (AREA-ALTITUDE) ANALYSIS OP EROSIONAL TOPOGRPHY. Geological Society of America Bulletin, 11. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)6](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)6)
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In Chow VT (Ed) Handbook of Applied Hydrology. McGraw Hill Book Compan.
- Tiwari, H., Rai, S. P., & Shivangi, K. (2016). Bridging the gap or broadening the problem? Natural Hazards, 84(1), 351–366. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2422-x>
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Zhan, X., Sohlberg, R. A., Townshend, J. R. G., Dimiceli, C., & Carroll, M. L. (2002). Detection of land cover changes using MODIS 250 m data. 83, 336–350

11. Anexos

Anexo 1. Datos de la zona de estudio

Tabla 26. Temperatura y precipitación media mensual la zona de estudio

Estación	Coordenadas UTM WGS 84 17S			Temperatura(°C)	Media Anual (mm/año)
	X (m)	Y (m)	Z (m)		
Gualaquiza (Código: M0189)	770387,6	9623849,0	2760,0	23,0	1835,5
Yantzaza (Código: M190)	748957,2	9576017,6	2359,0	23,2	2183,4
La Argelia (Código: M033)	699905,2	9554269,0	2160,0	16,2	1048,3
Vilcabamba (Código: M144)	695932,1	9529518,0	1560,1	20,8	888,0

Nota. Tomado del Anuario Meteorológico, 1990-2013

Anexo 2. Datos de radio de curvatura e índice de sinuosidad

Tabla 27. Datos radio de curvatura Zona 1 (Rc)

Radio de curvatura Zona 1 en metros (Rc)								
Sección	1985	1991	1996	2000	2007	2010	2015	2022
R1	310	384	458	400	532	529	625	612
R2	524	547	472	480	383	385	413	529
R3	426	298	269	292	362	370	287	432
R4	356	306	276	288	222	210	208	171
Promedió	404	384	369	365	375	374	383	436

Tabla 28. Datos radio de curvatura Zona 2 (Rc)

Radio de curvatura Zona 2 en metros (Rc)								
Sección	1985	1991	1996	2000	2007	2010	2015	2022
R1	646	616	614	566	799	705	855	528
R2	516	562	499	576	812	845	858	550
R3	742	298	610	300	127	121	417	291
R4	307	306	302	173	221	204	290	445
Promedió	552,75	445,5	506,25	403,75	489,75	468,75	605	453,5

Tabla 29. Datos radio de curvatura Zona 3 (Rc)

Radio de curvatura Zona 3 en metros (Rc)								
Sección	1985	1991	1996	2000	2007	2010	2015	2022
R1	286	345		330				
R2	544	505	593	695	688	637	620	597
R3	227	284	210	238	235	239	165	201
Promedió	352	378	401,5	421	461,5	438	393	399

Tabla 30. Datos radio de curvatura Zona 4 (Rc)

Radio de curvatura Zona 4 en metros ((Rc)								
Sección	1985	1991	1996	2000	2007	2010	2015	2022
R1	227	260	260	243	272	283	304	394
R2	215	255	256	224	135	130	156	133
Promedió	221	257,5	258	233,5	203,5	206,5	230	263,5

Tabla 31. Datos radio de curvatura media de cada zona (Rc)

Radio de curvatura en metros (Rc)								
	1985	1991	1996	2000	2007	2010	2015	2022
Zona 1	404	383,75	369	365	374,75	373,5	383,25	436
Zona 2	553	445,5	506	404	489,75	468,75	605	453,5
Zona 3	352	378	402	421	461,5	438	392,5	399
Zona 4	221	257,5	258	234	203,5	206,5	230	263,5

Tabla 32. Longitud del canal de cada zona

Longitud del canal en metros (L)								
	1985	1991	1996	2000	2007	2010	2015	2022
Zona 1	4766	4766	4766	4766	4766	4766	4766	4766
Zona 2	5721	5721	5721	5721	5721	5721	5721	5721
Zona 3	2439	2439	2439	2439	2439	2439	2439	2439
Zona 4	2671	2671	2671	2671	2671	2671	2671	2671

Tabla 33. Longitud del meandro

Longitud del meandro en metros (l)								
	1985	1991	1996	2000	2007	2010	2015	2022
Zona 1	5003,3	5165	5018	5303	5730	5685	5476	5244
Zona 2	6896,8	7336	7088	7879	7316	7242	7323	7456
Zona 3	5685	6175	5985	6304	5206	5802	5298	5371
Zona 4	3117,3	3112	3150	3139	3064	3089	3103	3039

Tabla 34. Sinuosidad de las zonas de estudio

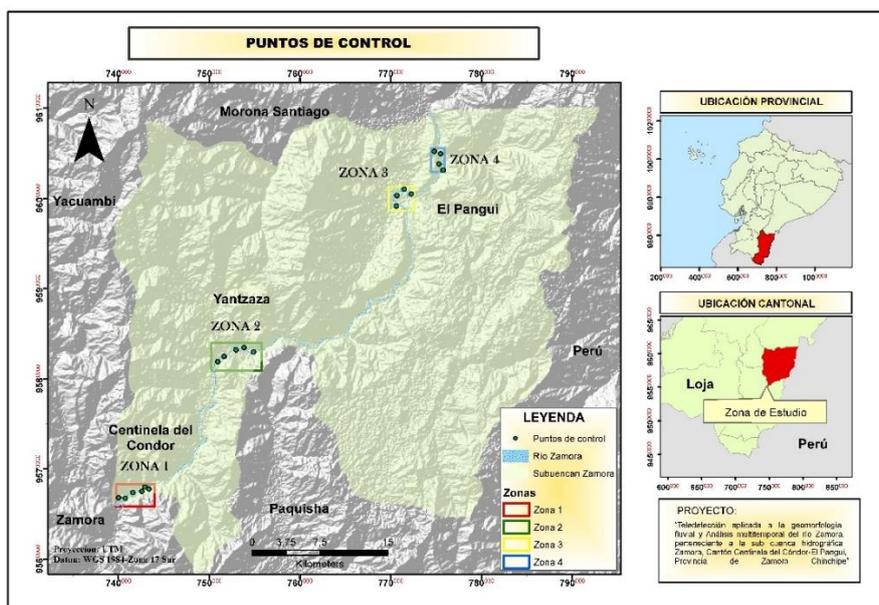
Sinuosidad (Sr)									
	1985	1991	1996	2000	2007	2010	2015	2022	Prom
Zona 1	1,0	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1
Zona 2	1,2	1,3	1,2	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Zona 3	2,3	2,5	2,5	2,6	2,1	2,4	2,2	2,2	2,3
Zona 4	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,2	1,2	1,1	1,2

Anexo 3. Puntos de control

Tabla 35. Puntos de control

PUNTOS DE CONTROL				
Coordenadas			Sector	Zona
X (m)	Y (m)	Z (m)		
740022m	9566809m	887m	Guadalupe	1
740736m	9566741m	877m	Cumbaratza	1
741577m	9567372m	865m	Cumbaratza	1
742553m	9567538m	869m	Cumbaratza	1
742900m	9567951m	881m	Zumbi	1
743346m	9567736m	860m	Cumbaratza	1
750921m	9581928m	870m	Yantzaza	2
751632m	9582490m	865m	Yantzaza	2
752939m	9588253m	871m	Yantzaza	2
753832m	9583449m	887m	Yantzaza	2
754907m	9582936m	881m	Yantzaza	2
770614m	9599138m	848m	El Pangui	3
770693m	9600313m	851m	El Pangui	3
771487m	9601043m	862m	El Pangui	3
772265m	9600519m	850m	El Guismi	3
775774m	9603128m	843m	Tundayme	4
775324m	9603855m	853m	El Guismi	4
775109m	9604967m	871m	Tundayme	4
774821m	9605231m	852m	El Guismi	4

Anexo 4. Puntos de control en mapa

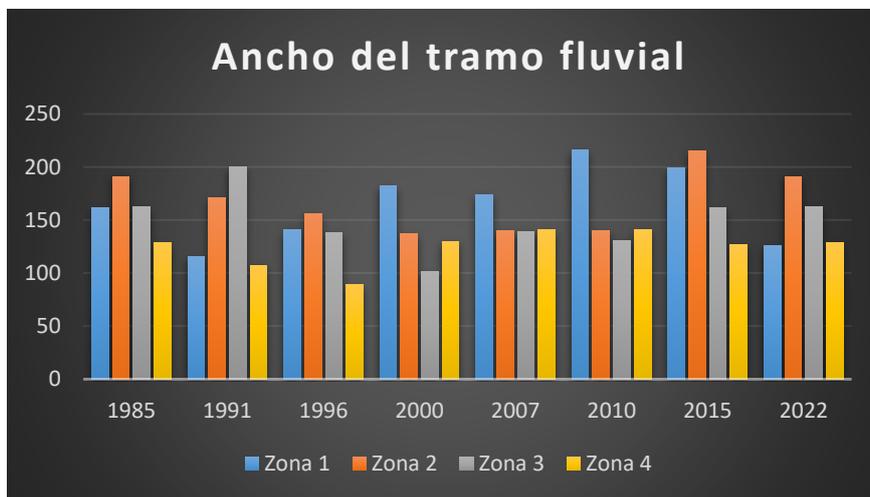
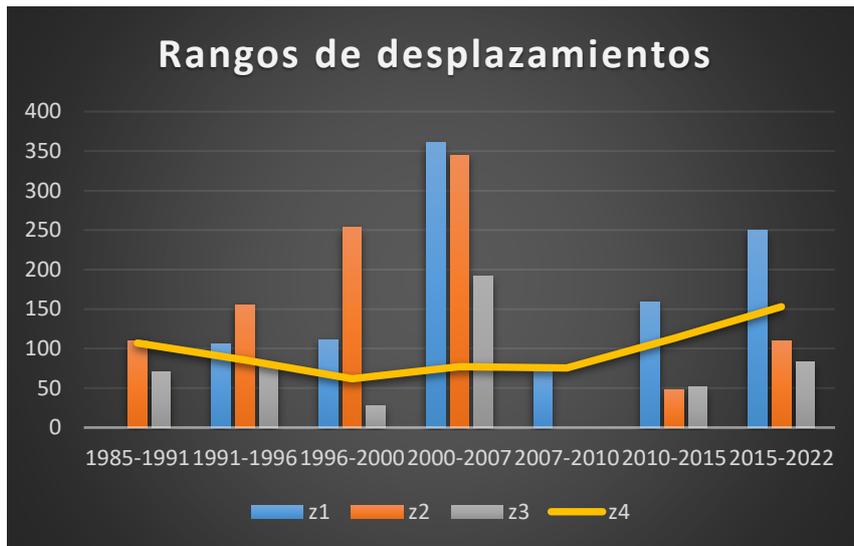


Anexo 5. Ficha de campo.

Tabla 36. Ficha de campo para la corroboración de información

		<p align="center">"Geomorfología fluvial y análisis multitemporal del río Zamora, cantón Centinela del Cóndor-El Pangui, provincia de Zamora Chinchipe"</p>					
Código:			Canal fluvial				
Responsable:			Rectilíneo				
Provincia:			Meándrico				
Cantón:			Anastomosado				
Sector:			Presencia de Estructuras			Grado de afectación	
Coordenadas UTM-DATUM WGS84			SI		Bajo		
X:	Y:	Z:	No		Medio		
Dimensiones	Ancho	Largo	Presencia de cultivos				
			SI		Alto		
Geoformas			No				
			Geología				
Fotografía							
Descripción							

Anexo 6. Tablas de valores



21 de Febrero de 2024

Lic. Diego Alfonso Ríos Álvarez

LICENCIADO EN PEDAGOGÍA DE IDIOMA INGLÉS

CERTIFICA:

Yo, Lic. Diego Alfonso Ríos Álvarez con cedula de identidad 1104158686 en mi calidad de Licenciado en Pedagogía de Idioma Inglés con capacidades que pueden ser aprobadas a través de la certificación de conocimiento del inglés, certifico: Que tengo el conocimiento y dominio de los idiomas español e inglés y que la traducción del trabajo de titulación: **"TELEDETECCIÓN APLICADA A LA GEOMORFOLOGÍA FLUVIAL Y ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL RÍO ZAMORA, PERTENECIENTE A LA SUBCUENCA HIDROGRÁFICA ZAMORA, CANTÓN CENTINELA DEL CÓNDOR-EL PANGUI, PROVINCIA DE ZAMORA CHINCHIPE"** autoría de **Víctor Mauricio Arévalo Pineda** con número de cédula **1105639403**, estudiante de la carrera de Ingeniería en Carrera de Ingeniería en Geología Ambiental y Ordenamiento Territorial de la Universidad Nacional de Loja.

Lo certifico en honor a la verdad y autorizo al interesado hacer uso del presente en lo que a sus intereses convenga.



Lic. Diego Alfonso Ríos Álvarez

Docente de lenguas extranjeras

Nro de registro Senecyt 1031-2023-2757746