

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

“Geomorfología fluvial y análisis multitemporal del río Bajiña,
Los Ríos - Ecuador”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Geología

Presentado por:

Michael Ángel Rodríguez Ortega

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

Solo hay una mujer en el mundo capaz de dar su amor con abnegación y ternura. Capaz de dar su vida por la vida de su hijo y capaz de todos los sacrificios por su felicidad. Ella es mi madre querida, la arquitecta de mi destino, el arco iris de todos mis horizontes y la estrella más luminosa de todas las galaxias. A ti madre mía Nancy Edith Ortega León dedico con mucha humildad este triunfo; y lo digo con mucha alegría y satisfacción porque tú mereces más, porque tú mereces todo lo mejor de este mundo y del cielo mamá.

AGRADECIMIENTOS

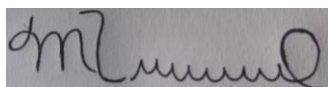
A veces el sentimiento humano no logra reunir todos los elementos del afecto y de la gratitud que tenemos en nuestros corazones para expresar en todo su valor el reconocimiento profundo y verdadero a quienes dieron con amor, sacrificio, dedicación y ternura, la voluntad, la fuerza y el coraje para llegar con éxito a la cima. Solo puedo decir desde el fondo de mi alma:

¡Muchas Gracias a todos los que me guiaron desde el comienzo de mi carrera e hicieron posible que llegue a la meta!

Gracias Dios, papá, mamá, amigos y maestros por ayudarme a triunfar y llegar al éxito tanto personal como espiritual. Los tendré eternamente en mi memoria

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me(nos) corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; (*nombre de los participantes*) y doy(damos) mi(nuestro) consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Michael Ángel
Rodríguez Ortega

EVALUADORES

.....
MSc. David Altamirano M.

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
MSc. David Altamirano M.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La geomorfología fluvial es una subdisciplina importante de la geología que tiene como función principal analizar e interpretar las variaciones en la dirección de flujo de una red de drenaje, que son el conjunto de ramales que se evidencian dentro de una cuenca hidrográfica, las cuales dan lugar a la formación de los diferentes tipos de ríos (rectos, devanados, anastomosados y meándricos); y que estos a su vez se los define como entes de agua dinámicos que cambian en el tiempo y en el espacio, debido a los distintos fenómenos naturales (clima) y geológicos (erosión y meteorización) que se originan sobre la corteza terrestre; aunque en algunos casos la dirección de afluencia del canal de un río puede ser alterada producto de la actividad antrópica generada por el hombre, provocando inundaciones y deslaves que pueden afectar o poner en riesgo a la población que habita en los sectores aledaños a su cauce, por lo que es indudablemente necesario estudiar el comportamiento de su caudal para el desarrollo de estrategias correctas en la planificación y ordenamiento territorial. Este estudio consistió en categorizar cambios morfológicos del río Bajaña mediante la aplicación de imágenes satelitales de los años 1985, 1990, 2000, 2001, 2016 y 2019 correspondientes a los satélites Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8, y Sentinel 2 adquiridos de las plataformas de la Earth Explorer (USGS) y Copernicus Open Access Hub. La extracción de los canales de flujo del río fueron delimitados en ArcMap, mediante 2 índices de masa de agua diferenciada normalizada que son: El NDWI planteado por Mcfeeters (1996) y MNDWI formulado por Xu (2006). Luego, se tuvo que completar manualmente los datos obtenidos por estos dos métodos debido a la pérdida de información producida a largo del procesamiento. El proyecto se basó en estudiar las áreas que presentaron mayores variaciones en la orientación del curso del río Bajaña, donde se evidenció 6 cambios notables a través del tiempo y canales abandonados. Se cálculo 13 parámetros geomorfológicos para examinar la cuenca hidrográfica del río Vinces; y 3 parámetros morfométricos para analizar las subzonas donde se observó más variación en la forma y geometría de los meandros del río, con el fin de mitigar posibles desbordamientos a futuro.

Palabras Clave: Geomorfología fluvial, Imágenes Satelitales, Análisis multitemporal, NDWI, MNDWI.

ABSTRACT

Fluvial geomorphology is an important sub-discipline of geology whose main function is to analyze and interpret the variations in the flow direction of a drainage network, which are the set of branches that are evidenced within a hydrographic basin, which give rise to the formation of the different types of rivers (straight, winding, anastomosed and meandering); and that these in turn are defined as dynamic water entities that change in time and space, due to the different natural (climate) and geological (erosion and weathering) phenomena that originate on the earth's crust; Although in some cases the flow direction of a river channel can be altered as a result of human-generated human activity, causing floods and landslides that can affect or endanger the population living in the sectors surrounding its channel, Therefore, it is undoubtedly necessary to study the behavior of its flow for the development of correct strategies in planning and land use. This study consisted of categorizing morphological changes of the Bajaña River by applying satellite images from the years 1985, 1990, 2000, 2001, 2016 and 2019 corresponding to the Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8, and Sentinel 2 satellites acquired from the platforms of the Earth Explorer (USGS) and Copernicus Open Access Hub. The extraction of the river flow channels was delimited in ArcMap by means of two normalized differentiated water indices that are: The NDWI proposed by Mcfeeters (1996) and the MNDWI formulated by Xu (2006). Then, the data obtained by these two methods had to be completed manually due to the loss of information produced throughout the processing. The project consisted of studying the areas that presented the greatest changes in the Bajaña riverbed, where 6 notable variations over time and abandoned channels were evidenced. 13 geomorphological parameters were calculated to examine the hydrographic basin of the Vines river; and 3 morphometric parameters to analyze the subzones where more variation was observed in the shape and geometry of the meanders of the river, to mitigate possible overflows in the future.

Keywords: *Fluvial Geomorphology, Satellite Images, Multitemporal Analysis, NDWI, MNDWI.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE PLANOS	X
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Descripción del problema	4
1.3 Justificación del problema.....	5
1.4 Ubicación del Área de Estudio.....	5
1.5 Objetivos.....	7
1.5.1 Objetivo General	7
1.5.2 Objetivos Específicos	7
1.6 Marco Teórico.....	7
1.6.1 Geología Regional.....	7
1.6.2 Geología Local	10
1.6.3 Geomorfología	11
1.6.4 Hidrología.....	14
1.6.5 Clima.....	16
CAPÍTULO 2.....	18

2.	MARCO CONCEPTUAL	18
2.1	Geomorfología	18
2.1.1	El Ciclo Geográfico o de William Morris Davis:	18
2.1.2	Sistema Geomorfológico	19
2.1.3	Geomorfología Fluvial	19
2.1.4	Sistemas Fluviales	19
2.1.5	Hidrosistema	20
2.1.6	Erosión Fluvial.....	20
2.1.7	Tipos de Canales Fluviales según su Geomorfología	20
2.2	Redes de Drenajes	22
2.3	Ríos	22
2.4	Parámetros geomorfológicos asociados a un río meándrico	23
2.5	Cuenca Hidrográfica	25
2.6	Clasificación de las Cuencas Hidrográficas	26
2.7	Parámetros asociados a una cuenca hidrográfica	27
2.8	Teledetección Espacial.....	32
2.8.1	Tipos de resoluciones de las imágenes satelitales.....	33
2.8.2	Imágenes Satelitales Sentinel	34
2.8.3	Imágenes Satelitales Landsat	36
2.8.4	Aplicaciones de la teledetección	38
2.8.5	Identificación de masa de agua	39
	CAPÍTULO 3.....	42
3.	DESARROLLO METODOLÓGICO	42
3.1	Adquisición de datos.....	43
3.1.1	Imágenes Satelitales	43
3.2	Mapas Geológicos	44

3.3	Formatos shapefile (SHP).....	44
3.4	Metodología	44
3.4.1	Análisis Multitemporal	44
3.5	Parámetros Geomorfométricos de la Cuenca Hidrográfica.....	50
3.6	Parámetros Geomorfométricos del río Bajaña.....	51
CAPITULO 4.....		52
4.	Resultados y Análisis	52
4.1	Parámetros de la Cuenca Hidrográfica del Guayas.....	52
4.2	Análisis de Resultados de las Imágenes Satelitales (1985-2019)	54
4.2.1	Vectorización de las Imágenes Satelitales (1985-2019).....	55
4.2.2	Correcciones manuales en las imágenes satelitales (1985-2019)	57
4.2.3	Análisis multitemporal de las imágenes satelitales (1985-2019)	58
4.3	Parámetros Morfométricos o Geomorfológicos del Río Bajaña	60
4.3.1	Radio de Circularidad (Rc)	60
4.3.2	Índice de Sinuosidad (Sr)	60
4.3.3	Índice de Estanqueidad (Es)	62
4.4	Análisis de Resultados de los Parámetros del Río Bajaña.	63
4.5	Análisis de Resultados Generales para el Río Bajaña.	69
CAPÍTULO 5.....		71
5.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	71
5.1	Conclusiones	71
5.2	Recomendaciones	72
BIBLIOGRAFÍA.....		73
ANEXOS.....		81

ABREVIATURAS

GIS: Geographical Information System

IGM: Instituto Geográfico Militar

INAMHI: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

MIR: Medium Infra-Red

MSP: Ministerio de Salud Pública

MNDWI: Modified Normalized Difference Water Index

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

NDWI: Normalized Difference Water Index

NIR: Near Infra-Red

OPM: Organización Panamericana de la Salud

PRONAREG: Programa Nacional de Regionalización Agraria

SWIR: Short Wave Infra-Red

SHP: Shapefile

USGS: United States Geological Survey (Earth Explorer)

COAH: Copernicus Open Access Hub

SIMBOLOGÍA

Dd: Densidad de drenaje

Ff: Factor de forma

Fs: Frecuencia de flujo

Lg: Longitud de flujo terrestre

Lu: Longitud del flujo

Lsm: Longitud media del flujo

Nu: Número de flujo

R: Relieve

Rb: Relación de bifurcación

Rbm: Relación media de bifurcación

Rc: Radio de curvatura

Re: Relación de alargamiento

Rc: Relación de circularidad

RI: Relación de longitud del flujo

Rr: Relación de relieve

Sr: Índice de Sinuosidad

L: Longitud del Canal

I: Longitud de Onda del Meandro

Es: Índice de Estanqueidad

T: Textura de drenaje

U: Orden del flujo

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación de la Zona de Estudio	6
Figura 1.2 Esquema de las redes de drenaje de la cuenca del río Guayas.....	9
Figura 1.3 Distribución porcentual de los tipos de relieve en Buena Fe.....	14
Figura 1.4 Cuenca Hidrográfica del Guayas y sus principales afluentes.....	15
Figura 2.1 Clasificación morfológica de las redes de drenaje.....	22
Figura 2.2 Estimación del Radio de curvatura en un río.....	23
Figura 2.3 Cálculo y clasificación de la sinuosidad (S_r) según sus valores.....	24
Figura 2.4 Esquema de un sistema fluvial idealizado.....	26
Figura 2.5 Componentes de un sistema de teledetección.....	33
Figura 2.6 Composiciones de bandas que se aplican a las imágenes Sentinel 2.....	35
Figura 2.7 Métodos para la extracción de masas de agua en imágenes satelitales...	39
Figura 3.1 Esquema de la metodología utilizada.....	45
Figura 3.2 Imágenes satelitales utilizadas en el presente estudio.....	46
Figura 3.3 Análisis visual de las variaciones geomorfológicos del río Bajaña.....	47
Figura 3.4 Aplicación del NDWI a las imágenes satelitales Landsat y Sentinel.....	48
Figura 3.5 Aplicación del MNDWI a las imágenes satelitales Landsat y Sentinel.....	49
Figura 3.6 Realce mediante mosaicos a las imágenes satelitales.....	49
Figura 4.1 Reclasificación de las Imágenes Satelitales a Binarias.....	55
Figura 4.2 Vectorización de las Imágenes Satelitales Binarias.....	56
Figura 4.3 Correcciones manuales de las Imágenes Satelitales Binarias.....	57
Figura 4.4 De A-F se evidencian 6 cambios notables en la forma del río Bajaña.....	58
Figura 4.5 Cambios en la morfología del Río Bajaña a través del tiempo.....	58
Figura 4.6 Esquema general del Río Bajaña con sus variaciones de cauce.....	59
Figura 4.7 Zona 1 donde hubo mayores cambios en la morfología del río Bajaña.....	63
Figura 4.8 Zona 2 donde hubo mayores cambios en la morfología del río Bajaña....	64
Figura 4.9 Zona 3 donde hubo mayores cambios en la morfología del río Bajaña....	65
Figura 4.10 Zona 4 donde hubo mayores cambios en la morfología del río Bajaña...	66
Figura 4. 11 Zona 5 donde hubo mayores cambios en la morfología del río Bajaña..	67
Figura 4.12 Zona 6 donde hubo mayores cambios en la morfología del río Bajaña...	68
Figura 4.13 Tipos de índice de sinuosidad (S_r) a la que pertenece el Río Bajaña.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Unidades genéticas, geomorfológicas y denominaciones geológicas.....	13
Tabla 2.1 Clasificación de los ríos en base a su Índice de Sinuosidad.....	24
Tabla 2.2 Clasificación de cuencas según su tamaño.....	27
Tabla 2.3 Características espaciales de las imágenes satelitales Sentinel 2.....	35
Tabla 2.4 Características espaciales de las imágenes satelitales de Landsat 5.....	36
Tabla 2.5 Diferencias de las bandas de las imágenes Landsat 7 y Landsat 8.....	37
Tabla 2.6 Diferentes composiciones de bandas de Landsat 7 y Landsat 8.....	37
Tabla 3.1 Descripción de las imágenes satelitales Landsat 5, 7, 8 y Sentinel 2.....	43
Tabla 3.2 Parámetros geomorfológicos para la cuenca hidrográfica del Guayas.....	50
Tabla 3.3 Parámetros geomorfológicos para el cauce del río Bajiña.....	51
Tabla 4.1 Parámetros morfométricos calculados para la cuenca del río Guayas.....	54
Tabla 4.2 Radio de circularidad (R_c) de cada zona que presenta variación.....	60
Tabla 4.3 Largo del canal (L) de cada zona que presenta variación.....	61
Tabla 4.4 Longitud de onda del meandro (l) de cada zona que presenta variación..	61
Tabla 4.5 Índice de Sinuosidad (S_r) de cada zona que presenta variación.....	61
Tabla 4.6 Ancho del canal (w) de cada zona que presenta variación.....	62
Tabla 4.7 Índice de Estanqueidad (E_s) de cada zona que presenta variación.....	62
Tabla 4.8 Porcentaje al que pertenece cada tipo de río por año de análisis, según su porcentaje de Sinuosidad (S_r) dentro de la zona de estudio.....	69
Tabla 4.9 Porcentaje al que pertenece cada tipo de curva meándrica del río por año de análisis, según su porcentaje de Estanqueidad (E_s) dentro de la zona de estudio.....	69

ÍNDICE DE MAPAS

MAPA 1	Hoja Geológica #48 de Quevedo (1:100000).....	81
MAPA 2	Hoja Geológica #47 de Valencia (1:100000).....	81
MAPA 3	Mapa de la Cuenca Hidrográfica del río Guayas (1:600000).....	82
MAPA 4	Mapa de relieve de la Cuenca Hidrográfica del río Guayas (1:400000).....	82

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La geomorfología fluvial es una subdisciplina geomórfica que se enfoca en la explicación de los procesos fluviales (transporte, sedimentación, acumulación y depositación) de las redes de drenaje de una cuenca hidrográfica provocados por accidentes geográficos (erosión y meteorización) sobre la corteza terrestre (Álvarez, 2013). Estudia la estructura, la forma y la geometría del cauce de los ríos, por medio del cálculo de parámetros morfométricos tanto para la cuenca hidrográfica como para el canal o caudal del río, analizando e interpretando los procesos naturales y geológicos que provocan los cambios a lo largo del tiempo de los afluentes de agua (Ollero, 2008). Es de suma importancia comprender y registrar el movimiento y la dirección de flujo de los ríos para gestionar estrategias preventivas que contribuyan al desarrollo sostenible de la sociedad (Wohl, 2014).

El río es una red de drenaje dinámica (varía en el tiempo y espacio) que se encarga de transportar agua y materiales sedimentarios desde de su nacimiento en las cordilleras hasta su posterior desembocadura en el mar. El curso del río puede ser afectado por la acción de la naturaleza ligada a cambios constantes en el clima, ocasionando crecidas y deslaves producto de las intensas lluvias y obras antrópicas concernientes a la mano del hombre (Goudie, 2006; Harden, 2006).

Los cambios morfológicos y geométricos de los ríos se representan a través de diagramas de bloques, modelos analíticos, datos de campo y gráficos numéricos, por ejemplo, en el río Suquía - La Cañada (Argentina) se aplicó la técnica del PTV (Velocimetría por seguimiento de partículas) para un periodo de retorno de 25 años, midiendo la velocidad media del flujo entre un tramo correspondiente de 240 a 980 metros en 35 secciones transversales (García, 2014). No obstante, los avances en las herramientas tecnológicas (Tics) y la autorización al acceso de imágenes satelitales, hicieron viable su estudio y análisis a través de los datos de sensores remotos, mediante la teledetección espacial (Monegaglia et al., 2018).

Salvia (2010) realizó un análisis del aporte de la teledetección al estudio funcional del Delta del río Paraná, haciendo hincapié en cómo y en qué condiciones el análisis de datos provenientes de sensores remotos permite monitorear los procesos de un área específica, obteniendo como resultado un informe metodológico para el estudio de macrosistemas de humedales, por medio de la teledetección óptica y radar, generando el primer mapa regional de tipos fisonómicos de vegetación, mapas de inundación (2006 - 2007), mapas de áreas afectadas por los incendios masivos del 2008 y el crecimiento de la vegetación.

Según Spada (2018), los sensores remotos generan información valiosa de la superficie terrestre; y se ha manejado esta eficaz herramienta para representar la morfología los ríos a través del tiempo, facilitando así, la localización de las anomalías geológicas causadas sobre los sistemas fluviales en diferentes lugares de la Tierra, producto de los distintos fenómenos naturales y procesos antrópicos.

Soldano et al. (2004) aportó elementos para la determinación de la vulnerabilidad y riesgo ante eventos de inundación a partir de una técnica de percepción remota y de sistemas de información geográfica, obteniendo como resultado un mapa de susceptibilidad, peligrosidad o amenaza ante desbordamientos de los ríos por exceso de lluvias locales para el área urbana de la ciudad de Goya (Argentina), inscripta dentro del perímetro de las defensas.

En nuestro país, el análisis multitemporal de imágenes satelitales han sido utilizados para visualizar los cambios en la tasa de producción de vegetación y cobertura total de los tipos de suelo (Aguirre, 2019; Medina, 2015; Rosero, 2017).

López (2015) realizó un análisis multitemporal para determinar los cambios de la cobertura vegetal y el uso de la tierra entre los años 1987, 1998, 2001 y 2015 en el cantón Gualaquiza (Morona Santiago - Ecuador), utilizando imágenes satelitales multiespectrales Landsat 5 TM, 7 ETM+ y 8 OLI; mediante la fotointerpretación, en el que se identificó seis coberturas: Bosque nativo, páramo,

pasto cultivado, cuerpo de agua, zona urbana y zona sin información; y, además, evaluó los cambios del uso de la tierra en el período de tiempo analizado.

Las variaciones en la forma y geometría del río a lo largo de un período tiempo, se lo categoriza y representa mediante la aplicación de la teledetección, ya que los satélites tienen la capacidad de capturar imágenes a distancia con muy buena resolución para diferentes regiones del espectro denominada banda, la cual es llevada a una plataforma con su respectivo tamaño de píxel; lo que permite evidenciar, comparar, evaluar y analizar las zonas geográficas que han tenido un gran cambio morfológico a lo largo del tiempo (Sobrino, 2001).

El río Bajaaná (Buena Fe – Los Ríos) es uno de los más importantes sistemas fluviales de drenaje de la cuenca hidrográfica del río Guayas y su subcuenca del río Vines, ya que posee la capacidad de acarrear, transportar y depositar gran cantidad de materiales sedimentarios cada año; y por esta causa ha tenido algunos cambios morfológicos que no solo alteró su dirección de cauce, sino que afectó al medio biofísico (flora y fauna) y a la población que atraviesa o cruza su canal de afluencia (CEDIG & ORSTOM, 1989).

La dirección de flujo del río Bajaaná en lo que concierne a la gran llanura aluvial, sufre modificaciones producto de los cambios climáticos o naturales, geológicos y la constante actividad antrópica del sector, además, de la acumulación y depositación de sedimentos y su desplazamiento lateral que producen las intensas corrientes de agua sobre el canal (CEDIG & ORSTOM, 1989).

A los alrededores del río Bajaaná se evidencia diferentes tipos de paisajes y sistemas agrícolas con un recurso hídrico natural de clima templado, apto para la instalación de zonas recreativas, donde las personas podrán divertirse, disfrutar del espacio y practicar distintos deportes al aire libre por las canchas, parques y complejos turísticos que se ubican en esta zona (La Hora, 2002).

En 1992 le asignaron este nombre al presente río debido a su dueño “Puerto Bajaña”, antes denominado río Gallina, donde existe una gran variedad de paisajes naturales y ecológicos, principalmente en las cercanías del río Baba. Joel Viscarra comenzó la obra del complejo cabaña “Puerto Bajaña” con ayuda de las autoridades políticas encargadas de la zona, siendo este considerado como uno de los mejores balnearios con áreas recreativas y deportivas que tiene el cantón Buena Fe, en la provincia de Los Ríos - Ecuador (Camacho, 2019).

1.2 Descripción del problema

El principal problema a tratar en el presente proyecto se basa en que el río Bajaña (Buena Fe - Los Ríos) es un ente dinámico que cambia la morfología de su cauce a través del tiempo y el espacio, debido a los diferentes procesos de erosión y meteorización de la superficie terrestre; y a los constantes deslaves o desbordamientos en la zona que son producidos generalmente por efectos del cambio climático o fenómenos naturales y la actividad antrópica del lugar, afectando con sus constantes inundaciones o crecidas al medio biofísico (flora y fauna) y al desarrollo socioeconómico de la comunidad que habita en los sectores aledaños a su afluencia.

El comportamiento del caudal y flujo del río está condicionado por los distintos fenómenos geográficos, geológicos, meteorológicos y climáticos; también está coligado a la variación en su dirección de afluencia por efectos de las frecuentes actividades antrópicas (asentamientos humanos), como en el sector productivo (agricultura y ganadería) donde sus aguas aportan generalmente a los regados de los sembríos; y a la extracción de materiales sedimentarios áridos y pétreos destinados a obras civiles de construcción o geotecnia; como por ejemplo: Las construcciones de puentes, canchas, calles, carreteras, complejos turísticos, cabañas, balnearios, parques, casas, edificios, represas y malecones, etc.

1.3 Justificación del problema

En el presente proyecto se analiza la geomorfología fluvial durante toda la trayectoria o perímetro del río Bajaaná (Buena Fe – Los Ríos) a través de un análisis multitemporal de imágenes satelitales Landsat y Sentinel, identificando las zonas que presentan mayores cambios geomorfológicos a lo largo del tiempo. Estos sectores o áreas evidenciadas pueden servir de insumo y guía a las entidades o gobiernos autónomos descentralizados municipales cantonales (GAD) y provinciales para que desarrollen distintas actividades de prevención, mitigación, vulnerabilidad, amenaza y riesgo en el lugar. Además, que podrá ser utilizada como una herramienta eficaz en la planificación urbana y rural de las zonas circundantes al cauce o afluencia de este río.

1.4 Ubicación del Área de Estudio

El río Bajaaná es uno de los principales sistemas fluviales o red de drenaje del Ecuador ubicado dentro de la cuenca hidrográfica del río Guayas, específicamente sobre la subcuenca del río Vines, exactamente al norte de la provincia de Los Ríos (Ecuador), atravesando toda la superficie del cantón Buena Fe, el cual se encuentra limitado geográficamente al Norte con la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, al Sur con el cantón Quevedo, al Este con el cantón Valencia y al Oeste con el cantón el Empalme, este último perteneciente a la provincia del Guayas (Ver Figura 1.1).

En los alrededores de la zona de estudio se encuentran las cabañas del río “Puerto Bajaaná”, en el cantón Buena Fe; los balnearios del río “San Pablo”, “Puembo” y las “Cuevas de los Murciélagos”, estas dos últimas, ubicadas al Este del río Bajaaná en el cantón La Maná, provincia del Cotopaxi.

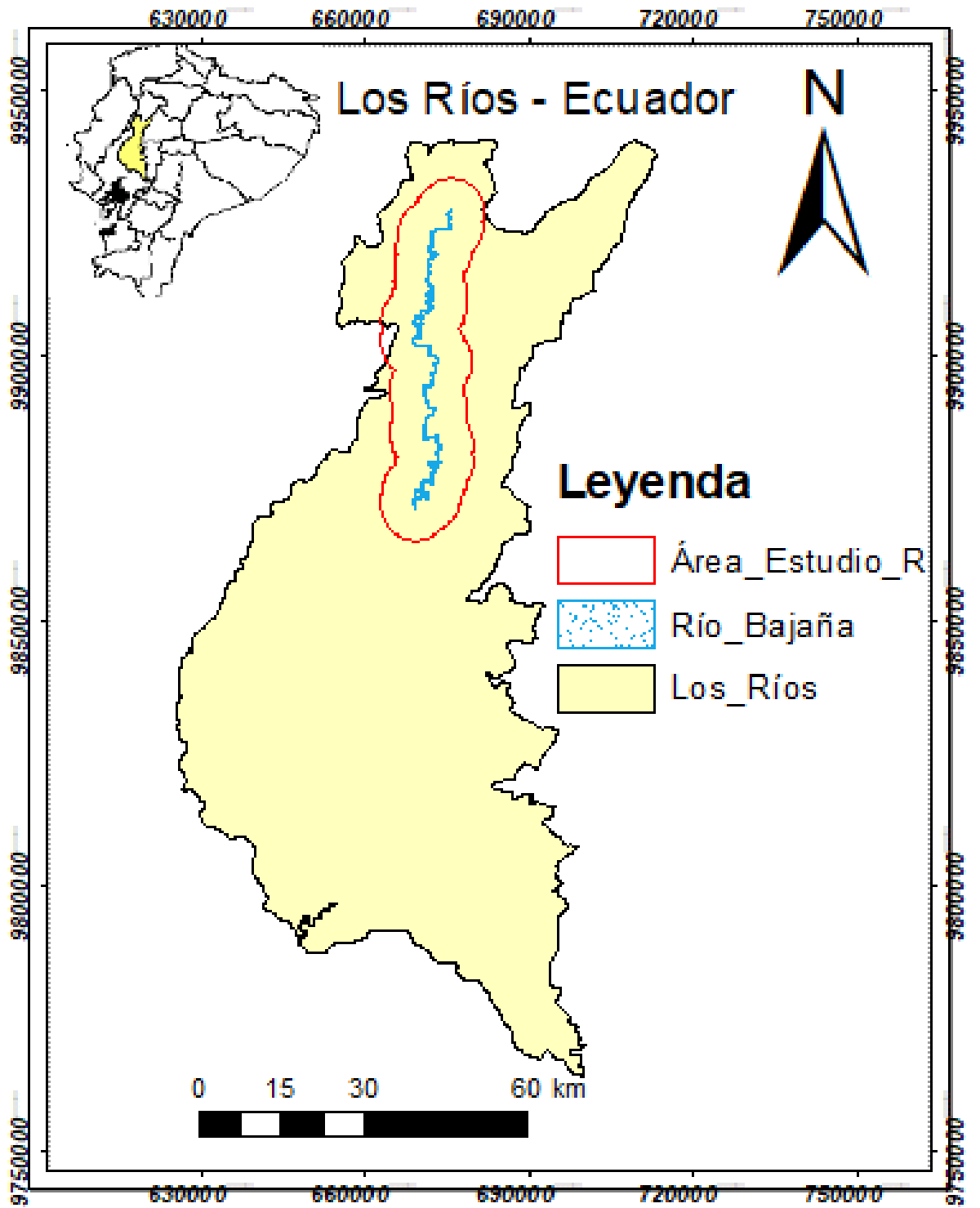


Figura 1.1 Ubicación de la zona de estudio. Fuente: [Autor]

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Analizar los cambios geomorfológicos del río Bajiña (Buena Fe) mediante un análisis multitemporal de imágenes satelitales (1985 - 2019) como una herramienta eficaz para la planificación y el ordenamiento territorial.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Categorizar los cambios de cauce a través del tiempo de la morfología del río Bajiña mediante el uso de sistemas de información geográfica (GIS).
- Determinar subzonas en las que son visibles los mayores cambios en la morfología del río Bajiña a lo largo de un período de tiempo (1985-2019).
- Calcular parámetros morfométricos ligados a la cuenca hidrográfica del río Guayas, específicamente a su subcuenca del río Vines y a las grandes variaciones asociadas a la morfología y geometría del río Bajiña.

1.6 Marco Teórico

1.6.1 Geología Regional

La zona de estudio se encuentra localizada en la región costanera del Ecuador, la cual se formó producto de acreciones de bloques alóctonos (bloque Piñón-Pallatanga y Norandino) al borde de la placa continental sudamericana (Reynaud et al, 1999). Estas acreciones constituyen un margen de proceso activo marcado por la subducción de la placa oceánica de Nazca bajo la placa Sudamericana (54 mm/año), provocando principalmente la evolución geodinámica de la cordillera de los Andes (Núñez del Arco, 2003). Al norte de este margen existe una segmentación de la placa sudamericana, dando lugar al bloque norandino que se extiende desde el Golfo de Guayaquil, atravesando los Andes ecuatorianos, colombianos y venezolanos, llegando a Caracas (Witt et al, 2006).

El proceso activo se inició aproximadamente hace unos 26 millones de años por consecuencia del surgimiento de la placa de Cocos y Nazca, como resultado de una reorganización de la placa antigua de Farallón (Haríds-Chumacher, 1976; Hey, 1971; Pennington, 1981).

Por la influencia del Punto Caliente de Galápagos y el centro de divergencia homónimo, existe la cordillera submarina de Carnegie, que está subduciéndose (10 mm/año) oblicuamente entre ángulos de 25° y 35° N (Guillier et al., 2001), originando, por consecuencia, una fractura y arranque tectónico del bloque norandino a través del sistema de falla transcurrente dextral (Winter et al., 1993); siendo éste el principal rasgo estructural en subducción frente al margen ecuatoriano, desde hace al menos 2 millones de años (Michaud & Witt, 2014).

Tectónicamente, el bloque norandino ha dado lugar al gran sistema estructural Mega-Shear de Guayaquil - Caracas, que en Ecuador el segmento es dominado principalmente por la falla Calacalí - Pallatanga en la Cordillera Occidental hasta la planicie costera antes de llegar al golfo de Guayaquil, con un desplazamiento de cizalla dextral de 2.9 - 4.6 mm/año en el Holoceno (Winter et al., 1993). Esto dio lugar a la formación de las diferentes cuencas sedimentarias terciarias y cuaternarias de la costa ecuatoriana como la de Progreso, la del Golfo de Guayaquil y la del Guayas (Jaillard et al., 1995).

Muñoz, et al. (2008), indica que tanto al Este y Sur, la cuenca hidrográfica del río Guayas se encuentra limitada por fallas de dirección NE - SW y que son parte del patrón andino, la misma que guarda un enlace con la falla horizontal de Guayaquil. Estudios realizados por Winter et. al (2003), relacionan la dirección de este patrón estructural con la abertura del Golfo de Guayaquil, donde las fallas Pallatanga y Zambapala son segmentos al suroeste de la zona de falla dextral principal Guayaquil – Dolores.

Dentro de los 18 sistemas fluviales hidrográficos que conforman la región Costa del Ecuador se encuentra ubicada la cuenca hidrográfica del río Guayas, donde la mayoría de sus redes de drenaje desembocan en el Océano Pacífico debido a potentes depósitos de pie de monte y estuarios que fueron acarreados, acumulados y rellenados ocasionando que el drenaje se concentre aguas abajo sobre la base de la cordillera de los Andes (INAMHI, 2012).

Según Dumont et al. (2007), la cuenca hidrográfica del río Guayas surgió durante el terciario con basamento de roca volcánica basáltica conformada por la formación Piñón, mientras sucedía la orogenia y la obducción de la cordillera costanera Chongón Colonche, lo cual trasladó el eje de deposición de la cuenca hidrográfica del río Guayas hacia el occidente del Ecuador continental.

Las redes de drenaje de la cuenca hidrográfica del río Guayas muestran dos desplazamientos producto de fracturas horizontales de movimiento dextral como la de Guayaquil-Dolores (ver Figura 1.2). En la parte superior de los canales de flujo se evidencia una orientación hacia el suroeste (SW), mientras que en la parte inferior esta trayectoria varía hacia el sureste (SE). Los lineamientos estructurales-tectónicos son registrados por fallas geológicas con orientación NE - SW al norte, y NE - SE al sur de esta cuenca fluvial (Dumont, 2007).

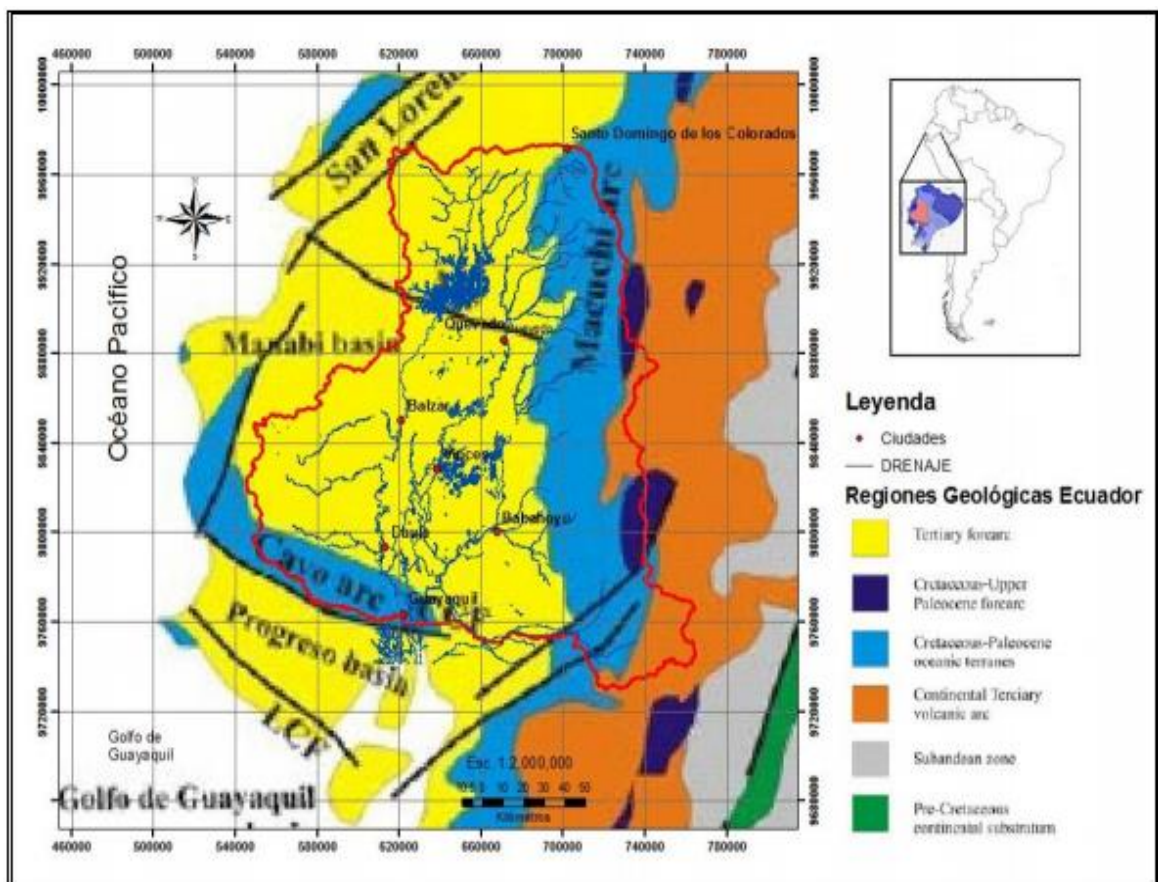


Figura 1.2 Mapa de las redes de drenaje y las estructuras geológicas (fallas) de la cuenca hidrográfica del río Guayas. Fuente: [Granja, 2010]

1.6.2 Geología Local

Las formaciones geológicas identificadas cercanas al cauce del río Bajaña (Buena Fe – Los Ríos) son las que se describen a continuación:

Formación Piñón (Cretáceo): Denominado así por el río Piñón, corresponde al basamento de la cuenca hidrográfica del Guayas recubierta por una sucesión de materiales sedimentarios correspondientes al Cretácico Superior y Terciario (Baldock, 1982). Está compuesta por rocas volcánicas extrusivas de tipo basalto o andesita basáltica, rocas porfídicas, brechas, pillow lavas, aglomerados basálticos, argilitas tobáceas y rocas verdes (Wolf, 1974).

Formación Baba (PI-PB): Esta formación aparece descrita en la carta geológica de Valencia y Los Vergeles elaborada por el IGM (1979), al noroeste de la provincia de Los Ríos donde se origina el río Bajaña; consiste en un depósito lahárítico de ceniza en forma de terrazas indiferenciadas con aglomerados volcánicos, conglomerados en matriz arenosa, toba y ceniza.

Son sedimentos que están recubiertos por ceniza de color marrón amarillenta que ocupan toda la cercanía de la zona del río Baba, aflora en toda la parte norte del cantón Buena Fe con un espesor que sobrepasa los 100 m; y está asociada a geoformas tales como: Superficies de cono de esparcimiento disectado y poco disectado, vertientes correntosas y abruptos conos de esparcimiento y gargantas (Proaño, 2013).

Formación Pichilingue (QP): Corresponde al techo de la cuenca del río Bajaña y está conformada por materiales sedimentarios superficiales, generando bancos de arcillas, limos y arenas muy poco consolidadas (SENPLADES, 2012). Es un complejo sedimentario de origen fluvial de conglomerados, arenas y terrazas que se acreciona en su extremo norte con la formación San Tadeo y hacia el Este con los conos de deyección que se presentan en el pie de monte provenientes de la erosión de la Cordillera de los Andes, los cuales han sido acarreados por aguas torrenciales, depósitos aluviales y fluviales (Baldock, 1983).

Son depósitos sedimentarios superficiales de aproximadamente 1000 m de espesor, conformados por arenas, limos y arcillas poco consolidadas, recubiertos por una capa de ceniza volcánica que integran la base de la mayor parte de los terrenos fértiles de la planicie litoral en la región costanera del Ecuador, que servirán para el cultivo de productos agrícolas (Proaño, 2013).

Terrazas Indiferenciadas (PI): Según la descripción vista en la leyenda de las hojas geológicas del IGM (1979) de Quevedo, Valencia, Los Vergeles y Patricia Pilar; están conformados por materiales sedimentarios como arcillas, limos, arenas, cantos rodados y cenizas volcánicas, las cuales son producto de la erosión de la cordillera Andina durante el cuaternario (Proaño, 2006). Se identifican dos tipos de terrazas; la primera (superior) está compuesta por arcillas, limos y arenas; y la segunda (inferior) fue cortada subsecuentemente por divagación del río y está recibiendo el aluvial reciente (Proaño, 2013).

Depósitos aluviales: Las hojas geológicas 48, 62 y 67 impresas por el IGM (1979); indican que estos depósitos de sedimentos se formaron en el holoceno (cuaternario) y están constituidos principalmente por materiales sedimentarios como gravas, arenas, limos y arcillas.

1.6.3 Geomorfología

El relieve circundante al río Bajaña es variable (cambia en el tiempo y espacio) debido a su gran llanura y depósitos aluviales que lo rodean; para su análisis se ha tomado en consideración el documento oficial del plan de desarrollo y ordenamiento territorial (2015 – 2019) del cantón San Jacinto de Buena Fe (Los Ríos - Ecuador) perteneciente al GAD municipal de la ciudad de Buena Fe. En base a este portafolio, se determinaron las siguientes unidades geomorfológicas:

Gran cono tabular de la llanura costera: Se evidencian diferentes geoformas tales como: Cono de esparcimiento disectado y poco disectado, vertientes correntosas, abruptos conos de esparcimiento y gargantas, que están caracterizadas por el tipo de roca de la Formación Baba.

Pie de montes: Son potentes depósitos fluviales marinos que se forman en la base o pies de las cordilleras e indican donde se origina y nace una cima o colina generalmente con un alto relieve, la llanura formada al pie de un macizo montañoso por los conos de aluviones, las vertientes y el asentamiento de una población humana (urbana y rural).

Conos de deyección y esparcimiento: Son depósitos aluviales conformados por rocas con tamaño de guijarros, materiales pedregosos y arenas ígneas revestidas secuencialmente por piroclastos y cenizas de los volcanes que se hallan al occidente del Ecuador. Por la morfología de su relieve, se evidencian planicies de disección levemente onduladas, ligadas a diminutas gargantas.

Llanura aluvial antigua de deposición: Constituida por depósitos sedimentarios de arenas muy poco cementadas, aglomerados, estratos de arcilla, limo y toba, cantos rodados de principio ígneo revestido en fragmento por productos volcánicos nuevos. Debido a la morfología de su relieve, se evidencian superficies colinadas disectadas y puntiagudas con gradientes absolutos; gargantas de ríos ligeramente encañonadas; planicies poco onduladas con vertientes de llanura aluvial antigua, que están caracterizadas por el tipo de roca de la Formación Pichilingue.

Medio Aluvial: Formada por depósitos aluviales característicos de la unidad genética deposicional o acumulativo y que están asociados a terrazas indiferenciadas altas, medias y bajas, escarpes de terraza y valles fluviales.

Valles Fluviales: Están compuestos por materiales sedimentarios de origen aluvial con textura cambiante, recubiertos por material piroclástico reciente de los volcanes. La morfología de su relieve van desde grandes terrazas colgantes, terrazas indiferenciadas, meandros abandonados, depósitos aluviales sinclinales (convexa) que constantemente se inundan en casi todo el año sobre la llanura aluvial ondulada, debido a las frecuentes crecidas que se producen en esta área.

Terrazas aluviales: Son plataformas o planicies sedimentarias en forma de mesas construidas en un valle fluvial por los propios sedimentos del río que se depositan a los lados del cauce y permiten determinar si las laderas han colapsado por acción del flujo de los canales que van avanzando, dependiendo de la cantidad de energía que aporte o lleve el caudal del río a lo largo de su curso o afluencia.

Llanuras aluviales: Son grandes depósitos de tierra con una orografía en forma de abanico aluvial o cono de deyección, que se pueden inundar cuando se produce una crecida de aguas provocadas por los desbordamientos de los ríos y precipitaciones (lluvias) intensas debido a la acción climática.

Los materiales sedimentarios del terciario y cuaternario comprenden los extensos depósitos no consolidados de la gran llanura aluvial costera, entre los que se encuentran gravas y arenas que se observan en los lechos de los valles fluviales, hasta la llanura aluvial al sur de la cuenca hidrográfica del río Guayas drenada por grandes ríos meándricos y parcialmente inundables.

Tabla 1.1 Unidades genéticas, geomorfológicas y denominaciones geológicas de los diferentes relieves de la zona. Fuente: [IEE, 2013]

Unidad Genética	Unidad Geomorfológica	Denominación Geológica
Tectónico Erosivo	Relieve montañoso	Formación Macuchi
	Relieve colinado muy alto	
	Relieve colinado alto	
	Relieve colinado medio	
Deposicional o Acumulativo	Superficie de cono de deyección	Depósitos coluvio-aluviales
	Vertiente de cono de deyección	
	Abrupto de cono de deyección	
	Terraza alta	Depósitos aluviales
	Terraza media	
	Terraza baja y cauce actual	

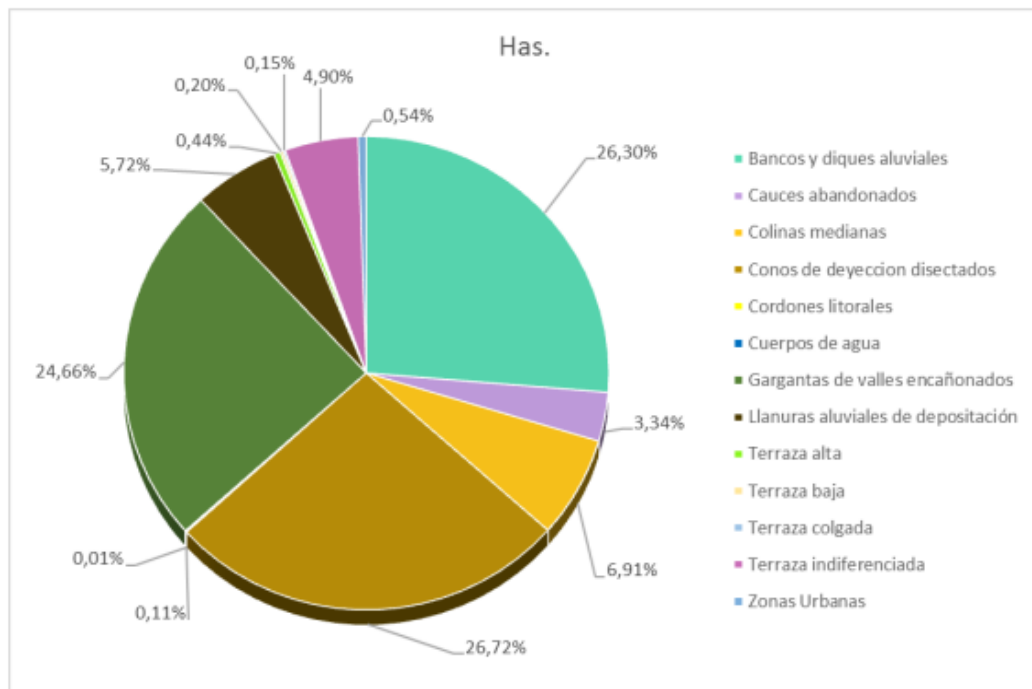


Figura 1.3 Gráfico de la distribución porcentual de los tipos de relieve y geoformas en el cantón Buena Fe. Fuente: [FE, 2019]

1.6.4 Hidrología

La cuenca hidrográfica del río Guayas es el principal conjunto de redes de drenaje de la costa ecuatoriana debido a sus diferentes tipos de ríos o afluentes que la conforman y porque abarca importantes provincias de la costa del Ecuador (Rossel et al., 1996). Posee 4 canales primarios que aportan con sus aguas en dirección N-S y E-W; llegando su afluencia a circular por el cantón Guayaquil para crear el conocido río Guayas, donde posteriormente sus flujos de agua desembocarán en el Océano Pacífico, terminando su drenaje en el mar.

La cuenca hidrográfica del río Guayas corresponde a una cuenca de escurrimiento permanente y torrencial durante la temporada lluviosa, que arrastra y acarrea gran cantidad de sedimentos que consisten generalmente en arcillas, limos y arenas; donde los materiales granulares en su mayoría son fragmentos de rocas ígneas acumuladas y depositadas en la gran llanura aluvial antigua (Proaño, 2013).

La cuenca hidrográfica del río Guayas se encuentra ubicada entre las provincias de Los Ríos, Guayas, Cotopaxi, Bolívar, Manabí, Cañar, Chimborazo y Santo Domingo, sobre el centro occidental del Ecuador. Limita geográficamente al Norte con la cuenca del río Esmeraldas; al Sur con las cuencas de los ríos Zapotal, Taura, Cañar y Santiago; al Este con las cuencas de los ríos Esmeraldas y Pastaza; y al Oeste con las cuencas del Jama, Chone, Portoviejo y Jipijapa (ver Figura 1.4). El río Bajaña se ubica en la parte norte de esta cuenca hidrográfica, específicamente sobre toda la superficie del cantón Buena Fe, perteneciente a la provincia de Los Ríos, desembocando sus aguas finalmente en el río Quevedo.

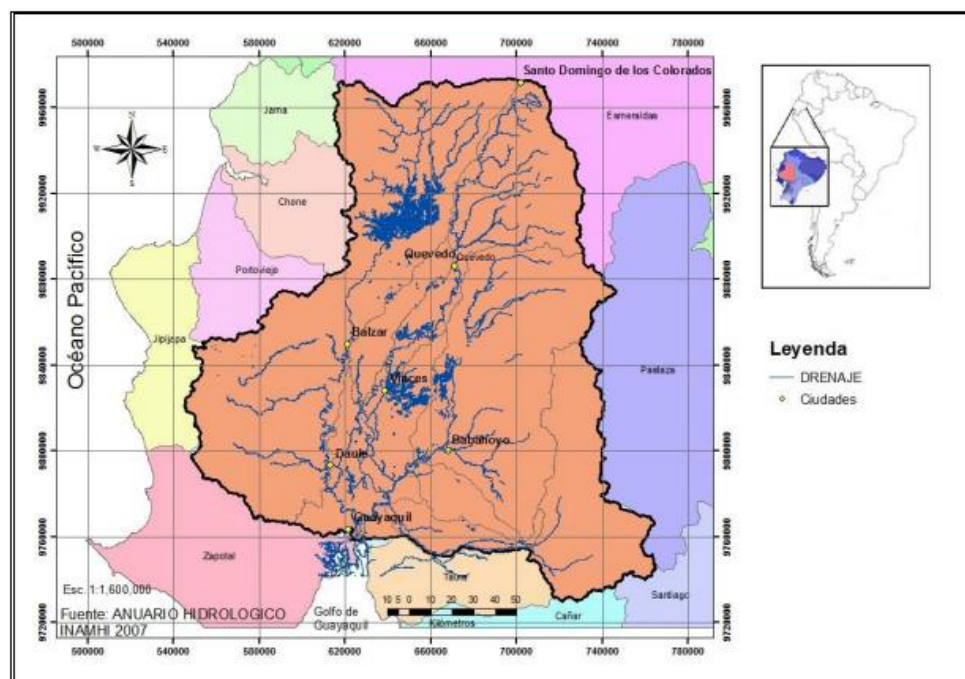


Figura 1.4 Ubicación de la cuenca hidrográfica del río Guayas y sus principales afluentes o redes de drenaje. Fuente: [INAMHI, 2007]

La cuenca hidrográfica del río Guayas pertenece a la vertiente occidental; y es el más importante sistema fluvial porque está conformada de siete subcuencas cuya red de drenaje nace en las estribaciones occidentales de la cordillera de los Andes y en la vertiente oriental de la Cordillera Costanera Chongón - Colonche que constituyen los ríos Daule (11389 km²), Babahoyo (6963 km²), y Vinces (4268 km²) donde se encuentra fluyendo el río Bajaña (ver Figura 1.5) (INOCAR, 2010).

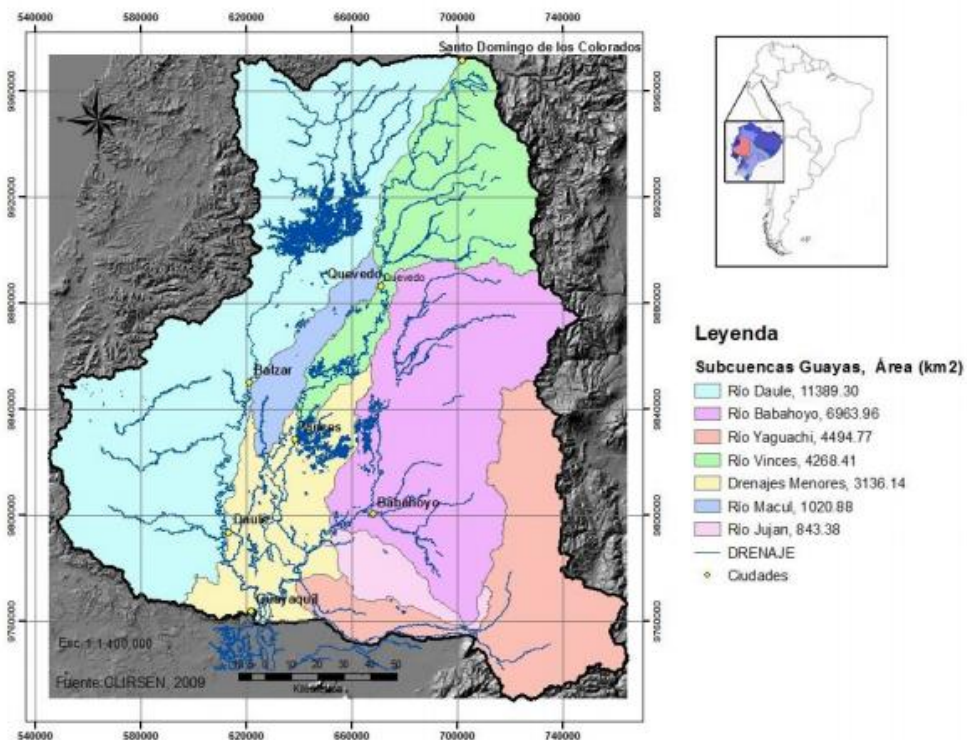


Figura 1.5 Mapa de las subcuencas hidrográficas del río Guayas con sus principales afluentes y área superficial en km² que posee cada una de estas. Fuente: [Clirsen et al., 2009]

1.6.5 Clima

Según Pierre Pourrut (2009), en la cuenca hidrográfica del río Guayas se evidencian 16 zonas climáticas, en la cual se considera las precipitaciones totales anuales y sus regímenes, que van desde menos de 500 mm (estación seca) a más de 3000 mm (estación lluviosa); y las temperaturas medias mensuales que varía de 4°C (alta montaña) a más de 22°C (mega térmico).

La región litoral o costa se caracteriza por tener una estacionalidad cambiante en el tiempo que produce un desbalance de las precipitaciones. De enero a mayo es la estación lluviosa o “invierno”, que provoca inundaciones, crecidas y deslaves o desbordamientos de los ríos; y de junio a diciembre es la estación seca o “verano” caracterizada por la disminución de lluvias (garúas) y por circulación atmosférica producto de los vientos alisios del SE. Las inundaciones también pueden ser causadas por el Fenómeno meteorológico natural de “El Niño” y “La Niña”, siendo resultado del movimiento de una corriente estacional

cálida que se traslada de arriba-abajo (N-S), a través de las playas ecuatorianas y choca con la corriente fría de Humboldt, procedente de las playas de Chile y Perú; debido a los fuertes cambios climáticos en el Pacífico Sur (Glantz, 1998).

En 1998, el fenómeno de “El niño” perturbó con gran fuerza a la costa ecuatoriana, causando deterioros a los servicios de limpieza ambiental de agua y alcantarillado producto de las intensas precipitaciones, avalanchas y crecidas de los ríos que se generaron en el área. Casi todas las comunidades situadas cerca de los ríos del Ecuador sufrieron pérdidas económicas y humanas, sin embargo, en aquellas donde se efectuaron medidas de mitigación y prevención, el daño fue mínimo; como, por ejemplo, en la ciudad de Babahoyo (Los Ríos), se aplicó un control de susceptibilidad ante estos eventos climáticos (MSP & OPM, 2016).

Después del evento sobrenatural que trajo consigo el fuerte invierno del Fenómeno de “El Niño” (1998), el depósito aluvial ubicado aguas abajo del río Bajiña, depositó material granular grueso y los sedimentos de tamaño fino y medio fueron transportados, acumulados, rellenados y depositados en las llanuras aluviales; formando terrazas indiferencias, bancos sedimentarios, abanicos fluviales, gargantas y conos disectados de deyección (Proaño, 2006).

El cantón Buena Fe (Los Ríos – Ecuador) se localiza dentro de una zona cuyos caracteres climáticos corresponden al clima cálido, tipo húmedo tropical, pertenece a la zona climática denominada tropical monzónica que entre otros factores se define por la existencia de dos estaciones claras y totalmente diferenciadas mencionadas anteriormente: La lluviosa, denominada invierno, y la seca o también llamada verano (FE, 2019).

Al Sur del río Bajiña, se visualiza una planicie o plataforma horizontal de aproximadamente 30 km durante todo el año solar, pero en consecuencia de la constante presencia de vapor de agua en suspensión (niebla), ésta decrece en altura cerca de las estribaciones de la cordillera occidental de los Andes, hasta alcanzar una cota máxima de 2500 metros sobre el nivel del mar (FE, 2019).

CAPÍTULO 2

2. MARCO CONCEPTUAL

En esta unidad del capítulo #2 se especifican las definiciones relevantes acerca de la geomorfología y teledetección espacial utilizadas para el desarrollo del presente proyecto integrador, que se basa en explicar la geomorfología fluvial y analizar los cambios morfológicos producidos a través del período de tiempo en el río Bajaña.

2.1 Geomorfología

Es una disciplina o rama de la geología que estudia las diferentes geoformas y estructuras de la Tierra, dando una explicación e interpretación de los diferentes procesos dinámicos que ocurren sobre la corteza o superficie terrestre, mediante la identificación de los distintos agentes de erosión y meteorización; y factores geológicos que comprenden la evolución del paisaje o relieve (Álvarez, 2013).

Según Gutiérrez (2014), una geoforma está constituida por tres partes:

- a.-) Constitución:** Remoción del material (propiedad física y química).
- b.-) Configuración:** Tamaño y forma del relieve (geometría del paisaje).
- c.-) Flujo de masa:** Desplazamiento o transporte de partículas (acumulación y depositación de materiales sedimentarios; como son las arenas, limos y arcillas).

2.1.1 El Ciclo Geográfico o de William Morris Davis:

Trata sobre la evolución de los desgastes y denudación (erosión+meteorización) del relieve (landscape) hasta llegar a su configuración actual (Charlton, 2007).

Dean & Schmidt (2013), indican que este ciclo se divide en tres etapas o fases:

- a.-) Joven:** Se observa valles en forma de “V”, el material ha sido erosionado, formación de planicie de inundación, lagos, ríos lineales y radiales.
- b.-) Madura:** Se observa zonas mucho más erosionadas, pendientes más pronunciadas, el terreno es más irregular, se forman montañas y se acumula el agua fácilmente creándose los denominados ríos meándricos.
- c.-) Antigua:** Se observan ríos mucho más extensos (principales y secundarios), el material ha sido erosionado casi todo hasta llegar a la línea base (planicie).

2.1.2 Sistema Geomorfológico

Según Wohl (2014), es un arreglo de geoformas (rocas, sedimentos, materia orgánica, valles, llanuras, conos, deltas, abanicos, montañas, estuarios, terrazas, etc.) de ambiente sedimentario. Está afectado por procesos exógenos (lluvias, incendios, vientos) y endógenos (tectónicos y volcánicos). Los procesos endógenos están relacionados con las fuerzas geológicas, mientras que los procesos exógenos están relacionados con las fuerzas climáticas (aporta, moviliza y quita el material sedimentario de los márgenes o bordes del río).

2.1.3 Geomorfología Fluvial

Es una subdisciplina geomórfica que se encarga de explicar los diferentes procesos fluviales (transporte, sedimentación, acumulación y depositación) del conjunto de las redes de drenaje de una cuenca hidrográfica provocados por accidentes geográficos (erosión y meteorización) sobre la corteza o superficie terrestre (Gutiérrez, 2014). Estudia la estructura, la forma y la geometría del cauce de los ríos, por medio de la interpretación de los procesos meteorológicos que provocan el cambio geomorfológico a través del tiempo de los parámetros morfométricos característicos de los diferentes tipos de ríos o canales con su respectiva orientación de flujo, según su dirección de drenaje (aguas arriba o aguas abajo) y a los diferentes procesos de sedimentación (Ollero, 2008).

2.1.4 Sistemas Fluviales

Es un tipo de sistema geomórfico, que no solo abarca a los canales fluviales, sino también al conjunto de redes de drenaje y zonas de alimentación de abanicos aluviales y deltas marinos. Además, se considera las escorrentías y los sedimentos de ladera de los canales de los ríos en una cuenca hidrográfica. El sistema fluvial no es constante, por la acción de los distintos factores erosivos y de meteorización; y también se manifiesta por los frecuentes cambios meteorológicos, lineamientos producto de estructuras geológicas como fallas y actividades humanas o antrópicas producidas en una zona de impacto natural o riesgo geológico (Álvarez, 2013).

2.1.5 Hidrosistema

Es un sistema en tres dimensiones (3D) en el que los componentes longitudinales (aguas arriba y aguas abajo), laterales (márgenes del canal, terrazas) y vertical superficial (subterráneo) transfieren energía, material y biota. Depende de los procesos hidrológicos, geomorfológicos y biológicos que actúan en un diagrama de bloques 3D con un amplio rango de tiempo. Además, llevan, transportan o acarrearán vegetación y sedimentos de una zona con alto relieve a otra zona con bajo relieve (ÖZCAN & AKAY, 2018).

2.1.6 Erosión Fluvial

Se lleva a cabo por los procesos fluviales de corrosión, corrosión y cavitación.

a.-) La corrosión: Implica procesos químicos que resulta de la meteorización del lecho y de las paredes del curso o cauce fluvial (Goudie, 2006).

La eversión es un tipo de corrosión en la que el flujo de agua suaviza el lecho, sin ayuda de partículas (fricción entre el agua y las rocas) (Goudie, 2006).

b.-) La corrosión o abrasión: Consiste en el desgaste mecánico por impacto entre las partículas transportadas y la erosión mecánica del cauce, que pueden originar marmitas (una geoforma fluvial que se origina por el desgaste mecánico de las rocas y el golpeo de partículas) (Goudie, 2006).

c.-) La cavitación: Solo se produce a grandes velocidades, tales como en la base de las cascadas, cataratas y conductos artificiales (Goudie, 2006).

2.1.7 Tipos de Canales Fluviales según su Geomorfología

Los tipos de canales fluviales se dividen en dos principalmente:

a.-) Inactivo lateralmente: Recto, estable y sinuoso (inestable).

b.-) Activo lateralmente: Meandriforme y trenzado (anastomosado).

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 o ramales (Álvarez, 2013).

Según la geometría en planta que adopta la corriente del canal, se pueden clasificar los ríos en tres tipos básicos: Rectilíneo, meándrico y anastomosado.

a.-) Rectilíneo: Estas corrientes se caracterizan por presentar una sinuosidad baja ($Sr < 1.05$) y multiplicidad 1, es decir, 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).

b.-) Meándrico: Este tipo de río tiene sinuosidad alta ($Sr > 1.5$) 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 (generalmente, en la parte cóncava de la curva) y sedimentario (en la orilla convexa). Estas diferencias se deben, a la distinta velocidad de las corrientes de agua en sus dos orillas. Los cauces con meandros se clasifican en: Curvas superficiales; y curvas en trinchera o encajadas (Goudie, 2006). Las primeras cambian su curso en el transcurso del tiempo, mientras que las segundas permanecen fijas ya que generalmente son excavadas en materiales resistentes. Los meandros, según su movimiento hacia aguas abajo, y si los cortes ocurren en una misma zona, pueden clasificarse también en estables y muy inestables (Álvarez, 2013).

c.-) Anastomosado: Estas corrientes, también 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. Una de las características de los ríos trenzados es que estos están sujetos a un proceso de sedimentación y poseen una sinuosidad (Sr) entre los valores de: $1.25 < Sr < 1.50$ (Álvarez, 2013).

2.2 Redes de Drenajes

La cuenca de drenaje es una entidad bien definida topográfica e hidrológicamente y se considera como una unidad geomorfológica fundamental. Corresponde a los medios o ramales por el cual el agua circula a través de los canales fluviales (Rudraiah, Govindaiah & Vittala, 2008).

Los tipos de redes de drenaje según su morfología son los siguientes: Dendrítico, rectangular, radial, centrípeta, enrejada, paralela, anular y desordenada (Se diferencian porque cambian su topografía y la forma del relieve) (Gutiérrez, 2014); tal como se evidencia en la Figura 2.1.

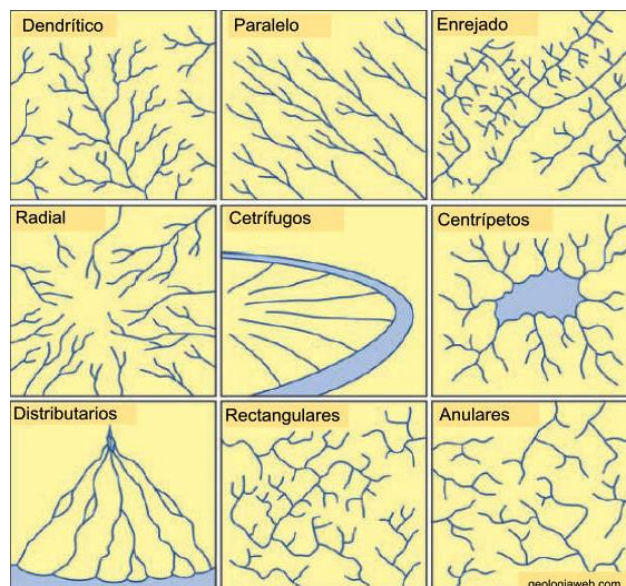


Figura 2.1 Tipos de redes de drenaje que conforman los ríos. Fuente: [Gutiérrez, 2014]

2.3 Ríos

Son masas de aguas que fluyen sobre un canal de erosión, meteorización y transporte de sedimentos; acarrean gran cantidad de materiales sedimentarios desde zonas con alto relieve como las cordilleras, hasta zonas con bajo relieve como los mares u océanos. En base a su forma pueden ser clasificados como rectilíneos ($Sr < 1.05$) por presentar un caudal recto de alta energía y gran capacidad erosiva; devanados o cortados ($1.05 < Sr < 1.25$); meándricos con morfología ondulatoria hacia toda dirección ($Sr < 1.50$); y anastomosado o trenzado ($1.25 < Sr < 1.50$) si presenta múltiples canales con gran capacidad de transferencia de material y sedimentación (Gutiérrez, 2014).

2.4 Parámetros geomorfológicos asociados a un río meándrico

1.-) Radio de circularidad (R_c)

Según Charlton (2007), el radio de circularidad (R_c) es un rastro geomórfico de la deflexión y alargamiento de las curvas que forman un río meándrico, ya sea en forma convexa o cóncava; el cual indica el recorrido que existe desde el punto central de la forma ondulatoria de uno de los meandros del afluente hasta llegar a uno de los extremos de la periferia que conforma el canal del río y se la calcula por la fórmula matemática de la distancia entre dos puntos. El espaciado de las curvas del meandro o la longitud de onda del meandro (l), se la calcula midiendo el trayecto que hay en línea recta desde un periodo de curva de onda hasta la otra, y así sucesivamente a lo largo de todo el río (ver Figura 2.2).

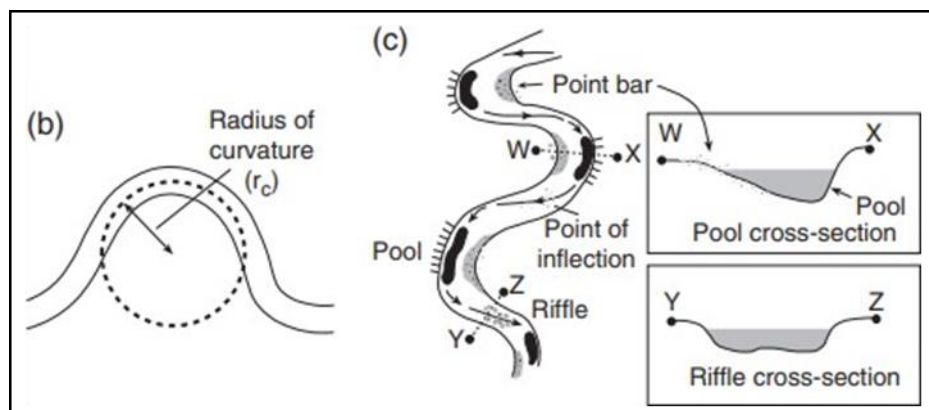


Figura 2.2 Estimación del radio de curvatura en un río meándrico. Fuente: [Charlton, 2007]

2.-) Índice de Sinuosidad (S_r)

Charlton (2007), indica que la sinuosidad (S_r) varía dependiendo del radio de circularidad un río meándrico (ver figura 2.3), ya que son directamente proporcionales y se dividen de acuerdo con sus intervalos, que son sinuosidad recta ($S_r < 1.05$), devanada ($1.05 < S_r < 1.25$), anastomosada ($1.25 < S_r < 1.50$) y meandrica ($S_r < 1.50$) (ver Tabla 2.1). Forma la razón entre el largo del canal (L) y la longitud de onda del meandro (l); como se evidencia a continuación:

$$S_r = \frac{L}{l} \quad \text{Ec. (2.0)}$$

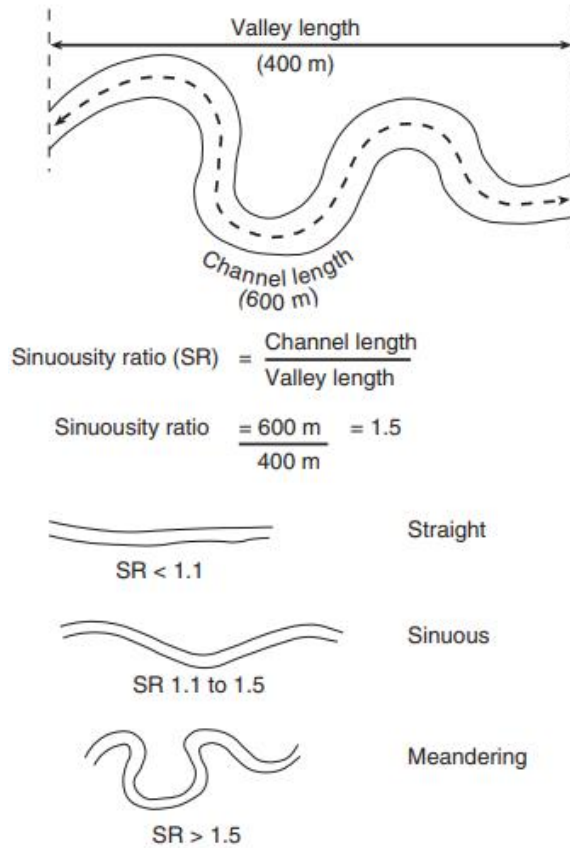


Figura 2.3 Cálculo y clasificación de la sinuosidad (S_r), según sus valores o datos correspondientes a la curva meándrica. Fuente: [Charlton, 2007]

Tiwari et al. (2016) propuso en base a los valores de los índices de sinuosidad (S_r) una división para los tipos de canales que forman el cauce de los ríos, y lo planteó tal como se evidencia en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Clasificación de los ríos en base a su Índice de Sinuosidad. [Tiwari et al., 2016]

Índice de Sinuosidad (S_r)	Clasificación
$S_r < 1.05$	Recto
$1.05 < S_r < 1.25$	Devanado
$1.25 < S_r < 1.50$	Anastomosado
$S_r > 1.50$	Meándrico

3.-) Índice de Estanqueidad (Es)

El índice de estanqueidad (E_s) de las ondas de un río meándrico se lo calcula mediante la división entre el radio de circularidad (R_c) y el ancho del canal sobre la curva (w); para comparar y diferenciar canales de diferentes tamaños, según su geometría. Esta razón es pequeña para curvas cerradas y aumenta para curvas abiertas que se doblan más gradualmente. Los estudios han confirmado que numerosas curvas tienden a una relación de estanqueidad de 2 a 3. Para curvas más angostas, la separación del flujo provoca fuertes pérdidas de energía (Bagnold, 1960). Se la representa por medio de la siguiente ecuación:

$$E_s = \frac{R_c}{w} \quad Ec. (2.1)$$

2.5 Cuenca Hidrográfica

La cuenca hidrográfica de drenaje es una entidad bien definida topográfica e hidrológicamente y se considera como una unidad geomorfológica fundamental debido a sus abruptos cambios de relieve y litología sobre el terreno; y que se han rellenado por material sedimentario erosionado y transportado de las cordilleras o partes altas de una colina (Rudraiah, Govindaiah & Vittala, 2008).

Una cuenca fluvial es el resultado de las interacciones de flujo de transferencia de energía, material y biota en un río. El flujo de agua en un canal está sometido a dos fuerzas principales que son la gravedad y las pendientes del canal; mientras que la fricción se opone al movimiento del agua en el cauce del río (Álvarez, 2013).

Ramakrishna (1997) define a una cuenca hidrográfica como una depresión natural rellena de sedimentos en que los ríos o valles generados por fuertes precipitaciones o escorrentías, forman un cauce o flujo principal de agua. Se la representa como una unidad morfológica esencial compuesta por un conjunto de sistemas fluviales influenciados por cursos de agua según el tamaño del relieve.

Según Gaspari et al. (2013), la cuenca hidrográfica se la define como una unidad morfológica fundamental, constituida por un área cementada donde los ríos desembocan en el mar, delimitado por la presencia de la línea divisoria de agua.

El sistema fluvial de la cuenca hidrográfica comprende tres etapas importantes (ver Figura 2.4); las cuales son: zona de producción, zona de transferencia y zona de sedimentación (Schumm, 1997).

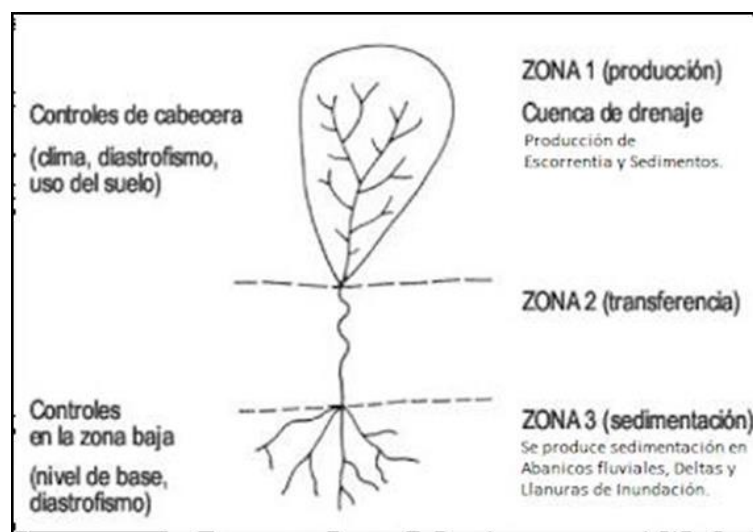


Figura 2.4 Gráfico de un sistema fluvial idealizado, en el que se identifica la zona de producción, transferencia y de sedimentación. Fuente: [Schumm, 1997]

2.6 Clasificación de las Cuencas Hidrográficas

Faustino & Jiménez (2000) mencionan que se identifican diferentes tipos de cuencas hidrográficas, entre las que se caracterizan las siguientes:

- **Arreicas:** Este tipo de cuenca hidrográfica no logra llegar a un valle fluvial, debido a que sus afluentes se volatilizan o infiltran por su gran escorrentía.
- **Criptoarreicas:** Los sistemas fluviales de este tipo de cuenca hidrográfica no tiene un orden de flujo y se desplazan a todos lados como ríos subterráneos, donde depositan sus aguas en los pozos y albardas.
- **Endorreicas:** Los afluentes de este tipo de cuenca fluvial convergen hacia un valle, laguna o lago, pero no llegan a los enormes océanos o mares.
- **Exorreicas:** Redes de drenaje llevan sus aguas hacia grandes ríos o mares.

Además, las cuencas hidrográficas pueden ser clasificadas en relación con su estatura, número de orden de flujo y relieve, tal como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 División de cuencas según su orden de flujo. Fuente: [Faustino & Jiménez, 2000]

Unidad	N. de Orden	Área (km²)
Microcuenca	1, 2, 3	10 - 500
Subcuenca	4, 5	500 - 2000
Cuenca	6, 7 o más	2000

2.7 Parámetros morfométricos asociados a una cuenca hidrográfica

Los parámetros geomorfológicos tienen como función principal analizar la estructura, composición y forma de la cuenca hidrográfica por medio de los procesos dinámicos, climáticos y geológicos que evolucionan los ríos a lo largo del tiempo (Charlton, 2007).

Estos factores se definen según sus parámetros morfométricos, mediante el cálculo de las mediciones geométricas de la cuenca, entre los que se detallan subsiguientemente:

Área (A)

El área de la cuenca hidrográfica simboliza la medida superficial de la cuenca en unidades internacionales como lo es el m² y se la obtiene por medio de la información provista en la tabla de atributos luego de digitalizar la cuenca en un software geológico.

Longitud (L)

Representa la medida longitudinal del cauce principal del río desde su nacimiento (aguas arriba) hasta su posterior desembocadura (aguas abajo), depende de su capacidad de escorrentía, infiltración y drenaje que genere a lo largo de su trayectoria.

Perímetro (P)

Representa la medida de toda la parte externa que limita la cuenca hidrográfica (casarón). Se la obtiene mediante la digitalización de la cuenca en el software geológico, visualizando los datos que ya están proporcionados en la tabla de atributos.

Orden del flujo (U)

Este parámetro representa el número de subdivisiones de los canales o ramales de una red de drenaje en la cuenca hidrográfica. Horton (1932) la definió en primer lugar, no obstante, al aumentar número de subdivisiones de los canales de la red de drenaje, se volvía muy tedioso al momento de interpretar los datos. Posteriormente, Strahler (1952) define al orden menor de una cuenca como primer orden en sus ramales; los de segundo orden están conformados por la unión de los ramales de primer orden; y así consecutivamente, hasta llegar al orden de flujo real que posee la cuenca hidrográfica.

Número de flujo (N_u)

Este parámetro está definido como la sumatoria entre el valor del primer orden de flujo (U) proporcionado y su consecuente en término de una sucesión geométrica inversa (Horton, 1945). También, es el principal factor hidrológico adimensional del área de la cuenca, ya que genera información importante acerca de la superficie de cada red de drenaje (Kumar et al., 2018). Esta variable se la calcula mediante la siguiente fórmula:

$$N_u = N_1 + N_2 + N_3 + \dots N_n \quad Ec. (2.2)$$

Longitud del flujo (L_u)

Strahler (1964) lo define como el máximo flujo de primer orden y disminuye en relación con el aumento del orden de afluencia de una red de drenaje. Los afluentes de menor trayecto indican superficies con mayor gradiente y textura fina, por lo contrario, los afluentes que recorren más distancia longitudinal indican superficies con menor pendiente y textura gruesa. Esta variable se lo calcula mediante la siguiente fórmula:

$$L_u = L_1 + L_2 + L_3 + \dots L_n \quad Ec. (2.3)$$

Longitud media del flujo (L_{sm})

Según Strahler (1964) lo expresa como un factor sin dimensión de la cuenca hidrográfica que mide el tamaño de las unidades propias de un sistema fluvial y sus áreas implicadas. Se la calcula mediante la división entre el largo general de afluencia de un orden proporcionado (L_u) y el valor total de flujo de igual orden (N_u), tal como se muestra en la siguiente fórmula:

$$L_{sm} = \frac{L_u}{N_u} \quad Ec. (2.4)$$

Relación de longitud de flujo (Rl)

Horton (1945) indica que este parámetro morfométrico se lo calcula mediante la relación entre la longitud de flujo (L_u) y el consecuente orden menor de los fragmentos de afluencia en las vertientes de la cuenca, por las distintas variaciones superficiales en el gradiente y el relieve, producidos por los diferentes factores de denudación de la corteza terrestre, mostrando la etapa joven y madura del progreso geomórfico en los canales aluviales de la cuenca hidrográfica. Se la calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Rl = \frac{L_u}{L_u - 1} \quad Ec. (2.5)$$

Relación de bifurcación (Rb)

Es una variable adimensional que expresa los canales o ramales íntegros de diversos órdenes que prevalecen al pasar tiempo en una cuenca fluvial. Se la calcula por medio de la división entre el valor de flujo de un orden proporcionado (N_u) con el subsiguiente orden mayor en una red de drenaje de una cuenca fluvial (Rai et al., 2020). Se la representa por medio de la siguiente fórmula:

$$Rb = \frac{N_u}{N_u + 1} \quad Ec. (2.6)$$

Relación media de bifurcación (Rbm)

Strahler (1953) definió a este parámetro morfométrico como la multiplicación entre la relación de bifurcación (Rb) y la sumatoria de las relaciones de bifurcación de afluencia de cualquier orden con el número de flujos implicados en la misma, se lo expresa mediante la siguiente fórmula:

$$Rbm = \bar{X} (\sum Rb) \quad Ec. (2.7)$$

Densidad de drenaje (Dd)

Este parámetro morfométrico indica la relación entre la masa y el volumen de los depósitos sedimentarios que contiene el relieve de la superficie terrestre, generando las dimensiones de cada sección de drenaje que intervienen en los procesos de evolución del paisaje y el potencial de escorrentía. Se lo expresa por medio de la razón entre la longitud del flujo de un orden dado (L_u) y el área total de la cuenca fluvial (Senciales González, 1998); tal como se muestra en la siguiente fórmula:

$$D_d = \frac{L_u}{A_T} \quad \text{Ec. (2.8)}$$

Frecuencia de flujo (F_s)

Este parámetro morfométrico indica las distintas fases de evolución que ha tenido el relieve a lo largo del tiempo, por los diferentes factores de denudación de la corteza terrestre; donde el surgimiento de los canales en una red de drenaje se debe a la evolución de paisaje producto de la acción de la naturaleza, estructuras rocosas, vegetación, lluvias y permeabilidad o escorrentía de la tierra. Se lo calcula mediante la división entre los fragmentos de ordenes de flujo y el área total de la cuenca fluvial (Horton, 1945); y se la representa mediante la siguiente fórmula:

$$F_s = \frac{N_u}{A_T} \quad \text{Ec. (2.9)}$$

Textura de drenaje (T)

La textura de drenaje (T) es la variable más importante con respecto a la cuenca fluvial, ya que esta depende específicamente de la unidad litológica estratigráfica, escorrentía, permeabilidad y la topografía de la corteza terrestre (López Bermúdez & Romero Díaz, 1987). Smith (1950) definió una clasificación para este parámetro por medio de los siguientes rangos: Muy gruesa (< 2), gruesa (2-4), intermedia (4-10), fina (10-15) y muy fina (> 15). Se la representa mediante el producto de la frecuencia de flujo (F_s) y la densidad de drenaje (D_d), como se evidencia en la siguiente fórmula:

$$T = D_d * F_s \quad \text{Ec. (2.10)}$$

Relación de alargamiento (R_e)

Este parámetro morfométrico expresa las medidas de la forma y geometría de una cuenca hidrográfica, por medio de los distintos procesos geológicos y meteorológicos que se producen en la superficie terrestre y que denudan el relieve; este factor se divide en rangos que varían desde (0.6-1.0) para casi todas las cuencas fluviales, de (0.6-0.8) para áreas con fuerte gradiente y de (0.8-1.0) para pendientes muy bajas y curvilíneas. Se la calcula mediante la relación entre dos veces el radio de una circunferencia de igual superficie que la cuenca y la medida longitudinal máxima de la misma (Schumm, 1956); como se evidencia en la siguiente fórmula:

$$R_e = \frac{D}{L} = 1.28 * \sqrt{\frac{A}{L}} \quad Ec. (2.11)$$

Relación de circularidad (Rc)

Miller (1953) calculó a este factor como la razón entre la superficie de la cuenca hidrográfica y el área de una circunferencia de igual estatura o relieve de esta, alterada principalmente por las propiedades litológicas de la subcuenca fluvial, donde la variación del gradiente o pendiente muestra una etapa dendrítica en su red de drenaje. También, los diferentes valores de este parámetro morfométrico mostrarán la fase en la que se encuentra la cuenca fluvial según su evolución o características de drenaje; las cuales son: Joven, madura y senil (vieja); según los valores de sus índices rotatorios (bajo, medio y alto). Se la representa mediante la siguiente fórmula:

$$R_c = \frac{4\pi * A}{p^2} \quad Ec. (2.12)$$

Factor de forma (Ff)

Horton (1932) indica que este parámetro morfométrico es directamente proporcional a las cuencas fluviales con lavabos abiertos y redondos; e inversamente proporcional a las cuencas fluviales con lavabos extensos y estrechos. Se lo calcula 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:

$$F_f = \frac{A}{L^2} \quad Ec. (2.13)$$

Longitud de flujo terrestre (Lg)

Este parámetro morfométrico representa la medida longitudinal máxima en la que ha circulado el afluente, calculada desde la vegetación o tierra hasta antes de que fluya por los canales de drenaje del río; y se la expresa como el alcance de flujo medido desde la línea límite hasta la vertiente en una cuenca fluvial de primer orden, que pertenece generalmente a la mitad de la inversa de la densidad de drenaje (Dd) (Horton, 1945); como se evidencia en la siguiente fórmula:

$$L_g = \frac{1}{2 * D_d} \quad Ec. (2.14)$$

Relieve (R)

Este parámetro morfométrico es la variable física más importante con lo que respecta a la geomorfología fluvial de una cuenca hidrográfica, debido a que esta define la forma, tamaño y geometría del terreno por donde fluye el canal de un río que pertenece a una sistema fluvial; con el fin de analizar, registrar e interpretar los cambios morfológicos que ha tenido el relieve dentro de una zona de estudio a lo largo del tiempo, producto de los distintos procesos erosivos y meteóricos que generan la denudación del paisaje, provocando las depresiones o valles fluviales por donde circulan los diferentes afluentes de una red de drenaje, según el ciclo geográfico o de William Morris Davis. Expresa la diferencia de elevación entre el punto más alto (techo) y más bajo (base) que conforman el valle de una cuenca fluvial (Magesh et al., 2013); como se evidencia en la siguiente fórmula:

$$R = H - h \quad Ec. (2.15)$$

Relación de relieve (R_r)

Este parámetro morfométrico indica el valor de la pendiente de un valle fluvial de una cuenca hidrográfica y expresa la cantidad de intensidad de denudación (erosión + meteorización) que se manejan en los bordes de la cuenca fluvial. Se la mide mediante la división que hay entre el relieve general y la longitud horizontal máxima a través de la superficie más extensa de una cuenca hidrográfica análoga al eje de primer orden de un red de drenaje (Schumm, 1956); como se muestra en la siguiente fórmula:

$$R_r = \frac{R}{L} \quad Ec. (2.16)$$

2.8 Teledetección Espacial

Según Pérez & Muñoz (2006), la teledetección es una técnica o método de extracción de información geológica de la corteza terrestre por medio de imágenes satelitales, que capturan los datos a través de sensores remotos instalados en plataformas espaciales, que interactúan con el terreno generando una data interpretable de la superficie de la Tierra que posteriormente serán procesadas mediante un software geológico, con el fin de adquirir información (data) de los cambios morfológicos que ha tenido el relieve del terreno a lo largo del tiempo.

En 1972 se comenzó con estas técnicas de teledetección o adquisición de datos, con ayuda del primer satélite estadounidense lanzado al espacio el mismo año, pero que en esa época era muy poco utilizado este método, ya que trabajar con imágenes satelitales requería de un gran costo e inversión económica (IGN, 2015).

En la actualidad, existen programas utilitarios de acceso libre como son la USGS y Copernicus Open Access Hub que permiten descargar imágenes satelitales (Landsat y Sentinel) de forma gratuita (sin costo), las cuales contienen una gran disponibilidad y variedad de información del terreno en diferentes tiempos y con buena resolución, resultando una gran ventaja al aplicarlas en distintas áreas, tales como son: Extracción de información, detección de cambios morfológicos del relieve del terreno, agricultura, vulcanología, hidrología y monitorización de desastres naturales (IGM, 2015).

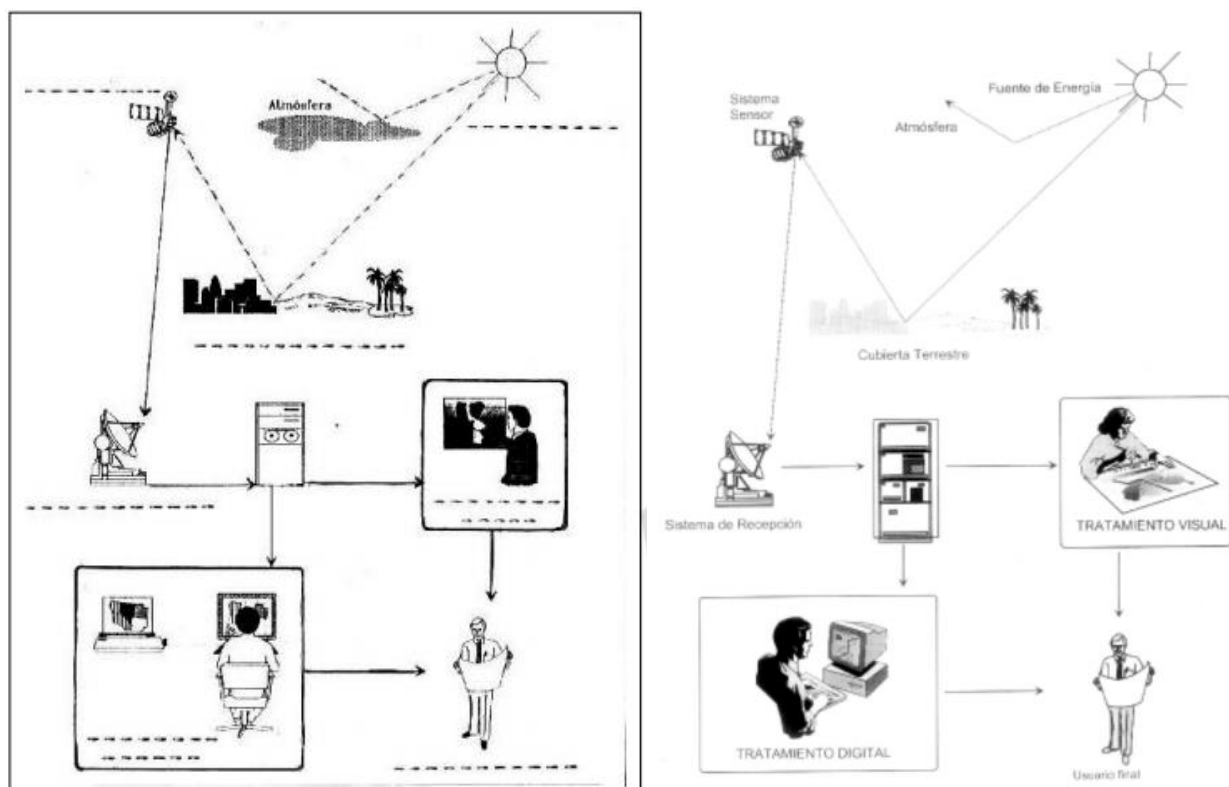


Figura 2.5 Componentes de un sistema de teledetección. Fuente: [Chuvieco, 1990]

2.8.1 Tipos de resoluciones de las imágenes satelitales

Los tipos de resolución que se evidencian en las imágenes satelitales se clasifican en:

- **Resolución Espacial:** Indica el tamaño de cada píxel que alcanza la imagen.
- **Resolución Radiométrica:** Representa el número de intervalos de intensidad que puede captarse.
- **Resolución Espectral:** Representa el valor del espesor o ancho de las regiones del espectro de la información captada por el sensor remoto sobre la imagen.
- **Resolución Temporal:** Indica el lapso o período de tiempo en que el satélite vuelve a pasar sobre la vertical de un mismo lugar, por ejemplo, el satélite Landsat 7 puede ver la misma área de la superficie terrestre cada 16 días.

2.8.2 Imágenes Satelitales Sentinel

Las características de los diferentes tipos de satélites Sentinel que orbitan actualmente alrededor del planeta Tierra y que permiten la obtención de datos por medio de las imágenes satelitales del programa de acceso libre Copernicus Open Access Hub, son:

- Sentinel 1: Imágenes radar terrestres y oceánicas.
- Sentinel 2: Imágenes ópticas terrestres, están disponibles como productos nivel 1C (corregidos radiométrica y geoméricamente) y nivel 2A (corregidos atmosféricamente).
- Sentinel 3: Servicios globales de vigilancia terrestre y oceánica.
- Sentinel 4: Datos para la vigilancia de la composición atmosférica.
- Sentinel 5: Datos para la vigilancia de la composición atmosférica.
- Sentinel 6: Datos altimétricos de alta precisión.

De los satélites mencionados anteriormente se va a hacer énfasis en Sentinel 2, ya que en éste se va a extraer la información (data) que se requiere para la elaboración del presente proyecto o estudio.

Sentinel 2: Este satélite proporciona información con radiometría de 12 bits, un período de tiempo de 10 días en que el satélite vuelve a pasar por el mismo punto, 13 bandas de resolución espacial y resoluciones espectrales de 10 m para las 12 primeras bandas multiespectrales (USGS, 2015).

Tabla 2.3 Características espaciales que poseen cada una de las bandas de las imágenes satelitales obtenidas de Sentinel 2. Fuente: [Sentinel-2 Resolución Espacial, 2019]

N. Banda	Resolución	Longitud de Onda	Descripción
Banda 1	60 m	443 nm	Ultra azul (Costa y Aerosol)
Banda 2	10 m	490 nm	Azul
Banda 3	10 m	560 nm	Verde
Banda 4	10 m	665 nm	Rojo
Banda 5	20 m	705 nm	Visible e Infrarrojo cercano (VNIR 1)
Banda 6	20 m	740 nm	Visible e Infrarrojo cercano (VNIR 2)
Banda 7	20 m	783 nm	Visible e Infrarrojo cercano (VNIR 3)
Banda 8	10 m	842 nm	Visible e Infrarrojo cercano (VNIR 4)
Banda 8a	20 m	865 nm	Visible e Infrarrojo cercano (VNIR 5)
Banda 9	60 m	940 nm	Onda Corta Infrarroja (SWIR 1)
Banda 10	60 m	1375 nm	Onda Corta Infrarroja (SWIR 2)
Banda 11	20 m	1610 nm	Onda Corta Infrarroja (SWIR 3)
Banda 12	20 m	2190 nm	Onda Corta Infrarroja (SWIR 4)

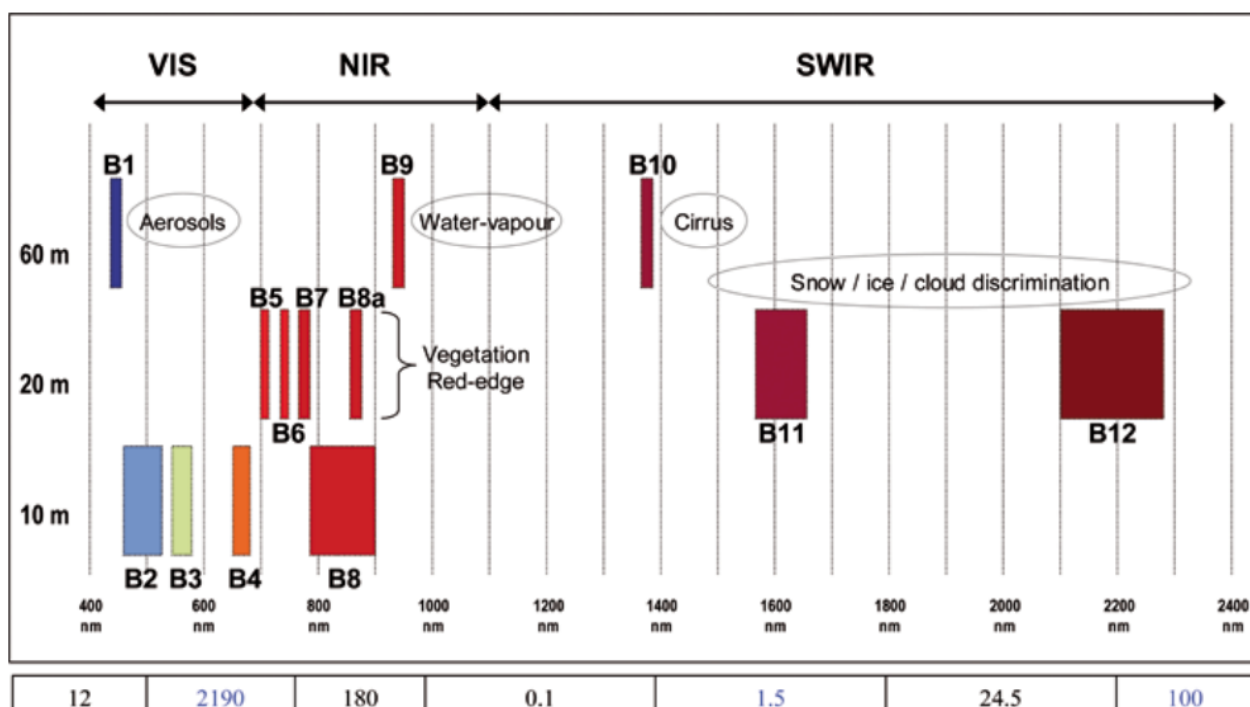


Figura 2.6 Diferentes composiciones de bandas que se pueden aplicar a las imágenes satelitales obtenidas de Sentinel 2. Fuente: [USGS, 2015]

2.8.3 Imágenes Satelitales Landsat

Landsat 5: USGS (2013) asevera que este tipo de satélite proporciona datos con radiometría de 16 bits, un período de tiempo de 16 días, 8 bandas de realce espectral y realce espacial de 30 m para las multiespectrales y 15 m para la pancromática, compuesta por 7 bandas en total.

Landsat 7: USGS (2009) indica que la información proporcionada por este satélite tiene una radiometría de 8 bits, un período de tiempo de 16 días en que el satélite pasa por el mismo punto, 8 bandas de resolución espectral y una resolución espacial de 30 metros perteneciente a la banda pancromática, compuesta por 9 bandas en total.

Landsat 8: USGS (2015) afirma que el satélite capta información con una resolución radiométrica dinámica en un rango de 12 bits, mejorando la relación general entre señal y ruido. El rendimiento corregido de señal a ruido permite una mejor caracterización del estado y la condición de la corteza terrestre. Además, éste posee 11 bandas y una resolución temporal de 16 días con un ciclo de repetición en tiempo de cruce ecuatorial.

Tabla 2.4 Características espaciales, espectrales y ancho de cada una de las bandas de las imágenes satelitales de Landsat 5 con sus valores de reflectancia. Fuente: [USGS, 2017]

N. Bandas	Intervalos Espectrales del Landsat 5	Valores de Reflectancia
Banda 1	Azul (0.45 – 0.52 mm)	0.073694
Banda 2	Verde (0.52 – 0.60 mm)	0.065659
Banda 3	Rojo (0.63 – 0.69 mm)	0.057434
Banda 4	Infrarrojo cercano (0.16 – 0.90 mm)	0.143182
Banda 5	Infrarrojo Medio (1.55 – 1.75 mm)	0.167348
Banda 7	Infrarrojo Medio (2.08 – 2.35 mm)	0.135747

Tabla 2.5 Diferencias que poseen las características espaciales y ancho de cada una de las bandas de las imágenes satelitales de Landsat 7 y Landsat 8. Fuente: [USGS, 2017]

Landsat 7 – ETM + Bandas (um)		Landsat 8 – OLI and TIRS Bandas (um)	
		Banda 1	30 m Aerosol (0.435 – 0.451)
Banda 1	30 m Azul (0.441 – 0.514)	Banda 2	30 m Azul (0.452 – 0.512)
Banda 2	30 m Verde (0.519 – 0.601)	Banda 3	30 m Verde (0.435 – 0.590)
Banda 3	30 m Rojo (0.631 – 0.692)	Banda 4	30 m Rojo (0.636 – 0.673)
Banda 4	30 m NIR (0.772 – 0.898)	Banda 5	30 m NIR (0.851 – 0.879)
Banda 5	30 m SWIR 1 (1.547 – 1.749)	Banda 6	30 m SWIR 1 (1.566 – 1.651)
Banda 6	60 m TIR (10.31 – 12.36)	Banda 10	100 m TIR (10.60 – 11.19)
Banda 7	30 m SWIR 2 (2.064 – 2.345)	Banda 7	30 m SWIR 2 (2.107 – 2.294)
Banda 8	15 m Pan (0.515 – 0.896)	Banda 8	15 m Pan (0.503 – 0.676)

Tabla 2.6 Diferentes composiciones de bandas que se pueden aplicar a las imágenes satelitales obtenidas de Landsat 7 y Landsat 8. Fuente: [USGS, 2017]

Landsat 7		Landsat 8	
Propiedades	Bandas	Propiedades	Bandas
Color natural	3-2-1	Color natural	4-3-2
Color infrarrojo	4-3-2	Color infrarrojo	5-4-3
Falso color	4-5-3	Falso color	7-6-4
Agricultura	5-4-1	Agricultura	6-5-2
Penetración atm.	7-3-1	Penetración atm.	7-6-5
Estado vegetación	7-4-2	Estado vegetación	5-6-2
Tierra / agua	7-4-1	Tierra / agua	5-6-4
Análisis Vegetación	7-4-2	Análisis Vegetación	6-5-4

Una imagen de satélite está sometida a una serie de interferencias que hacen que la información (data) que se desea obtener aparezca perturbada por una serie de errores, debido a fallos en los sensores que generan pixeles incorrectos (corrección radiométrica); alteraciones en el movimiento del satélite y el mecanismo de captación en los sensores, generan distorsiones en la imagen global (corrección geométrica); e interferencia de la atmósfera, alteran de forma sistemática los valores de los pixeles

(corrección atmosférica). Las anomalías más comunes que pueden tener las imágenes satelitales se las puede mejorar su resolución utilizando las siguientes correcciones:

Corrección Geométrica: Alteraciones en el movimiento del satélite y el mecanismo de captación de los sensores, generan distorsiones en la imagen global.

Corrección Radiométrica: Fallos en los sensores, generan pixeles incorrectos.

Corrección Atmosférica: Interferencia de la atmósfera, alteran de forma sistemática los valores de los pixeles.

Para corregir estos errores o anomalías que se presentan en las imágenes satelitales se puede aplicar algunos de los siguientes métodos en el software geológico (ArcGIS):

Fusiones: Se realizan fusiones entre las imágenes pancromáticas y multiespectrales que captura un mismo satélite para obtener una sola imagen con la mejor resolución espacial de la imagen pancromática y el mayor número de bandas de la imagen multiespectral.

Combinaciones de bandas y realces: Para mejorar la visualización e interpretación de las imágenes se generan distintas combinaciones de bandas que permiten ver las imágenes de distintos colores, y se realizan para mejorar el brillo y el contraste.

Mosaicos: Los mosaicos se generan uniendo todas las imágenes de la península y las islas Baleares y Canarias. Previamente hay que seleccionar una combinación de bandas determinada y realizar un equilibrado y un realce a todas las imágenes para igualar su aspecto de forma que el mosaico quede visualmente homogéneo.

2.8.4 Aplicaciones de la teledetección

La teledetección espacial actualmente es muy utilizada por los geólogos para adquirir información valiosa de los cambios que se han producido en la Tierra a través del tiempo; y es aplicada a una gran cantidad de ramas que derivan de la geología, ya que se basan en la mitigación y prevención de desastres naturales mediante la obtención de imágenes satelitales de distintos períodos de tiempo y la cartografía que representa:

- Análisis de procesos de denudación en playas y en depósitos sedimentarios.
- Repertorios de recursos para estudios de impacto ambiental y meteorológico.
- Caracterización de cuerpos o canales de aguas superficiales.
- Inspección de desplazamiento de los icebergs en los polos.
- Estudio multitemporal del movimiento de nubes.
- Comprobación de contenidos de salinidad en mares u océanos.
- Pronosticación de eficiencia de los cultivos sobre los diferentes tipos de suelo.
- Análisis temporal de los cambios forestales y de relieve que ha tenido el paisaje.

2.8.5 Identificación de masa de agua

Los diferentes métodos que se utilizan generalmente para realizar el procesamiento de los datos obtenidos en una imagen satelital; con el fin de extraer, diferenciar, delimitar, comparar, clasificar, depurar y realzar los cuerpos de agua y los de vegetación o tierra (no agua), se detallan o especifican en la Figura 2.7.

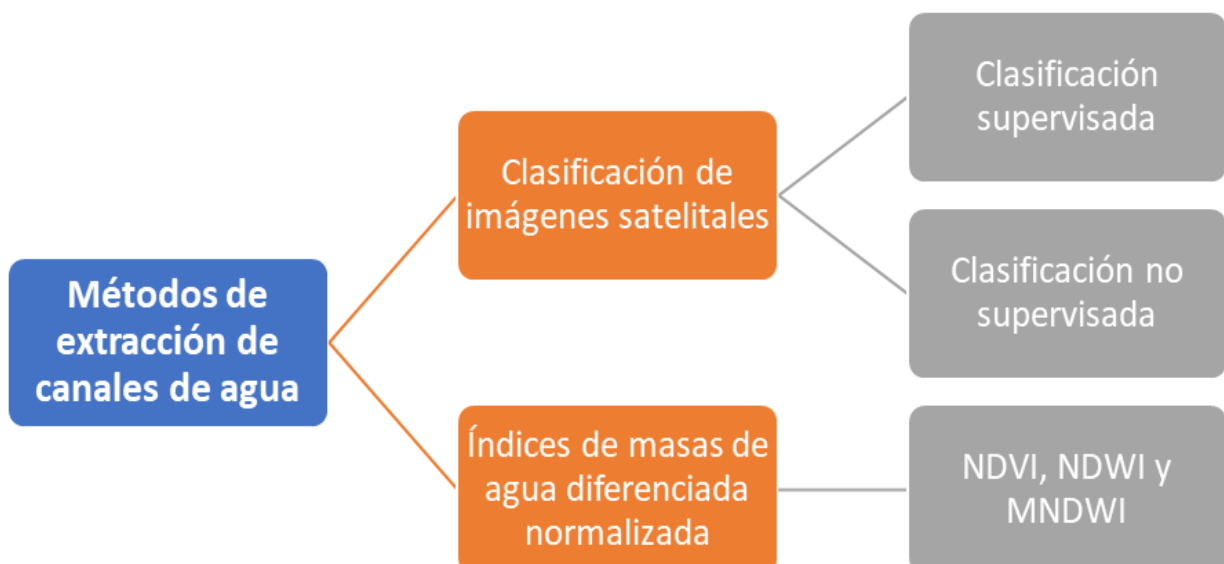


Figura 2.7 Clasificación de las técnicas para la extracción de cuerpos de agua sobre las imágenes satelitales espaciales. Fuente: [Autor]

2.8.5.1 Extracción de cuerpos o canales de agua mediante clasificaciones

Clasificación no supervisada

Representa los datos espectrales agrupados según las propiedades físicas de las imágenes satelitales con relación a la semejanza que estas posean a diferentes rangos espaciales, no se necesita hacer correcciones manuales por parte del investigador, ya que dan como resultado imágenes con muy buena resolución y sin pérdida de información producto del procesamiento o aplicación de este método (Foody, 2002).

Clasificación supervisada

Representa zonas espectrales análogas a las características o propiedades físicas observadas en la imagen satelital, pero con una delimitación del área antes de procesar la información registrada. Las zonas de interés seleccionadas deben ser distinguidas, de tal manera que el algoritmo designado, extrapole los rasgos espectrales seleccionados y se las compare con distintos lugares dentro de la imagen, logrando así un buen resultado final (Castillejo-González et al., 2009).

2.8.5.2 Extracción de cuerpos de agua mediante índices de bandas

Los sensores remotos se han transformado en una fuente importante de información, al analizar y evaluar datos concernientes a los distintos cambios de los recursos naturales del planeta Tierra. En los canales de agua, estos cambios son notables esencialmente mediante el estudio de la variación espacial, resolución temporal y resolución espectral.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Es el índice de vegetación más famoso del planeta, ya que este es muy importante en la evaluación, estudio y análisis de los cambios y transformaciones a través del tiempo que se dan en la cobertura vegetal. Este índice es sensitivo y trabaja generalmente con una la intensa absorción de la banda roja, también se satura sobre área boscosas debido a la fotosíntesis de las plantas o árboles (Huete et al., 1995). Zhan et al. (2002) indica que, si se le puede aplicar la extracción de masas de agua a través de una segmentación por trazo, debido a que estos toman valores cercanos a cero, diferenciándolos del resto de datos. Es calculado mediante la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad Ec. (2.17)$$

NDVI: Índice diferencial de Vegetación normalizado

NIR: Banda del infrarrojo cercano

Red: Banda del Rojo

Normalized Difference Water Index (NDWI)

McFeeters (1996) la representa como una técnica desarrollada para delimitar los cuerpos de agua y no agua, también mejora la resolución espacial en las imágenes satelitales adquiridas a través de sensores remotos. Este índice de agua diferenciada normalizada usa la radiación reflejada por la banda del infrarrojo cercano (NIR) y la luz verde visible para optimizar su presencia, mientras elimina propiedades físicas de la vegetación y el terreno. El índice es calculado a través de la siguiente fórmula:

$$NDWI = \frac{(GREEN - NIR)}{(GREEN + NIR)} \quad Ec. (2.18)$$

NDWI: Índice diferencial de Agua normalizado

NIR: Banda del infrarrojo cercano

GREEN: Banda de la luz verde

Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)

Xu (2006) la define como una mejora en la resolución de la imagen satelital luego de la aplicación del NDWI, sustituyendo la banda del infrarrojo cercano (NIR) por la banda media del infrarrojo (MIR). Como resultado final se obtiene un mejor realce espacial y espectral para los canales de agua, mientras remueve el ruido de las construcciones, vegetación y terreno. Este índice de agua diferenciado normalizado modificado se usa generalmente en regiones acuosas con terrenos poblados debido a las ventajas que posee en áreas urbanas. Es calculado mediante la siguiente fórmula:

$$MNDWI = \frac{(GREEN - MIR)}{(GREEN + MIR)} \quad Ec. (2.19)$$

MNDWI: Índice Diferencial de Agua Normalizado Modificado

MIR: Banda del infrarrojo medio

GREEN: Banda de la luz verde

CAPÍTULO 3

3. DESARROLLO METODOLÓGICO

El presente proyecto tiene como finalidad realizar un análisis multitemporal de las variaciones fluviales que ha tenido el río Bajiña (Buena Fe – Los Ríos - Ecuador) en los últimos 35 años (1985 - 2019), mediante el estudio de la teledetección que se basa en la adquisición de información (data) geológica por medio de la evaluación de imágenes satelitales (Landsat y Sentinel), las cuales se las obtuvo de los programas o plataformas de acceso libre (gratis) tales como son la Earth Explorer USGS y Copernicus Open Access Hubb respectivamente.

Los intervalos o períodos de tiempo en que se realizó el análisis y la evaluación de las imágenes de satélite ya descargadas (USGS y Copernicus Open Access Hubb) fueron los siguientes: 1985 (Landsat 5), 1990 (Landsat 5), 2000 (Landsat 7), 2001 (Landsat 7), 2016 (Landsat 8) y 2019 (Sentinel 2). Estos años son propuestos para evidenciar e identificar los cambios geomorfológicos en el cauce del río Bajiña a través del tiempo, además, se calcularon parámetros morfométricos tanto para el canal del río Bajiña como para la cuenca hidrográfica del río Guayas, específicamente sobre la subcuenca del río Vines en que se encuentra localizada la zona de estudio.

El análisis multitemporal se enfoca en la extracción de masas de agua mediante la aplicación de varios índices de agua diferencial normalizado (NDWI y MNDWI) con ayuda de softwares geológicos que permiten procesar la información (data), con el objetivo de caracterizar y obtener mejores resultados en cuanto a la delimitación superficial de la afluencia del río Bajiña en diferentes períodos de tiempo.

El análisis geomorfológico consiste en calcular los distintos parámetros geométricos e hidrométricos ligados tanto a su cuenca de drenaje como al río, con el fin de conocer el comportamiento del flujo del río y predecir los cambios en su caudal que tendrá este a futuro; y así poder tomar las respectivas medidas de mitigación y prevención a posibles deslaves, crecidas o desbordamientos en los ríos que ponen en riesgo a la población.

3.1 Adquisición de datos

La información (data) que se obtendrá en el presente estudio debe ser de muy buena calidad y resolución, ya que en base a esto se determinará el alcance del proyecto. Es de suma importancia que las imágenes satelitales tengan una gran accesibilidad, variedad y disponibilidad, para no tener problemas o inconvenientes sujetos a la restricciones y limitantes que poseen por lo general las páginas de las plataformas de acceso libre.

3.1.1 Imágenes Satelitales

En el presente proyecto se utilizarán dos clases de imágenes satelitales de insumo libre Landsat (USGS) y Sentinel (Copernicus Open Access Hub). Los años que se van a evaluar y analizar son los siguientes: 1985 (Landsat 5), 1990 (Landsat 5), 2000 (Landsat 7), 2001 (Landsat 7), 2016 (Landsat 8) y 2019 (Sentinel 2); tal y como se muestra en la Tabla 3.1.

Imágenes Landsat

Estas imágenes fueron descargadas por medio de la plataforma de acceso libre: Earth Explorer (USGS). Estas imágenes pertenecen a los años de 1985, 1990, 2000, 2001 y 2016; las cuales fueron adquiridas con el mínimo porcentaje de nubosidad (< 25%) posible en el área de estudio que se encuentra en zona de transición climática.

Imágenes Sentinel

Las imágenes de Sentinel 2 fueron descargadas por medio de la plataforma de acceso libre: Copernicus Open Access Hub. Esta imagen pertenece al año 2019 y fue adquirida con menor porcentaje de nubosidad y resolución que las imágenes Landsat.

Tabla 3.1 Descripción de las características correspondientes a las imágenes satelitales obtenidas de Landsat 5, 7, 8 y Sentinel 2. Fuente: [Autor]

Imagen	Tipo satélite	Página web	Fecha emisión	Fecha descarga	Peso (Mb)
1	Landsat 5	USGS	07/02/1985	20/05/2021	248
2	Landsat 5	USGS	21/02/1990	20/05/2021	504
3	Landsat 7	USGS	23/11/2000	20/05/2021	604
4	Landsat 7	USGS	31/03/2001	20/05/2021	328
5	Landsat 8	USGS	20/06/2016	21/05/2021	1110
6	Sentinel 2	Copernicus	15/08/2019	08/06/2021	523

3.2 Mapas Geológicos

Las hojas geológicas utilizadas son a escala 1:100000 y corresponden a información cartográfica disponible que pueden ser descargadas por medio de la página del geo portal del IGM. Las hojas geológicas usadas en el proyecto son las siguientes:

- Hoja Geológica 48, Quevedo.
- Hoja Geológica 47, Valencia.
- Hoja Geológica 62, Los Vergeles.
- Hoja Geológica 67, Patricia Pilar.
- Mapa Geológico del Ecuador, Baldock (1982).
- Mapa topográfico y geomorfológico del cantón Buena Fe (Los Ríos).

3.3 Formatos shapefile (SHP)

La data georreferenciada en formato shapefile adquirida de la plataforma del IGM son:

- Mapa de ríos y drenajes.
- Mapa de cuencas hidrográficas.
- Mapa de provincias y cantones.
- Mapa de poblaciones y parroquias.

3.4 Metodología

La metodología aplicada para el análisis multitemporal y geomorfológico del río Bajaña (Buena Fe - Los Ríos - Ecuador) se describe a continuación:

3.4.1 Análisis Multitemporal

El análisis multitemporal se basa en la aplicación de diferentes métodos o técnicas de teledetección espacial, con el fin de evaluar las variaciones geomorfológicas y geométricas a lo largo del tiempo, por medio del uso de imágenes adquiridas por los distintos satélites que se encuentran orbitando sobre el espacio exterior. Puede ser realizado por medio de los distintos softwares disponibles en el mercado, de los cuales se citan los siguientes: ArcGIS, ArcMap, ENVI, Q-GIS, SNAP, Google Earth Pro, etc.

El estudio se enfocó en representar mediante diferentes imágenes de satélite las variaciones de cauce, tanto en su forma como geometría, que ha tenido el río Bajaña a través de un intervalo de tiempo. La metodología que se utilizó para realizar el análisis multitemporal (1985 - 2019) del área de estudio puede ser observada en la Figura 3.1.

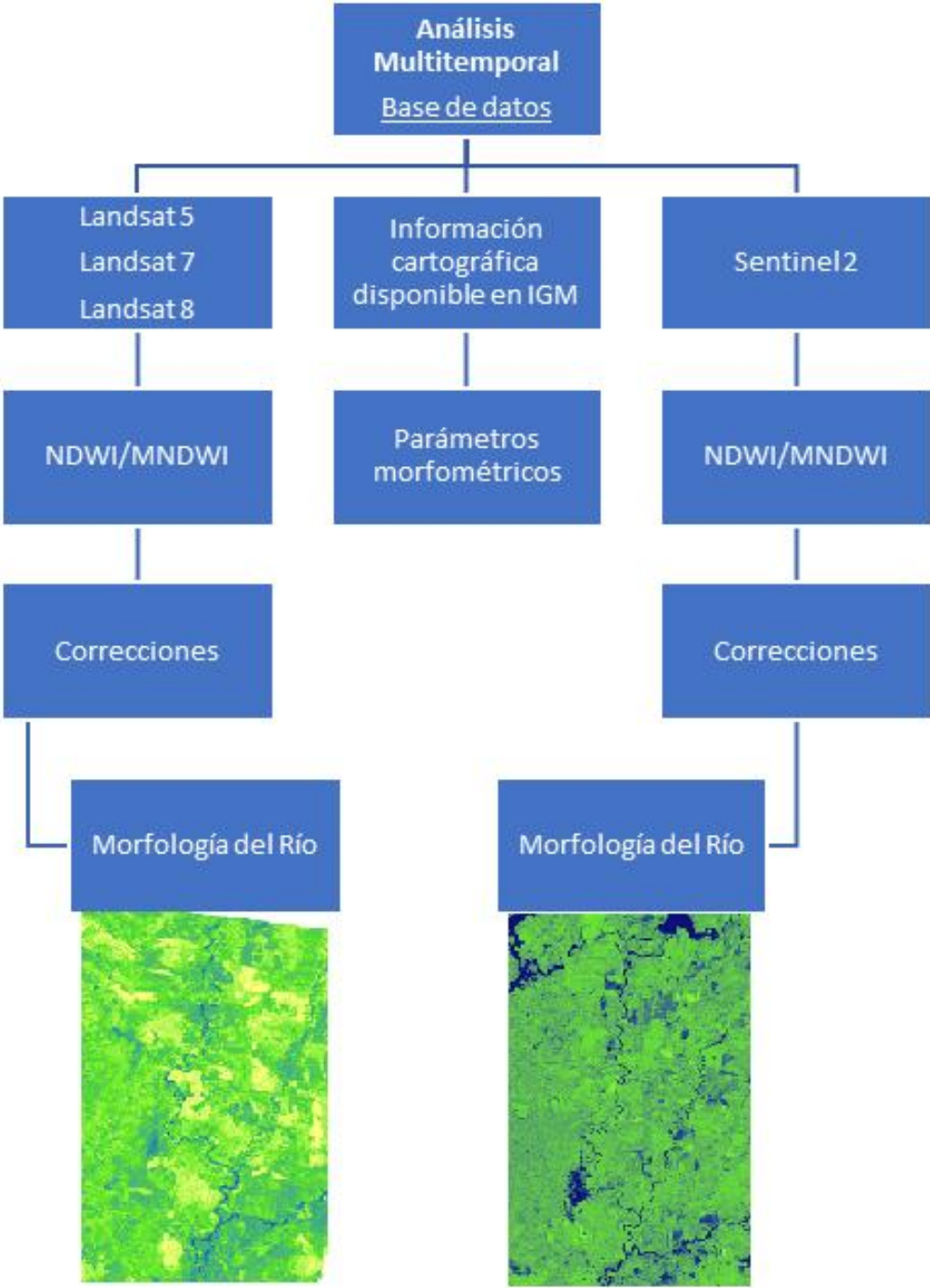


Figura 3.1 Esquema de la metodología utilizada. El análisis multitemporal da como producto la morfología del río Bajaña para un lapso o período de tiempo (1985 -2019). Fuente: [Autor]

En la primera parte del desarrollo metodológico se descargó el mapa del Ecuador con sus diferentes provincias, cantones, parroquias, ríos y redes de drenaje que pertenecen a la cuenca hidrográfica del Guayas, las cuales están conformadas por información cartográfica disponible referente a la geología, topografía, hidrología y geomorfología; también, las distintas hojas geológicas correspondientes a la zona de estudio, obtenidas de la página del IGM. Además, las imágenes satelitales Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8 y Sentinel 2 adquiridas de las plataformas de acceso libre de la Earth Explorer (USGS) y Copernicus Access Open Hubb respectivamente (ver Figura 3.2).

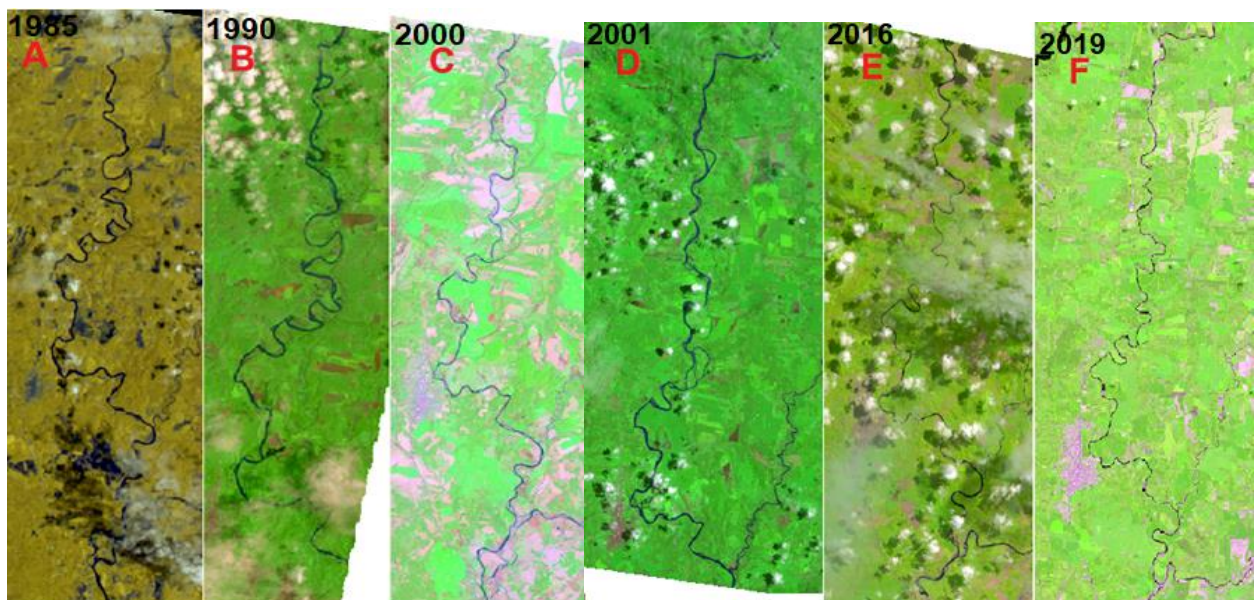


Figura 3.2 Imágenes satelitales descargadas para el proyecto. La imagen A y B se obtuvo en el año 1985 y 1990 respectivamente mediante el satélite Landsat 5 (USGS). La imagen C y D se obtuvo para el año 2000 y 2001 respectivamente mediante el satélite Landsat 7 (USGS). La imagen E se obtuvo para el año 2016 mediante el satélite Landsat 8 (USGS). La imagen F se obtuvo en el año 2019 a partir del satélite Sentinel 2 (Copernicus Access Hubb). Fuente: [Autor]

En la segunda parte del procesamiento de datos metodológico, se procedió a hacer un primer análisis visual de los cambios de cauce o caudal que tuvo al río a través del tiempo (1985-2019) por medio del software ArcMap. La composición de bandas RGB que se aplicaron a las imágenes satelitales Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8 y Sentinel 2 fueron para resaltar y diferenciar los cuerpos de agua y de vegetación (ver Tabla 2.6).

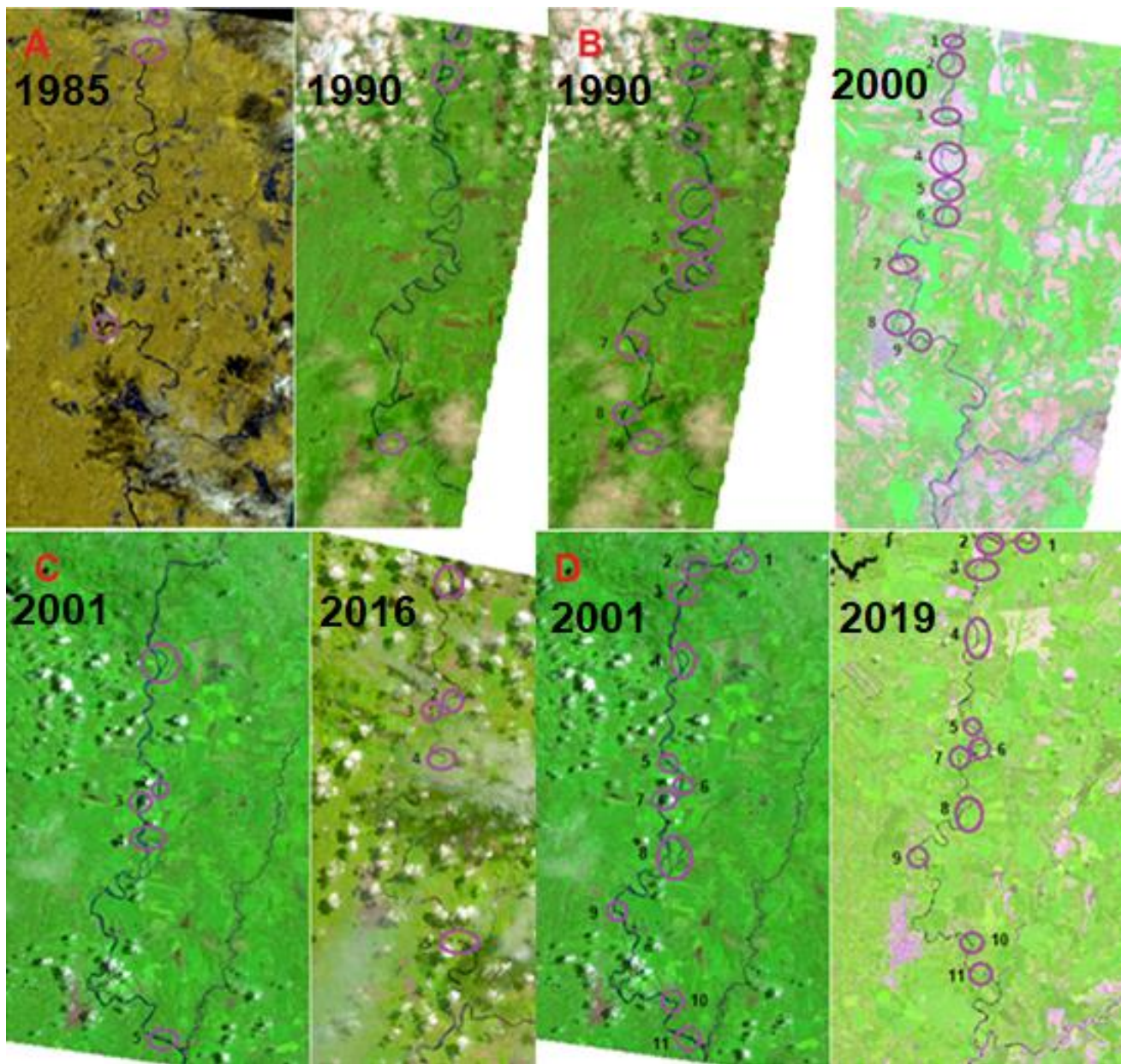


Figura 3.3 Análisis visual de las variaciones geomorfológicas del río Bajaña a través del tiempo (1985-2019). En la imagen A se evidencia 3 cambios notables en la forma del río Bajaña desde 1985-1990. En la imagen B se visualiza 9 cambios en la afluencia del río Bajaña desde 1990-2000. En la imagen C se observa 5 cambios evidentes en la morfología del río Bajaña desde 2001-2016. La imagen D representa 11 cambios en el cauce del río Bajaña desde el 2001-2019. Fuente: [Autor]

En tercera instancia, para la estimación y visualización de la morfología fluvial y análisis multitemporal del río Bajaña desde al año 1985 hasta el 2019 se aplicó, usando el software ArcMap, los diferentes índices de agua normalizada (NDWI y MNDWI) para la extracción de masas de agua y terreno sobre el área de estudio de las imágenes satelitales, debido a que estos métodos son los más factibles y eficientes para obtener una buena información de las características geomorfológicas del río Bajaña y su comportamiento de flujo o cauce sobre el canal. Este proceso se dividió en tres fases:

Fase 1: Consiste en la aplicación del índice de agua diferenciada normalizada (NDWI) para delimitar y diferenciar las masas de agua y no agua (tierra y vegetación). En este caso los resultados muestran errores ligados a la nubosidad presente en las imágenes de satélite Landsat y Sentinel (ver Figura 3.4).

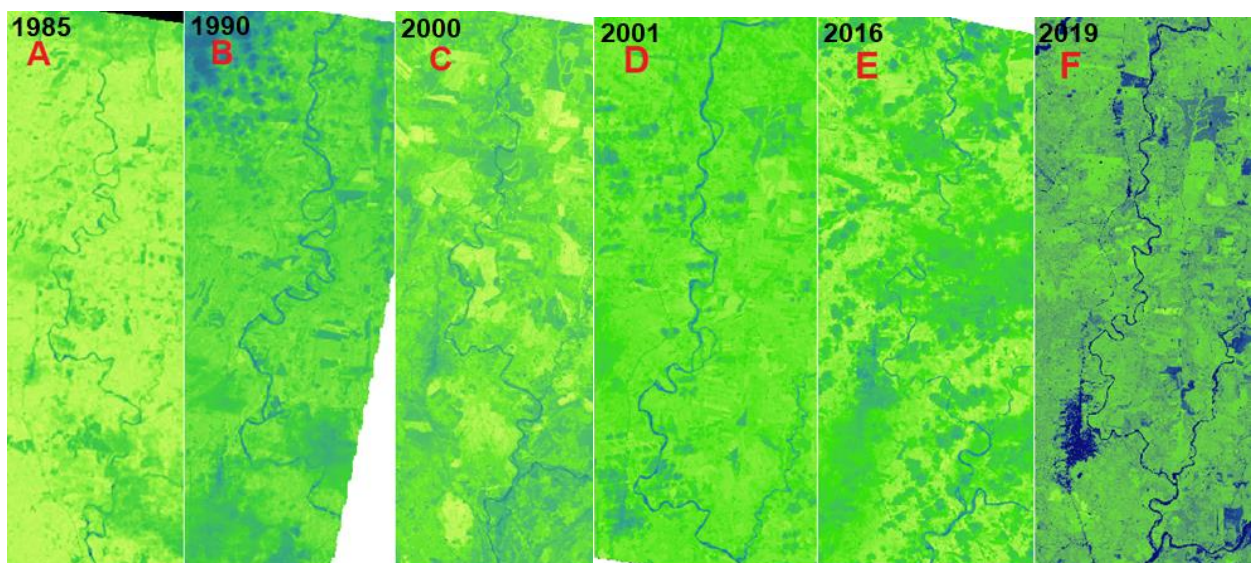


Figura 3.4 Aplicación del NDWI a las imágenes satelitales Landsat y Sentinel. Fuente: [Autor]

Fase 2: Consiste en la aplicación del índice de extracción de agua diferenciada normalizada modificada (MNDWI) para resaltar y realzar las masas de agua y no agua con una mejor resolución espacial y espectral. En este caso los resultados muestran errores ligados a la pérdida de información generada por las manchas de nubes presentes en las imágenes satelitales; especialmente las que cubren el río Bajaña y las que se encuentran ubicadas sobre el área de análisis (ver Figura 3.5).

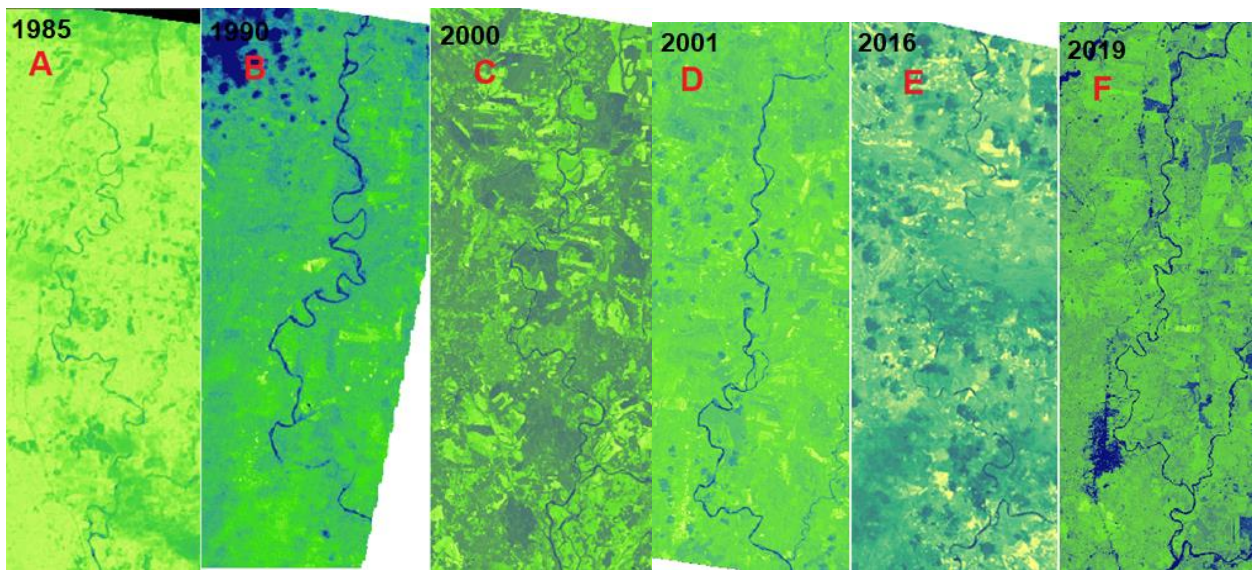


Figura 3.5 Aplicación del índice de extracción de agua normalizada modificada MNDWI a las imágenes satelitales Landsat 5, 7, 8 y Sentinel 2. Fuente: [Autor]

Fase 3: Los errores asociados a la nubosidad y a la calidad o falta de información generada luego del procesamiento, provocan ambigüedad al momento de analizar los datos y resultados. En esta fase se realizó un realce, delimitación y depuración de los datos resultantes, después de aplicar los distintos índices de extracción de masas de agua diferenciada normalizada (NDWI y MNDWI), realizados bajo el criterio del operador o usuario, con el fin de visualizar y examinar de una mejor manera el río Bajaña que se encuentra ubicada dentro del área de estudio (ver Figura 3.6).

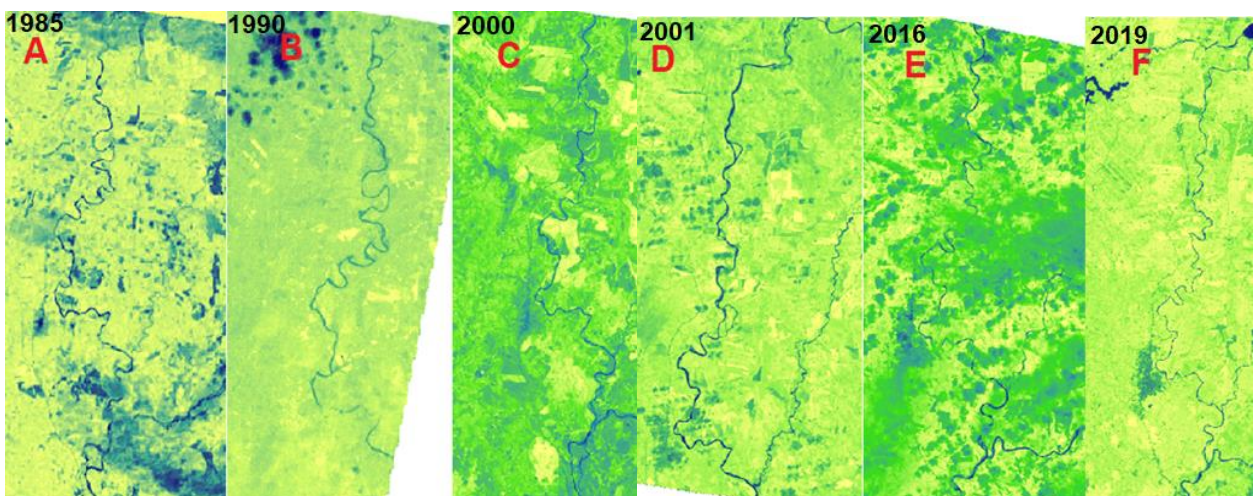


Figura 3.6 Realce de color mediante mosaicos a las imágenes satelitales Landsat 5, 7, 8 y Sentinel 2. Fuente: [Autor]

3.5 Parámetros Geomorfométricos de la Cuenca Hidrográfica

Los parámetros geomorfométricos ligados a la cuenca fluvial se las obtiene utilizando las fórmulas descritas en la Tabla 3.2, en conjunto con los resultados adquiridos concernientes a la forma del río Bajaña, con el fin de determinar las características morfométricas y geométricas de la subcuenca hidrográfica del río Vinces, que se encuentra ubicada dentro de la cuenca hidrográfica del río Guayas.

Tabla 3.2 Fórmulas de los parámetros geomorfológicos para la subcuenca hidrográfica del río Vinces. Fuente: [Autor]

No	Parámetro	Fórmula
1	N_u	$N_u = N_1 + N_2 + N_3 + \dots N_n$
2	L_u	$L_u = L_1 + L_2 + L_3 + \dots L_n$
3	L_{sm}	$L_{sm} = \frac{L_u}{N_u}$
4	R_L	$R_L = \frac{L_u}{L_u - 1}$
5	D_d	$D_d = \frac{L_u}{A}$
6	F_s	$F_s = \frac{N_u}{A}$
7	T	$T = D_d * F_s$
8	Re	$Re = \frac{D}{L} = 1.28 * \sqrt{\frac{A}{L}}$
9	R_c	$R_c = \frac{4\pi * A}{v^2}$
10	F_f	$F_f = \frac{A}{L^2}$

3.6 Parámetros Geomorfométricos del río Bajiña

Para el cálculo de los parámetros geomorfométricos ligados al río Bajiña, se utilizan las fórmulas descritas en la Tabla 3.3, en conjunto con los resultados dados referente a la morfología de este, con el fin de determinar las características morfométricas y geométricas del presente río, incluido su área y perímetro total; además de la longitud del canal y de onda de cada meandro que se han ido formando y cambiando su cauce a lo largo del tiempo sobre río Bajiña (Buena Fe - Los Ríos-Ecuador).

Tabla 3.3 Fórmulas de los Parámetros Geomorfométricos para el cauce del Río Bajiña. Fuente: [Autor]

No	Parámetro	Fórmula
1	Radio de Circularidad (Rc)	$\sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}$
2	Sinuosidad (Sr)	$\frac{\text{Largo Canal (L)}}{\text{Longitud Onda (l)}}$
3	Estanqueidad (Es)	$\frac{\text{Radio de circularidad (R}_c\text{)}}{\text{Ancho del canal (w)}}$

CAPITULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo se detallarán los resultados cualitativos y cuantitativos, obtenidos después de la aplicación de los diferentes índices de extracción de masas de agua normalizadas (NDWI y MNDWI) sobre la zona de estudio. De manera general se calcularon parámetros geomorfológicos o morfométricos para la subcuenca hidrográfica del río Vinces y para el cauce del río Bajaña ubicado al norte de esta, específicamente en el cantón Buena Fe, perteneciente a la provincia de Los Ríos (Ecuador).

4.1 Parámetros de la Cuenca Hidrográfica del Guayas

Para determinar los parámetros ligados a la subcuenca del río Vinces se estudió el curso del río Bajaña y sus principales canales de flujo. Parámetros absolutos de la cuenca hidrográfica como el área, perímetro y longitud total fueron obtenidos a través de GIS, Google Earth e información cartográfica del IGM. Los parámetros sobrantes se definieron primordialmente en base al largo total del canal de afluencia sobre sus redes de drenaje y su número de orden según sus ramales, calculándolos en Microsoft Excel.

Se calcularon 13 parámetros geomorfométricos para la subcuenca hidrográfica del río Vinces, las cuales brindan importante información sobre los factores o propiedades de drenaje que poseen cada uno de los canales, redes de drenaje o sistemas fluviales desde su surgimiento (aguas arriba) hasta su posterior desembocadura (aguas abajo).

La subcuenca hidrográfica del río Vinces posee una alta energía potencial acumulada y una enorme velocidad flujo en sus redes de drenaje, provocando que sus corrientes de agua transporten una gran cantidad de materiales sedimentarios de norte (aguas arriba) a sur (aguas abajo) por su fuerte caudal; que luego se acumularán y depositarán en las llanuras aluviales, abanicos fluviales, conos, terrazas, estuarios y deltas marinos.

Análisis e interpretación de los resultados obtenidos luego de calcular los parámetros morfométricos sobre la subcuenca hidrográfica del río Vinces:

- a) El valor 1.10 de la relación de longitud de flujo (RI), indica que se encuentra una fase o etapa madura en el desarrollo geomórfico de la cuenca hidrográfica.
- b) El valor 0.65 de bifurcación (Rb) indica que las ramificaciones que representan cada uno de los canales de los ríos, permanecen y prevalecen unidas dentro de la cuenca, aunque puede evidenciarse canales o meandros abandonados.
- c) El valor 0.58 de relación media de bifurcación (Rbm) indica que los canales de los ríos que conforman cada una de las ramificaciones de la cuenca hidrográfica, poseen características de flujo con morfologías meándricas en forma de lavabos extensos y estrechos.
- d) El orden de flujo (U) de sexto orden presenta distintos ramales que permiten drenar sus aguas por los diferentes canales de flujo, desde su nacimiento hasta su posterior desembocadura según la dirección de cauce de la cuenca fluvial.
- e) El valor de 11.786 km de la longitud de flujo (Lu) indica que la cuenca fluvial posee áreas con menores pendientes a lo largo de todo su perímetro.
- f) El valor de 2.76 de la densidad de drenaje (Dd) indica que las geoformas han tenido una gran evolución en el paisaje, debido a su gran potencial de escorrentía y permeabilidad que provoca que el agua se infiltre en las rocas.
- g) El valor de 3.04 de la textura de drenaje (T) gruesa, indica que la cuenca posee una gran capacidad de infiltración por su alta permeabilidad y escorrentía.
- h) El valor de 1.10 de la frecuencia de flujo (Fs) y 0.25 de la relación de circularidad (Rc), indican que la cuenca fluvial se encuentra en una etapa madura y en fase de sedimentación en el desarrollo geomórfico de la cuenca hidrográfica.
- i) El valor de 0.77 de la relación de alargamiento (Re) indica que la cuenca fluvial está ubicada en un área con un relieve y pendiente que va de media a alta.
- j) El valor de 0.14 del factor de forma (Ff), indica que la cuenca hidrográfica posee lavabos largos y angostos a lo largo de toda su superficie o área de la cuenca.
- k) El valor de 0.18 de la longitud de flujo terrestre (Lg), indica la medida longitudinal máxima en la que ha circulado el afluente, desde la vegetación o tierra hasta antes de que fluya por los canales de drenaje del río en la cuenca fluvial.
- l) El valor de 5.15 km del relieve (R) representa la forma y el tamaño o altura máxima a la que llegó el relieve y geoformas de la cuenca fluvial.

m) El valor de 0.44 de la relación de relieve (Rr) representa un gradiente bajo, pero con una gran capacidad de erosión y meteorización (denudación) en las laderas, márgenes o bordes de la cuenca fluvial (ver Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Parámetros Morfométricos calculados para la cuenca del río Vinces. Fuente: [Autor]

Parámetro	Valor
Área (A)	4268 km ²
Perímetro (P)	459.66 km
Longitud (L)	76.99 km
Orden del flujo (U)	6° orden
Número de flujo (Nu)	4676
Longitud del flujo (Lu)	11.786 km
Longitud media del flujo (Lsm)	2.52
Densidad de drenaje (Dd)	2.76
Textura de drenaje (T)	3.04
Frecuencia de flujo (Fs)	1.10
Relación de Alargamiento (Re)	0.77
Relación de Circularidad (Rc)	0.25
Factor de forma (Ff)	0.14
Longitud de flujo terrestre (Lg)	0.18
Relieve (R)	5.15 km
Relación de relieve (Rr)	0.44

4.2 Análisis de Resultados de las Imágenes Satelitales (1985-2019)

En esta sección del Capítulo 4 se explica a detalle cómo se convirtió las imágenes satelitales procesadas en el Capítulo 3 a vector o polígono; para luego corregirlas delimitándolas manualmente toda su trayectoria que se encuentra dentro de la zona de estudio, mediante la creación de varios shapefiles de líneas en el software ArcMap que corresponden a cada año de análisis, con el fin de representar el perímetro longitudinal total y la forma final del río Bajaña en cada período o intervalo de tiempo.

4.2.1 Vectorización de las Imágenes Satelitales (1985-2019)

Para transformar las imágenes satelitales Ráster a Vector, primero se procedió a pasar dichas imágenes a binarias (dos colores), para luego hacer una reclasificación de datos con la herramienta Reclassify del Arctoolbooks (ArcGIS), donde por lo general valores mayores a 0 (positivo) pertenecen a los cuerpos de agua y los menores a 0 (negativo) a la vegetación. Posteriormente, se las convirtió a Vector por medio de la herramienta Ráster to Polygon que se encuentra en el Arctoolbooks del ArcMap y se les añadió los colores correspondientes, tal como se muestra en las Figuras 4.1 y 4.2.

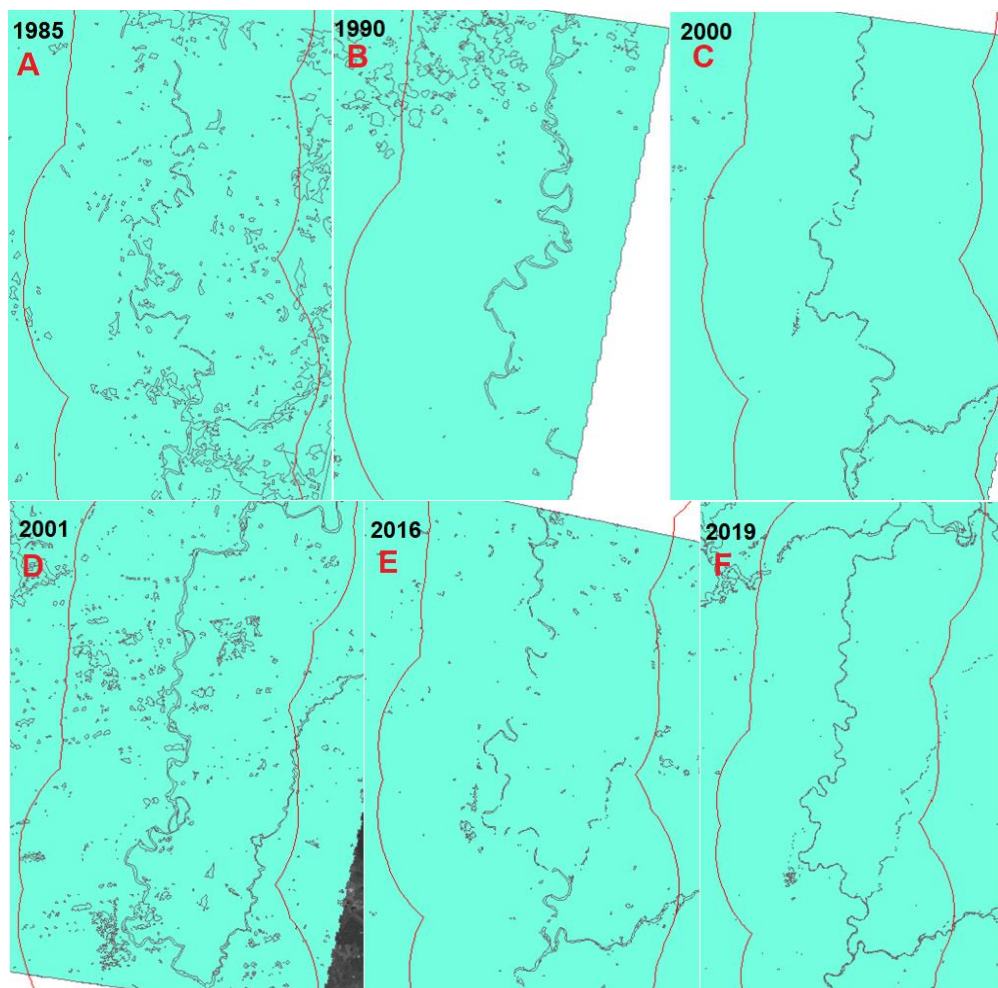


Figura 4.1 Reclasificación de las Imágenes Satelitales a Binarias. Fuente: [Autor]

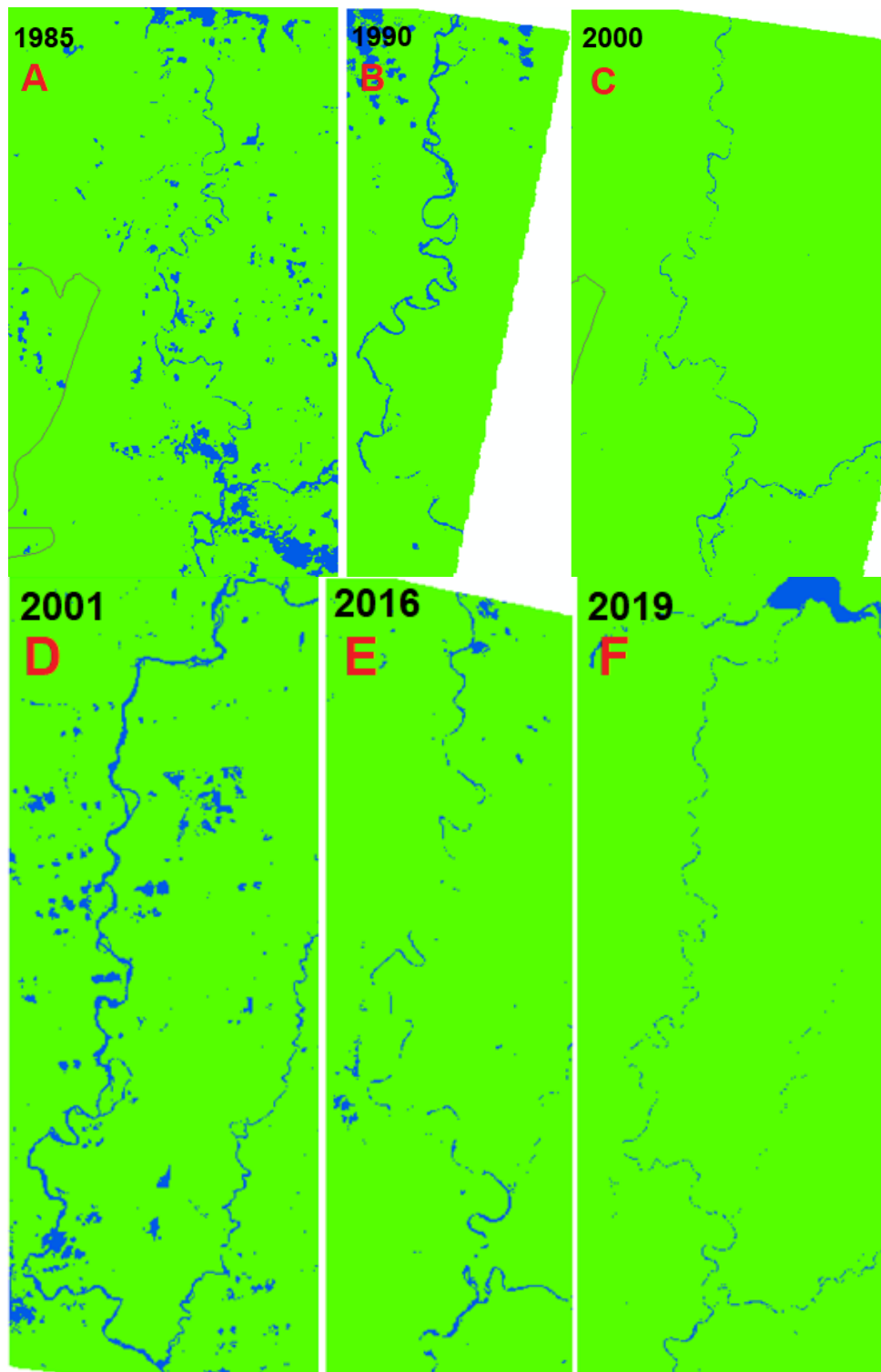


Figura 4.2 Vectorización de las Imágenes Satelitales Binarias. Fuente: [Autor]

4.2.2 Correcciones manuales en las imágenes satelitales (1985-2019)

Para corregir las imágenes satelitales, se procedió a crear un nuevo shapefile de líneas en ArcMap, con el objetivo de delimitar manualmente los espacios en blanco que quedaron discontinuos en dirección del cauce del río, producto de las ambigüedades en el procesamiento de los datos; y así obtener la forma o morfología total del río Bajaña (ver Figura 4.3), para finalmente con estos datos hacer un buen análisis multitemporal.

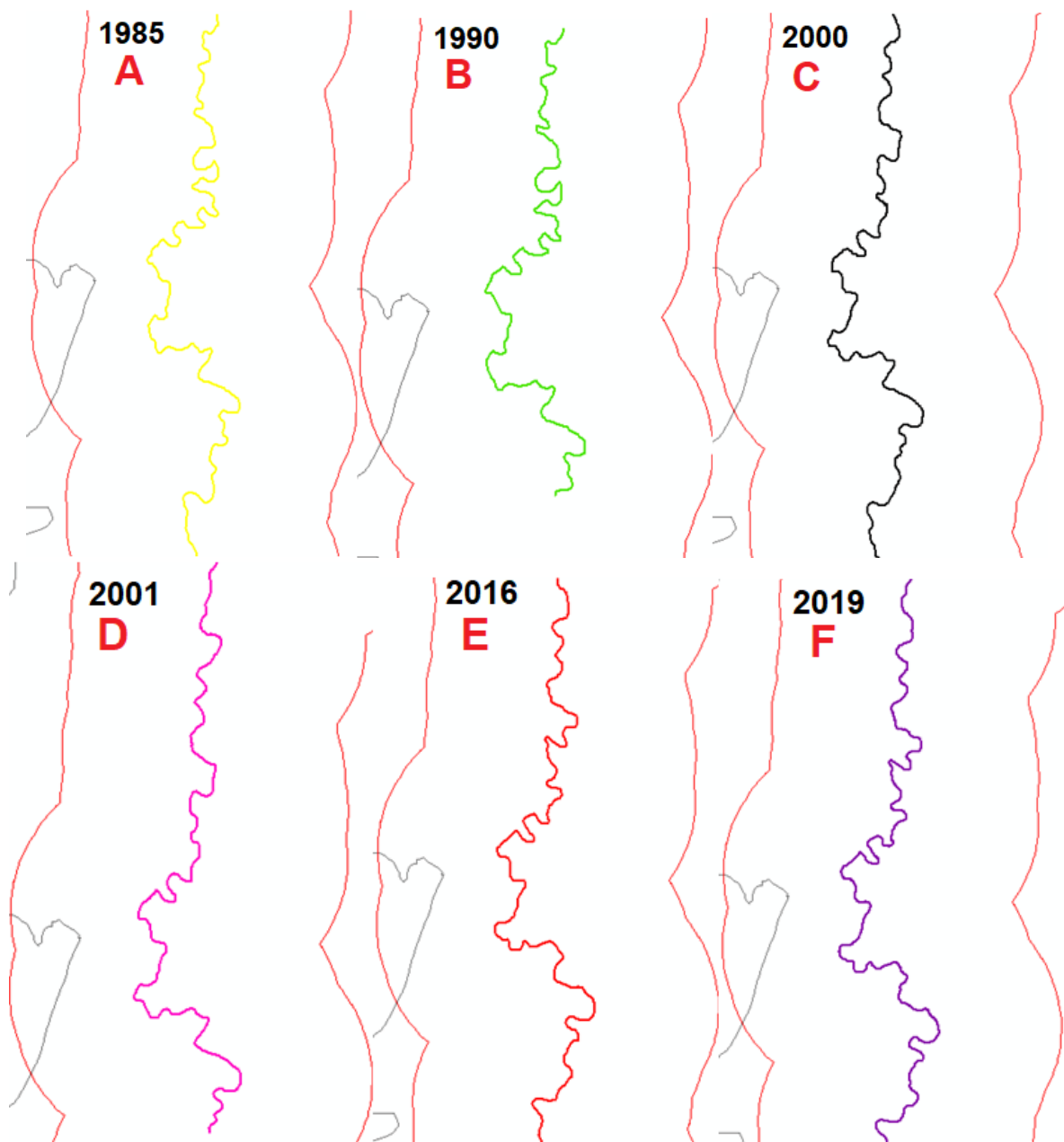


Figura 4.3 Correcciones manuales de las Imágenes Satelitales Binarias. Fuente: [Autor]

4.2.3 Análisis multitemporal de las imágenes satelitales (1985-2019)

Se identificaron 6 zonas importantes con variaciones en la morfología del río Bajiña, a lo largo de toda la zona de estudio del cantón Buena Fe (Los Ríos – Ecuador). Los mayores cambios en la morfología del río Bajiña se evidencian con más frecuencia en el centro y norte del área de estudio, tal como se muestra en la Figura 4.4 y 4.5.

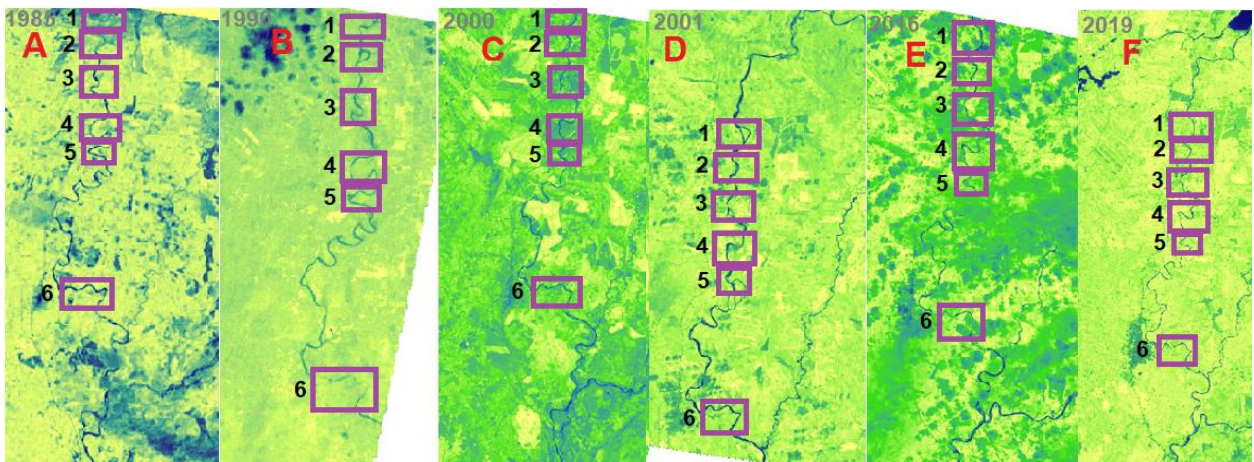


Figura 4.4 Las imágenes de A-F (1985–2019) se evidencian 6 variaciones notables en la forma de cauce del río Bajiña. Fuente: [Autor]

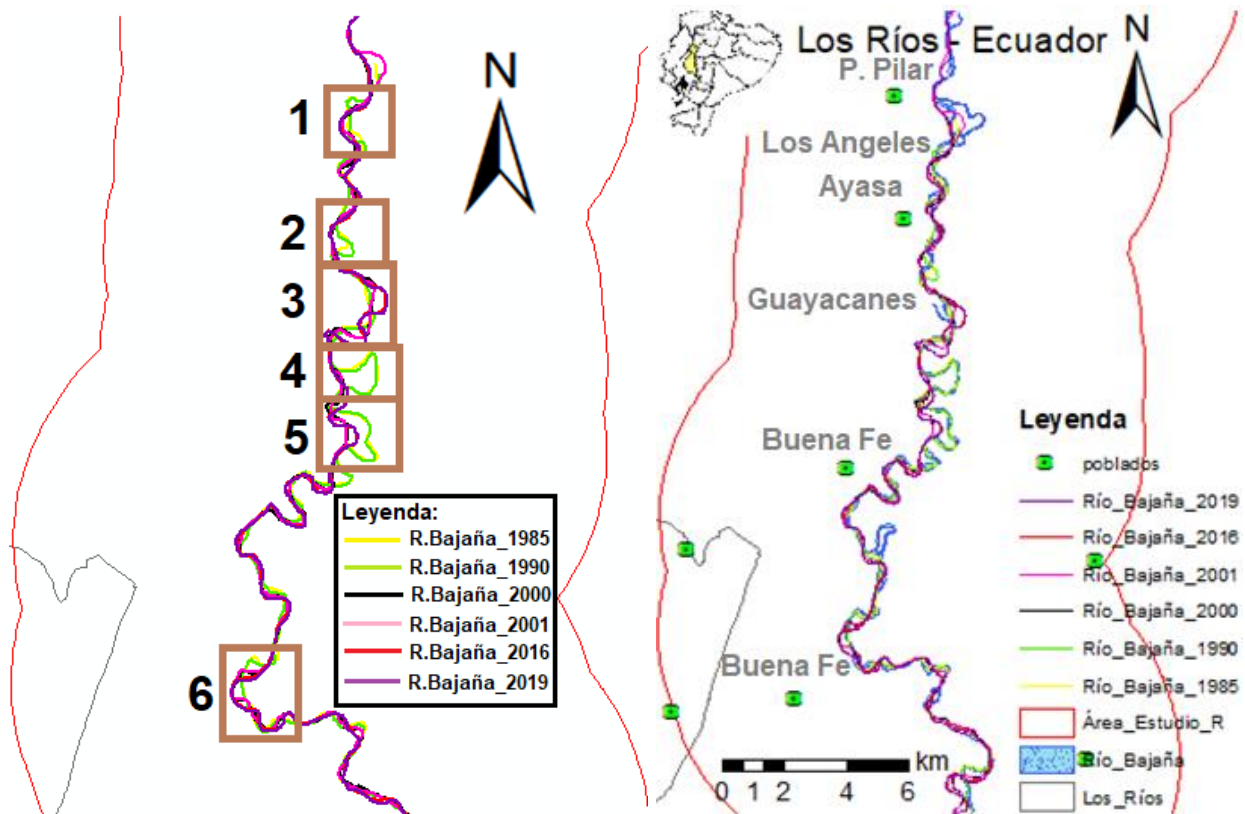


Figura 4.5 Cambios en la morfología del río Bajiña en el tiempo y su población. Fuente: [Autor]

Una representación general del área de estudio del río Bajiña y las variaciones de su principal cauce (ver Figura 4.6), donde se observa mayores cambios morfológicos en la parte central y norte de la zona encerrada con color rojo. Al sur del área de estudio no se ha evidenciado grandes cambios en su dirección de afluencia debido a que su caudal disminuyó a lo largo de su trayecto, formándose bancos de arena y barreras de tierra por la fuerte acumulación de sedimentos que se depositan en los conos, terrazas indiferenciadas y la llanura aluvial, provocando que su velocidad de flujo disminuya.

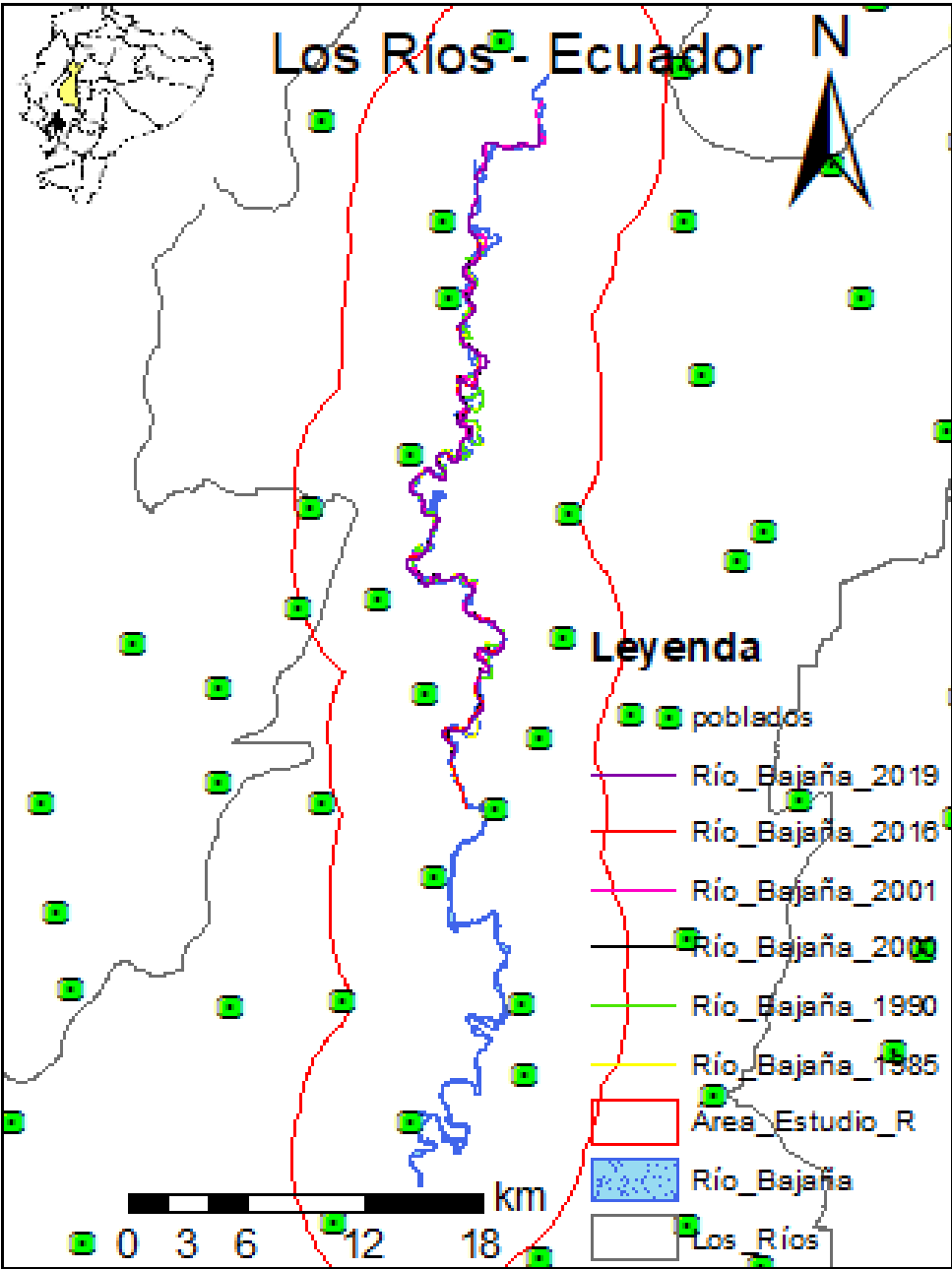


Figura 4.6 Esquema general del río Bajiña con sus principales variaciones de cauce en los años 1985, 1990, 2000, 2001, 2016 y 2019 y sus distintas poblaciones. Fuente: [Autor]

4.3 Parámetros Morfométricos o Geomorfológicos del Río Bajaña

4.3.1 Radio de Curvatura o Circularidad (Rc)

El radio de circularidad (Rc) de cada una de las 6 zonas que presenta variaciones en el cauce del río Bajaña se lo calculó midiendo la distancia que hay entre el punto central de la morfología semicircular de cada meandro del río hasta una de sus periferias o márgenes del canal (ver tabla 4.2); los valores del Rc servirán para determinar la forma que adopta la curva del meandro y para el cálculo del índice de estanqueidad (Es).

Tabla 4.2 Radio de circularidad (Rc) de cada zona que presenta variación en el meandro o cauce del río Bajaña. Fuente: [Autor]

Radio de Circularidad (Rc)						
t (Año)	1985	1990	2000	2001	2016	2019
Zona 1 (m)	99	128	130	165	178	180
Zona 2 (m)	160	180	129	139	145	150
Zona 3 (m)	200	210	230	208	201	190
Zona 4 (m)	250	255	150	125	160	170
Zona 5 (m)	255	245	168	162	210	200
Zona 6 (m)	270	275	180	170	185	180

4.3.2 Índice de Sinuosidad (Sr)

La sinuosidad (Sr) de cada una de las 6 zonas que presenta variaciones en el cauce del río Bajaña se la calculó mediante la razón o relación del Largo de canal (L) sobre la Longitud de onda del meando (l); para lo cual, primero se midieron las distancias respectivas en cada zona de lo que se necesita para el cálculo de este índice; y así con esos datos obtenidos, se efectuó la división de L/l, arrojando los valores o resultados finales que se evidencian en las Tablas 4.3, 4.4 y 4.5 respectivamente, que servirán para determinar a qué tipo de río (devanado, meándrico, anastomosado) pertenece cada subzona analizad sobre el área de estudio del río Bajaña.

Tabla 4.3 Largo del canal (L) de cada zona que presenta variación en el meandro o cauce del río Bajaña. Fuente: [Autor]

Largo del Canal (L)						
t (Año)	1985	1990	2000	2001	2016	2019
Zona 1 (m)	400	563	1074	1290	1663	1580
Zona 2 (m)	940	1248	2210	2019	1672	1712
Zona 3 (m)	2330	2585	2959	2698	1959	1862
Zona 4 (m)	2940	2912	1934	1969	1606	1569
Zona 5 (m)	2062	2299	1812	1795	1260	1400
Zona 6 (m)	3076	2959	3106	3198	3214	3293

Tabla 4.4 Longitud de onda del meandro (l) de cada zona que presenta variación en el cauce del río Bajaña. Fuente: [Autor]

Longitud de onda del meandro (l)						
t (Año)	1985	1990	2000	2001	2016	2019
Zona 1 (m)	251	316	811	1003	1025	1029
Zona 2 (m)	536	416	1695	1638	1429	1235
Zona 3 (m)	1493	1756	1628	1635	990	962
Zona 4 (m)	853	850	1064	1039	1099	1105
Zona 5 (m)	876	960	1032	1018	649	706
Zona 6 (m)	1450	1481	1269	1426	1335	1316

Tabla 4.5 Índice de Sinuosidad (Sr) de cada zona que presenta variación en el cauce del río Bajaña. Fuente: [Autor]

Sinuosidad (Sr)						
t (Año)	1985	1990	2000	2001	2016	2019
Zona 1	1.59	1.78	1.32	1.29	1.62	1.54
Zona 2	1.75	3.00	1.30	1.23	1.17	1.39
Zona 3	1.56	1.47	1.82	1.65	1.98	1.94
Zona 4	3.45	3.43	1.82	1.90	1.46	1.42
Zona 5	2.35	2.39	1.76	1.76	1.94	1.98
Zona 6	2.12	2.00	2.45	2.24	2.41	2.50

4.3.3 Índice de Estanqueidad (Es)

La Estanqueidad (Es) de cada una de las 6 zonas que presenta variaciones en el cauce del río Bajaña se la calculó mediante la razón o relación entre el Ancho del Canal (w) sobre el Radio de Circularidad (Rc); para lo cual, primero se midieron las distancias respectivas en cada zona de lo que se necesita para el cálculo este índice; y así con esos datos obtenidos, se realizó la división de Rc/w, arrojando los valores o resultados finales que se indican en las Tablas 4.6 y 4.7 respectivamente, que servirán para comparar y diferenciar canales de afluencia de diferentes tamaños y así, representar no solo la forma sino también la geometría del río Bajaña, incluyendo su ancho, largo y área del canal de afluencia con su respectivo caudal.

Tabla 4.6 Ancho del canal (w) de cada zona que presenta variación en el cauce del río Bajaña.

Fuente: [Autor]

Ancho del Canal (w)						
t (Año)	1985	1990	2000	2001	2016	2019
Zona 1 (m)	60	59	61	68	63	60
Zona 2 (m)	61	58	60	62	59	63
Zona 3 (m)	63	69	67	69	67	52
Zona 4 (m)	62	63	59	60	66	55
Zona 5 (m)	63	64	55	56	67	46
Zona 6 (m)	62	60	48	58	52	45

Tabla 4.7 Índice de Estanqueidad (Es) de cada zona que presenta variación en el cauce del río

Bajaña. Fuente: [Autor]

Estanqueidad (Es)						
t (Año)	1985	1990	2000	2001	2016	2019
Zona 1	1.65	2.17	2.13	2.43	2.83	3.00
Zona 2	2.62	3.10	2.15	2.24	2.46	2.38
Zona 3	3.17	3.04	3.43	3.01	3.00	3.65
Zona 4	4.03	4.05	2.54	2.08	2.42	3.09
Zona 5	4.05	3.83	3.05	2.89	3.13	4.35
Zona 6	4.35	4.58	3.75	2.93	3.56	4.00

4.4 Análisis de Resultados de los Parámetros del Río Bajaña.

a.-) Zona 1:

Con lo que respecta a la parte del río Bajaña que se ubica en el área 1 de la zona de estudio, se obtuvieron resultados donde se evidencia que la sinuosidad de este canal es de tipo meándrica en casi todo su perímetro (ver Tabla 4.5); debido a que en el período de tiempo (1985-2019) en que se realizó el análisis, la mayoría de los valores del índice de sinuosidad (S_r) se mantuvieron con cantidades superiores a 1.5; también los valores bajos (menores a 2) de estanqueidad (E_s) indican que la morfología curvilínea de los meandros del río tienden a estar gradualmente estrechas o angostas, donde la separación del flujo dentro de estas generan una pérdida de energía en su caudal a lo largo de todo el canal del río (ver Tabla 4.7). Además, este sector ha sufrido un desplazamiento (d) en sus meandros de 227 m de longitud aproximadamente, con una dirección que va desde Noreste (NE) hacia el Suroeste (SW) (ver Figura 4.7).

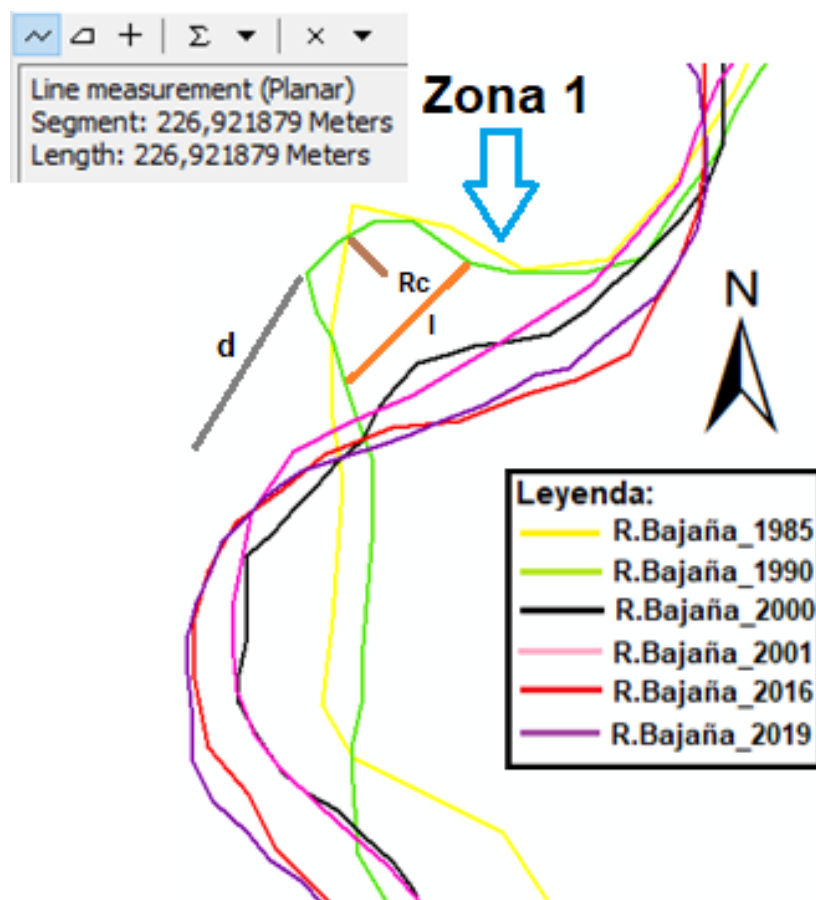


Figura 4.7 Esquema ampliada con zoom de la zona 1 donde hubo mayores cambios en la morfología o dirección de cauce del río Bajaña. Fuente: [Autor]

b.-) Zona 2:

Con lo que respecta a la parte del río Bajaña que se ubica en el área 2 de la zona de estudio, se obtuvieron resultados donde se evidencia que la sinuosidad del río es de tipo meándrica en casi todo su perímetro; pero que al pasar los años (1985-2019) estos meandros tendieron a disminuir progresivamente hasta invertir su dirección de afluencia desde Sureste hacia Noroeste (SE-NW), por lo que las cantidades de los índices de sinuosidad (S_r) decrecieron en el tiempo (ver Tabla 4.5); también los valores bajos (menores a 2) de estanqueidad (E_s) indican que la morfología curvilínea de los meandros del río tienden a estar gradualmente estrechas o angostas, donde la separación del flujo dentro de estas generan una pérdida de energía en su caudal a lo largo de todo el canal del río (ver Tabla 4.7). Además, este sector ha sufrido un desplazamiento (d) en sus meandros de 411 m de longitud aproximadamente, con una dirección que va desde el Sureste (SE) hacia el Noroeste (NW) (ver Figura 4.8).

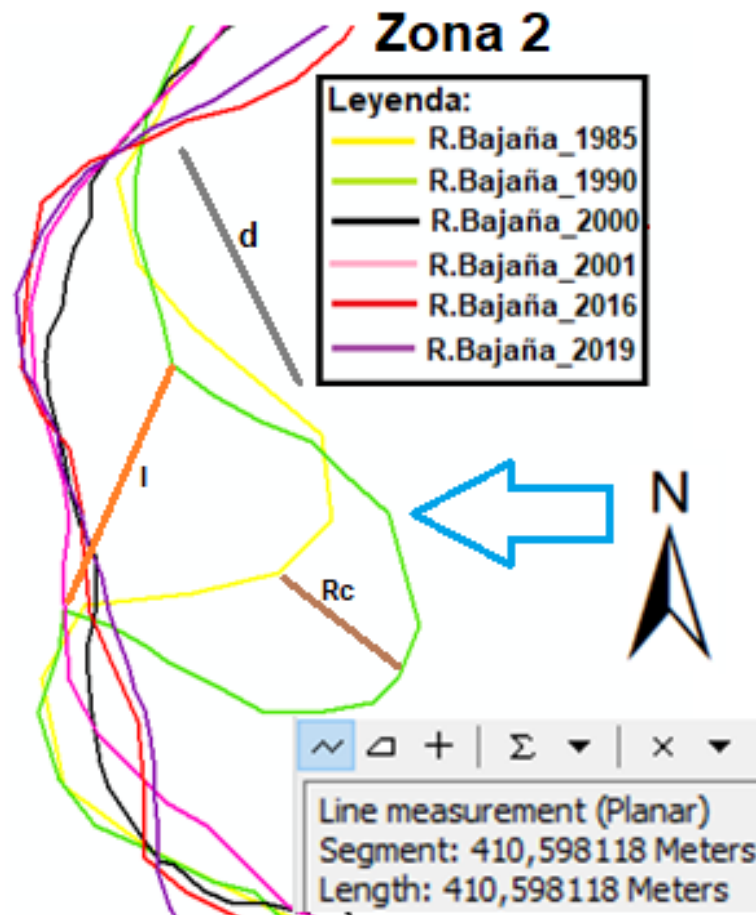


Figura 4.8 Esquema ampliada con zoom de la zona 2 donde hubo mayores cambios en la morfología o dirección de cauce del río Bajaña. Fuente: [Autor]

c.-) Zona 3:

Con lo que respecta a la parte del río Bajaña que se ubica en el área 3 de la zona de estudio, se obtuvieron resultados donde se evidencia que la sinuosidad del río es de tipo meándrica en casi todo su perímetro; y que al pasar los años (1985-2019) estos meandros tendieron a invertirse secuencialmente su dirección de afluencia desde Sureste hacia Noroeste (SE-NW) y viceversa, por lo que las cantidades de los índices de sinuosidad (S_r) variaron en el tiempo, pero con un rango superior a 1.5 (ver Tabla 4.5); también los valores intermedios (2 a 3) de estanqueidad (E_s) indican que la morfología curvilínea de los meandros del río tienden a ser ondas o parábolas en forma cóncava o convexa, donde la separación del flujo dentro de estas, mantiene constante la energía que se genera en su caudal a lo largo de todo el canal del río (ver Tabla 4.7). Además, este sector ha sufrido un desplazamiento (d) en sus meandros, donde se evidencia un cambio completo en la dirección de la onda desde el Sureste (SE) hacia el Noroeste (NW), con una longitud de 275 m aproximadamente (ver Figura 4.9).

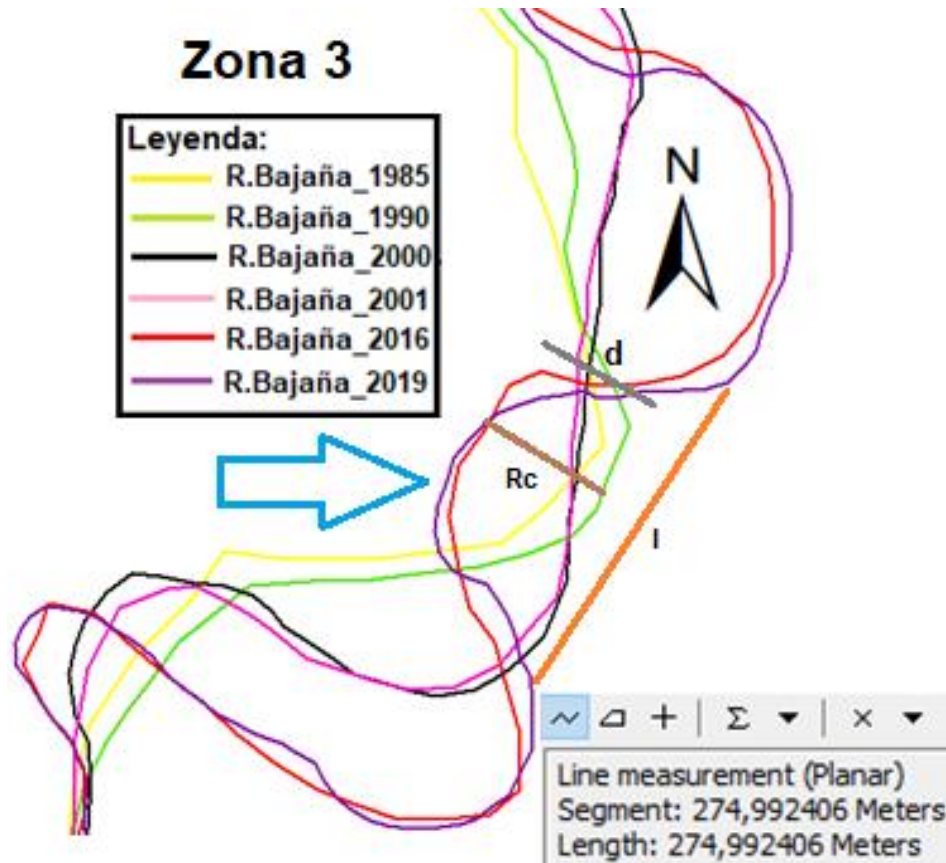


Figura 4.9 Esquema ampliada con zoom de la zona 3 donde hubo mayores cambios en la morfología o dirección de cauce del río Bajaña. Fuente: [Autor]

d.-) Zona 4:

Con lo que respecta a la parte del río Bajaña que se ubica en el área 4 de la zona de estudio, se obtuvieron resultados donde se evidencia que la sinuosidad del río es de tipo meándrica en casi todo su perímetro; pero que al pasar los años (1985-2019) estos meandros fueron estirándose, provocando que su amplitud de onda disminuya en el tiempo, por lo que los valores del índice de sinuosidad (S_r) decrecieron transitoriamente (ver Tabla 4.5); también los valores intermedios (2 a 3) de estanqueidad (E_s) indican que la morfología curvilínea de los meandros del río tienden a ser ondas o parábolas en forma cóncava o convexa, donde la separación del flujo dentro de estas, mantiene constante la energía que se genera en su caudal a lo largo de toda la afluencia del canal (ver Tabla 4.7). Además, este sector ha sufrido un desplazamiento (d) en la altura de sus meandros de 875 m de longitud aproximadamente, con una dirección que va desde el Este (E) hacia el Oeste (W), como se muestra en la Figura 4.10.

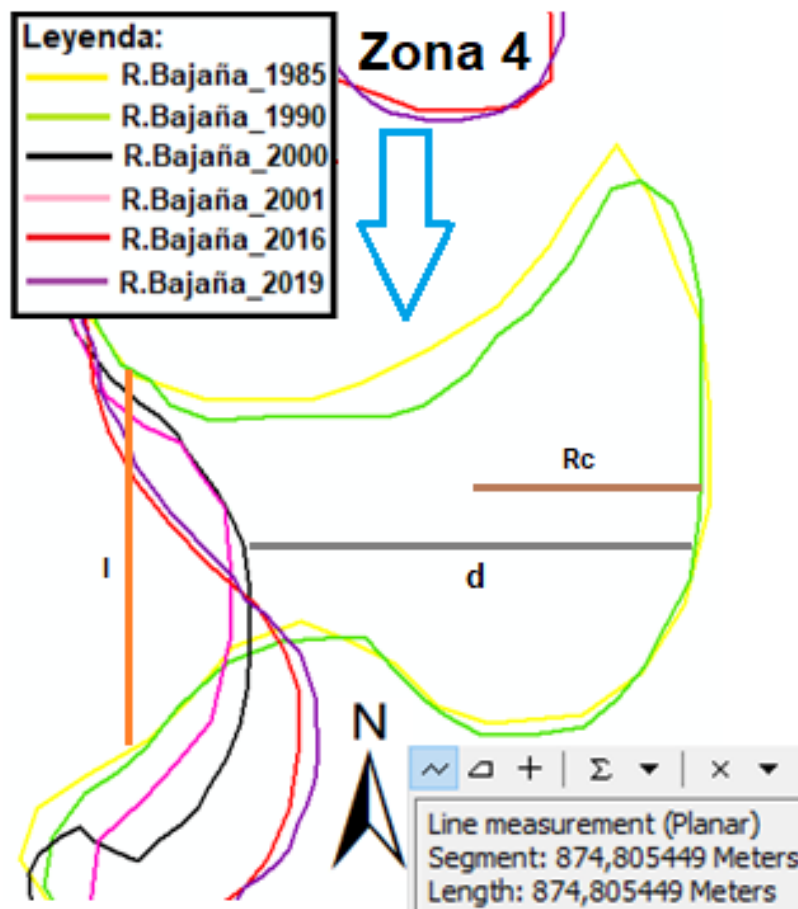


Figura 4.10 Esquema ampliada con zoom de la zona 4 donde hubo mayores cambios en la morfología o dirección de cauce del río Bajaña. Fuente: [Autor]

e.-) Zona 5:

Con lo que respecta a la parte del río Bajaña que se ubica en el área 5 de la zona de estudio, se obtuvieron resultados donde se evidencia que la sinuosidad del río es de tipo meándrica en todo su perímetro; y que al pasar los años (1985-2019) estos meandros fueron comprimiéndose, provocando que su amplitud de onda aumente en el tiempo, haciendo que los valores de los índices de sinuosidad (S_r) se mantuvieran en el intervalo de 1.5 en adelante (ver Tabla 4.5); también los valores altos (mayores a 3) de estanqueidad (E_s) indican que las curvas de los meandros del río tienden a estar gradualmente separadas o abiertas, donde la separación del flujo dentro de estas generan un aumento de energía en su caudal a lo largo de todo el canal del río (ver Tabla 4.7). Además, este sector ha sufrido un desplazamiento (d) en la estatura de sus meandros de 263 m de longitud aproximadamente con una dirección que va desde el Este (E) hacia el Oeste (W), como se muestra en la Figura 4.11.

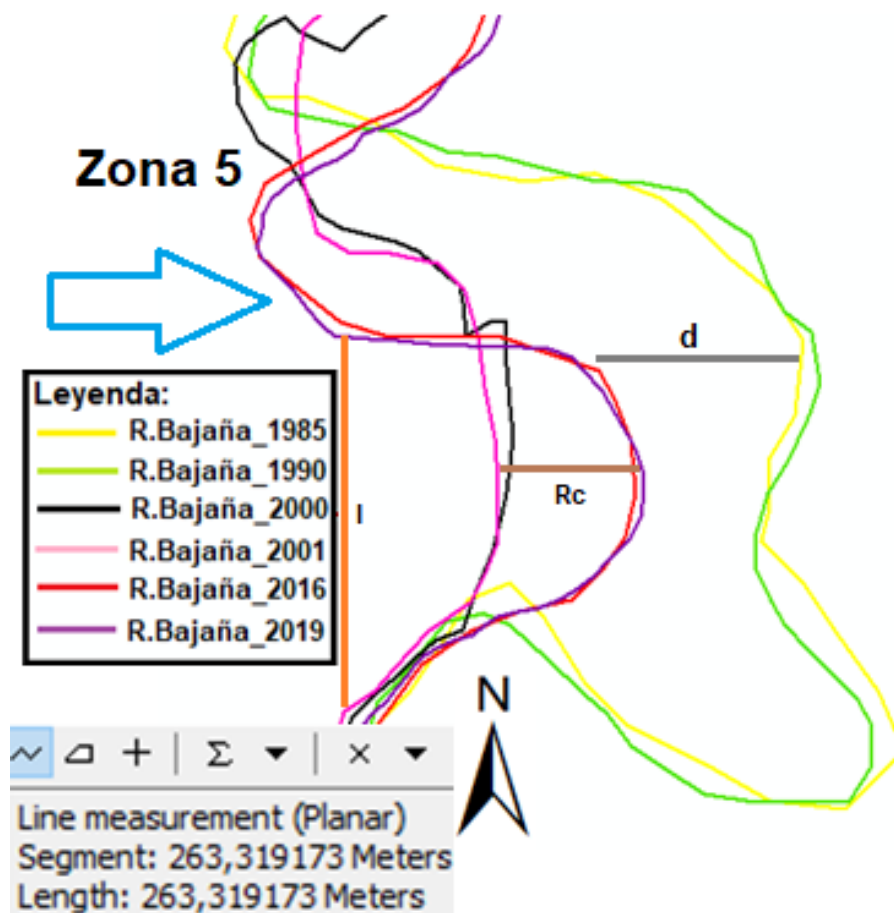


Figura 4.11 Esquema ampliada con zoom de la zona 5 donde hubo mayores cambios en la morfología o dirección de cauce del río Bajaña. Fuente: [Autor]

f.-) Zona 6:

Con lo que respecta a la parte del río Bajaña que se ubica en el área 6 de la zona de estudio, se obtuvieron resultados donde se evidencia que la sinuosidad del río es de tipo meándrica en todo su perímetro; debido a que en el período de tiempo (1985-2019) en que se realizó el análisis, los valores de los índices de sinuosidad (S_r) fueron cantidades superiores a 1.5 (ver Tabla 4.5); también los valores altos (mayores a 3) de estanqueidad (E_s) indican que la morfología curvilínea de los meandros del río tienden a estar gradualmente separadas o abiertas, donde la separación del flujo dentro de estas generan un aumento de energía en su caudal a lo largo de todo el canal del río (ver Tabla 4.7). Además, este sector ha sufrido un desplazamiento (d) en sus meandros de 270 m de longitud aproximadamente, con una dirección que va desde Noreste (NE) hacia el Suroeste (SW), como se muestra en la Figura 4.12.

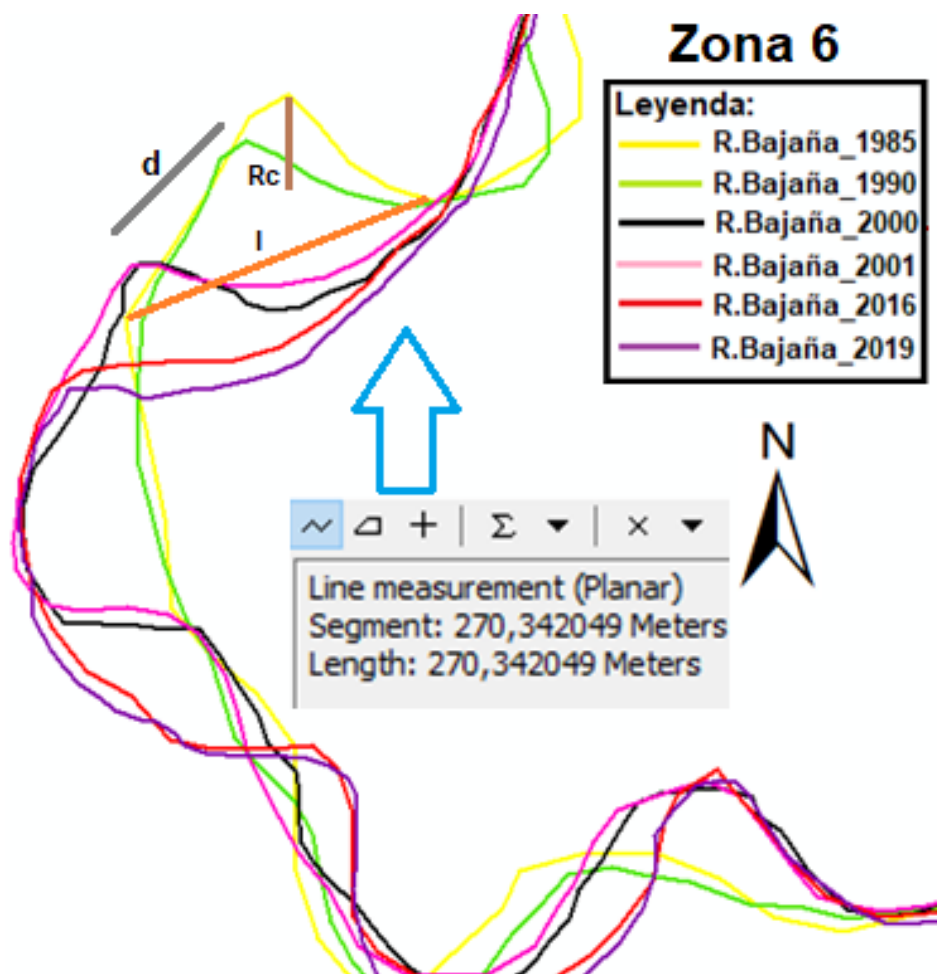


Figura 4.12 Esquema de la zona 6 ampliada con zoom donde hubo mayores cambios en la morfología o dirección de cauce del río Bajaña. Fuente: [Autor]

4.5 Análisis de Resultados Generales para el Río Bajaña.

Las variaciones y desplazamientos de los canales meándricos que se visualizaron en cada una de las 6 subzonas analizadas del río Bajaña (Los Ríos-Ecuador) (ver Figura 4.13) son causadas generalmente por la constante actividad antrópica (construcciones, sembríos u obras civiles) que se origina principalmente al centro y norte de la zona de estudio, ya que en este lugar el tipo de suelo es apto para el sector productivo (agricultura y ganadería) y para el turismo (complejos, parques y áreas recreativas); además de los constantes depósitos sedimentarios que se forman y acumulan en los márgenes o bordes del río, que se los utiliza generalmente como materiales áridos y pétreos en la construcción para la mejora de la infraestructura (puentes, canchas, calles y edificaciones) de la población urbana-rural. Se observa además meandros abandonados, canales abandonados, terrazas indiferenciadas y llanuras de inundación principalmente en los alrededores de la zona 5 del área de estudio, debido a los altos índices de sinuosidad (ver Tabla 4.8) y estanqueidad (ver Tabla 4.9) que se evidencia en este sector a lo largo del período de tiempo analizado (1985-2019) (ver Figura 4.13).

Tabla 4.8 Porcentaje de Sinuosidad (Sr) por año analizado, que se calcularon a lo largo de las 6 subzonas que conforman el área de estudio del río Bajaña. Fuente: [Autor]

Porcentaje de Sinuosidad (Sr)						
t (Año)	1985	1990	2000	2001	2016	2019
Devanado (%)	16.67	16.67	33.33	33.33	16.67	16.67
Anastomosado (%)	33.33	16.67	16.67	33.33	33.33	33.33
Meándrico (%)	50	66.67	50	33.33	50	50
Total (%)	100	100	100	100	100	100

Tabla 4.9 Porcentaje Estanqueidad (Es) por año analizado, que se calcularon a lo largo de las 6 subzonas que conforman el área de estudio del río Bajaña. Fuente: [Autor]

Porcentaje de Estanqueidad (Es)						
t (Año)	1985	1990	2000	2001	2016	2019
Estrecha (%)	16.67	16.67	0	0	0	0
Constante (%)	33.33	50	66.67	83.33	66.67	50
Abierta (%)	50	33.33	33.33	16.67	33.33	50
Total (%)	100	100	100	100	100	100

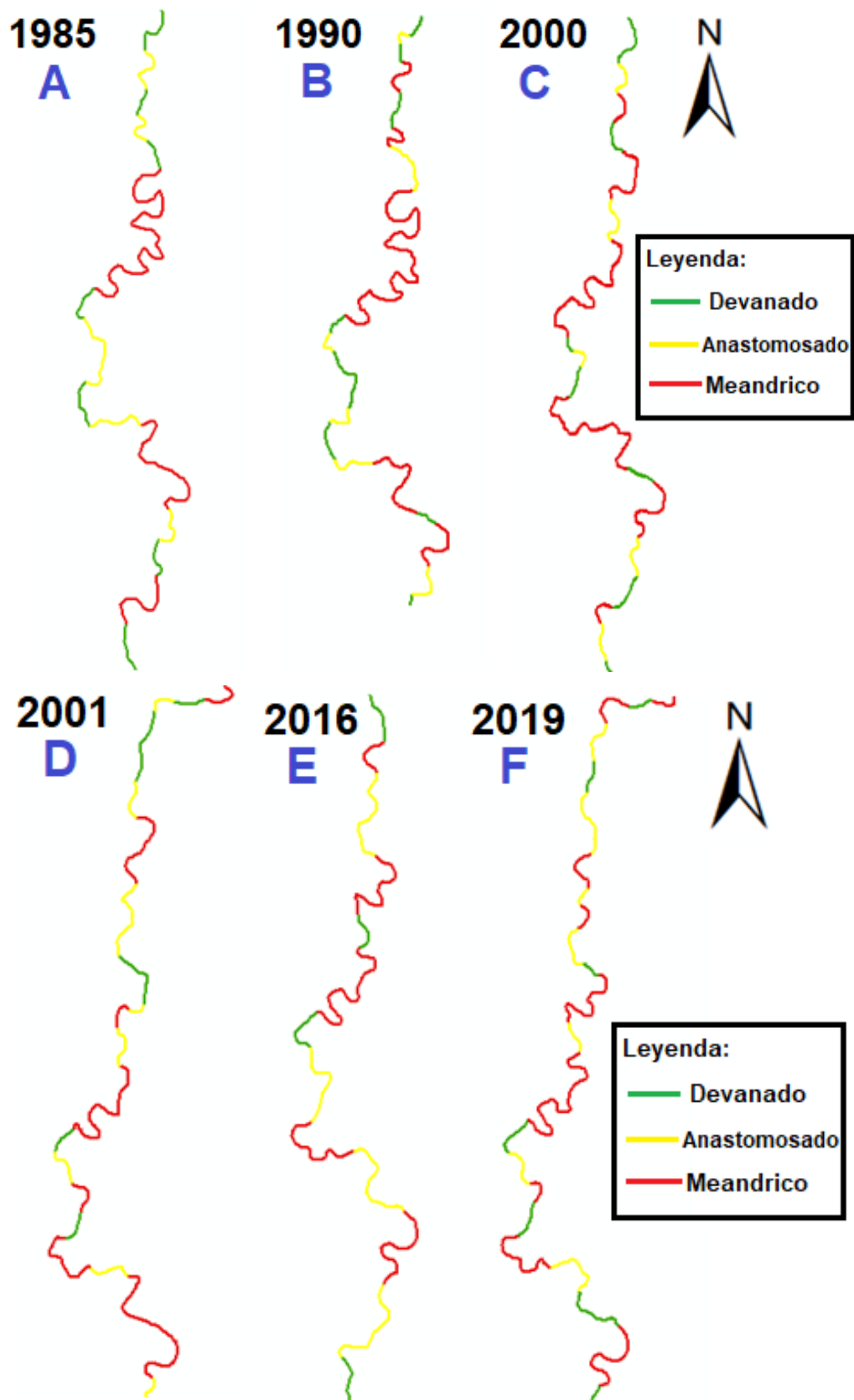


Figura 4.13 Tipos de índice de sinuosidad (S_r) a la que pertenece cada zona del Río Bajaña, a través del período de tiempo en que se realizó el análisis multitemporal. Fuente: [Autor]

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se identificó 6 zonas con importantes variaciones en la forma del río Bajiña, a lo largo de toda la zona de estudio del cantón Buena Fe que podrían estar ligadas a fallas estructurales o fracturas con desplazamientos localizados al norte y centro del área de estudio; y a períodos de altas precipitaciones debido al clima.
- La subcuenca hidrográfica del río Vines por sus parámetros de forma se define como una cuenca exorreica de sexto orden, de etapa madura, con relieve que va de tamaño medio-alto; y es alargada con sus lavabos largos y angostos.
- La subcuenca fluvial del río Vines por sus parámetros de flujo pertenece al área de sedimentación, ya que puede observarse grandes zonas de acumulación de sedimentos, conos de deyección, gargantas, terrazas indiferenciadas, canales abandonados y una gran llanura aluvial de inundación.
- Los mayores cambios en la morfología del río Bajiña se evidencian con más frecuencia en el centro y norte del área de estudio. También estas se desarrollan en zonas altamente pobladas o de gran impacto antropogénico, debido a la alta demanda en el sector productivo (agricultura y ganadería) y turismo (cabañas de Puerto Bajiña) que hay en esta área, además de las obras civiles o de geotecnia, como las construcciones de puentes, edificaciones, calles, parques, canchas, carreteras y complejos turísticos.
- Las variaciones en la morfología del río Bajiña se producen por fenómenos geológicos (deslaves, escorrentías, inundaciones) o de manera natural (altas precipitaciones, cambios climáticos) debido a que este se ubica en un área de transición donde limita la Costa y Sierra ecuatoriana, no obstante, pueden ser alterados por actividades antrópicas afines al desarrollo de la comunidad.
- Los valores de los índices de sinuosidad (S_r) y estanqueidad (E_s) que se obtuvo en las 6 subzonas analizadas del área de estudio en el período de tiempo de 1985 a 2019, indican que el río Bajiña es meándrico en casi toda su trayectoria y en sus bordes o laderas se depositan con mayor frecuencia materiales sedimentarios, por la capacidad que tiene éste en acarrear y transportar sedimentos de otros lugares; generando las terrazas indiferencias, conos de deyección y las grandes llanuras aluviales.

- Respecto a las técnicas de extracción de las masas de agua indiferenciada normalizada se comprobó que el MNDWI proporciona mejores resultados visuales de resolución que el NDWI en áreas urbanas, ya que los colores de los cuerpos o canales de agua se tornan más fuertes e intensos, sin embargo, esta produce información ambigua en ciertas zonas, debido a la constante nubosidad que se evidencia en el sector, por lo que se tuvo que hacer un realce y correcciones manuales dentro del área de estudio.

5.2 Recomendaciones

- El principal impedimento o limitante al momento de la elaboración y ejecución de este proyecto fue la escasa obtención de una base de datos que tengan una muy buena resolución y con el menor valor porcentual posible de nubosidad dentro del área de estudio, por lo que se pide obtener imágenes satelitales de las plataformas de acceso libre con una nubosidad menor al 20%, para así, realizar un correcto análisis de datos y resultados.
- Los índices de agua NDWI y MNDWI pueden ser usados secuencialmente en el software geológico como una herramienta complementaria en la demarcación de los bordes, laderas o márgenes del río (separar, delimitar y diferenciar los cuerpos de agua con la vegetación).
- Se recomienda revisar, comparar y verificar que el número de banda de la imagen satelital pertenezca al respectivo color con el que se debe de trabajar para hacer los cálculos correspondientes de los diferentes índices de extracción de masas de agua normalizada NDWI y MNDWI, debido a que estos suelen cambiar según su número de satélite, ya sea Landsat o Sentinel.
- La demarcación de los canales de agua debe ser corregida para completar su continuidad a lo largo de todo el perímetro, por medio de un registro manual por parte del usuario u operador, debido a la pérdida de información que se puede generar a lo largo del procesamiento de datos y a los errores producto de la ambigüedad y la calidad de imágenes satelitales disponibles en las plataformas de acceso libre (Earth Explorer “USGS” y Copernicus Open Access Hub).

BIBLIOGRAFÍA

Camacho Ramírez Jhon Alexander. (2019). *Propuesta de un circuito turístico en el sector Puerto Bajiña del cantón Buena Fe*.
<https://repositorio.uteq.edu.ec/bitstream/43000/3904/1/T-UTEQ-0029.pdf>

FE, P. D. D. Y. O. T. D. C. B. (2019). *Cantón San Jacinto de Buena Fe*. 17.
http://app.sni.gob.ec/snmlink/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdiagnostico/160001890001_PDyOT Buena Fe_2015-2019_14-11-2014.pdf

Proaño, Gastón. (2013). Informe Geológico y Geomorfológico. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/5885/3/INFORME_GEOLOGICO_Y_GEOMORFOLOGICO_para_DISEÑO.pdf

Aguirre, E., & Vera, L. (2019). *Análisis Multitemporal de Vegetación y camaroneras en las provincias del Guayas y Santa Elena*. November.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12989.82403>

Alarcón, D. (2018). *ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LAS CARACTERÍSTICAS SEDIMENTOLÓGICAS A LO LARGO DEL RÍO GUAYAS, ENTRE LAS COORDENADAS 2°08´ S, 79°49´W Y 2°23´S, 79°54´W. ESPOL*.

Baldock, J. W. (1982). *Geología del Ecuador. Boletín del Mapa Geológico de la República del Ecuador. Dir. Geología y Minas. Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos*.

Castillejo-González, I. L., López-Granados, F., García-Ferrer, A., Peña-Barragán, J. M., Jurado-Expósito, M., de la Orden, M. S., & González-Audicana, M. (2009). *Object- and pixel-based analysis for mapping crops and their agro-environmental associated measures using QuickBird imagery*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68(2), 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.06.004>

- Charlton, R. (2007). *FUNDAMENTALS OF FLUVIAL GEOMORPHOLOGY*.
- Clirsen, S., Sigagro, M., Colorados, S. D. D. L., Microcuencas, N., Alfaro, F., Ra, G., Vines, S. R., Ibarra, V., Daule, S. R., Babahoyo, S. R., Montalvo, J., Salitre, E., Baquerizo, A., Jujan, M., & Antonio, G. (2009). Cuenca río guayas. *Subcuencas y Microcuencas Del Guayas*, 2009. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/15499/1/T-UCE-0012-FIG-005.pdf>
- 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). 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)
- Knox, J. C. (2006). Floodplain sedimentation in the Upper Mississippi Valley: Natural versus human accelerated. *Geomorphology*, 79(3–4), 286–310. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.031>
- 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.
- Magesh, N. S., Jitheshlal, K. V., Chandrasekar, N., & Jini, K. V. (2013). Geographical information system-based morphometric analysis of Bharathapuzha river basin, Kerala, India. *Applied Water Science*, 3(2), 467–477. <https://doi.org/10.1007/s13201-013-0095-0>
- 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-2019-0007>
- 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.

Wohl, E. (2014). Time and the rivers flowing: Fluvial geomorphology since 1960. In *Geomorphology* (Vol. 216, pp. 263–282). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.012>

Dumont, J., Santana, E., Soledispa, B., & King, A. (2007). *El Islote El Palmar, resultado de una evolución a largo plazo de la distribución del drenaje entre los Ríos Daule y Babahoyo en la Cuenca del Guayas*. January 2007.

Faustino, J., & Jimenez, F. (2000). *Manejo De Cuencas Hidrograficas* (p. 35).

Foody, G. M. (2002). *Status of land cover classification accuracy assessment. Remote Sensing of Environment*, 80(1), 185–201. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00295-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4)

Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., & Besteiro, S. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. In Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas*. <https://doi.org/10.35537/10915/27877>

Glantz, M. (1998). *Corrientes de cambio: el impacto de El Niño sobre el clima y la sociedad (No. 551.6 G545)*.

Goudie, A. S. (2006). *Global warming and fluvial geomorphology. Geomorphology*, 79(3–4), 384–394. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.023>

Harden, C. P. (2006). *Human impacts on headwater fluvial systems in the northern and central Andes. Geomorphology*, 79(3–4), 249–263. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.021>

Horton, R. E. (1932a). *Drainage-Basin characteristics*. TRANSACTIONS, AMERICAN GEOPHYSICAL UNION, 13(I), 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.

IGM. (1979a). 62.- *Hoja geológica Valencia, escala 1 100.000.pdf*. IGM. (1979b). 67.- *Hoja geológica El Empalme - escala 1 100.000.pdf*. INAMHI. (2012). *Cuencas Hidrográficas del Ecuador*. 2012.

James, L. A., & Marcus, W. A. (2006). *The human role in changing fluvial systems: Retrospect, inventory, and prospect*. *Geomorphology*, 79(3–4), 152–171. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.017>

Kumar, P., Rajeev, R., Chandel, S., Narayan, V., & Prafull, M. (2018). *Hydrological inferences through morphometric analysis of lower Kosi river basin of India for water resource management based on remote sensing data*. *Applied Water Science*, 8(1), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0660-7>

Llena, M., Vericat, D., & Martínez-Casasnovas, J. A. (2016). *Cambios geomorfológicos en el Alto Cinca (periodo 1927-2014)*.

López, F., & Romero, M. (1987). *Morfometría de redes fluviales: revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al alto Guadalquivir*. *Papeles de Geografía*, 12, 47–62.

Lu, S., Wu, B., Yan, N., & Wang, H. (2011). *Water body mapping method with HJ-1A / B satellite imagery*. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 13(3), 428–434. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.09.006>

Magesh, N. S., Jitheshlal, K. V., Chandrasekar, N., & Jini, K. V. (2013). *Geographical information system-based morphometric analysis of Bharathapuzha river basin, Kerala, India*. *Applied Water Science*, 3(2), 467–477. <https://doi.org/10.1007/s13201-013-0095-0>

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>

Medina, M. B. (2015). *Análisis Multitemporal Del Cambio De La Cobertura Vegetal*. Universidad Central del Ecuador.

Monegaglia, F., Zolezzi, G., Güneralp, I., Henshaw, A. J., & Tubino, M. (2018). *Automated extraction of meandering river morphodynamics from multitemporal remotely sensed data*. *Environmental Modelling and Software*, 105, 171–186. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.03.028>

MSP, & OPM. (2016). *El Fenómeno El Niño en Ecuador*. Naciones Unidas, Consejo Económico y Social Comisión Económica Para América Latina CEPAL, 1–58. <https://www.eird.org/estrategias/pdf/spa/doc12863/doc12863-10.pdf>

Nocquet, J. M., Mothes, P., & Alvarado, A. (2009). *Geodésia, geodinámica y ciclo sísmico en Ecuador*. *Geología y Geofísica Marina y Terrestre Del Ecuador, Spec. Pub.* (December 2014), 83–95. http://renag.unice.fr/regal/PERSO/JMN/publis/geodesia_ecuador_texto_y_figuras.pdf

Ouma, Y. O., & Tateishi, R. (2006). *A water index for rapid mapping of shoreline changes of five East African Rift Valley lakes: an empirical analysis using Landsat TM and ETM + data. International Journal of Remote Sensing*, 27(November 2012), 3153–3181. <https://doi.org/10.1080/01431160500309934>

Perez, C., & Muñoz, A. (2006). *Teledetección: Nociones y Aplicaciones*.

Proaño, G. (2006). *INFORME GEOLÓGICO PARA EL DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN DEL PUENTE CAMARONES UBICADO SOBRE EL RIO QUEVEDO EN LA VIA FUMISA – LOS VERGELES*.

Rai, P. K., Singh, P., Mishra, V. N., Singh, A., Sajan, B., & Shahi, A. P. (2020).

Reynaud, C., Jaillard, É., Lapierre, H., Mamberti, M., & Mascle, G. H. (1999). *Oceanic plateau and island arcs of southwestern Ecuador: Their place in the geodynamic evolution of northwestern South America. Tectonophysics*, 307(3–4), 235–254. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00099-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00099-2)

Rosero, M. (2017). *Análisis Multitemporal del Uso del Suelo y Cobertura Vegetal de la Cuenca del Río Tahuando y Proyección de Cambios al Año 2031, en el Cantón Ibarra, Provincia de Imbabura*. 98.

Rudraiah, M., Govindaiah, S., & Vittala, S. S. (2008). *Delineation of potential groundwater zones in the Kagna river basin of Gulburga district, Karnataka, India using remote sensing and GIS techniques. Mausam*, 59(4), 497–502.

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, J. M. (1998). *El análisis morfológico de las cuencas fluviales aplicado al estudio hidrográfico*. Norba. *Revista de Geografía.*, 10, 155–183.

SENPLADES. (2012). *MEMORIA TÉCNICA CANTÓN MOCACHE PROYECTO: “GENERACIÓN DE GEOINFORMACIÓN PARA LA GESTIÓN GEOMORFOLOGÍA.*

Sobrino, J. (2001). *Teledetección (U. de Valencia. (ed.)).*

Spada, D., Molinari, P., Bertoldi, W., Vitti, A., & Zolezzi, G. (2018). *Multi-temporal image analysis for fluvial morphological characterization with application to Albanian rivers. ISPRS International Journal of Geo-Information, 7(8).*
<https://doi.org/10.3390/ijgi7080314>

Strahler, A. N. (1952). *HYPOMETRIC (AREA-ALTITUDE) ANALYSIS OP EROSIONAL TOPOGRPHY.* Geological Society of America Bulletin, 11.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63)

Strahler, A. N. (1964). *Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In Chow VT (Ed) Handbook of Applied Hydrology. McGraw Hill Book Compan.*

Tapia, J. C. (2012). *Modelización Hidrológica de un área experimental en la cuenca del Río Guayas en la producción de caudales y sedimentos.* Universidad Nacional de La Plata.

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>

Trenkamp, R., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T., & Mora, H. P. (2002). *Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations.* *Journal of South American Earth Sciences, 15(2), 157– 171.*
[https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(02\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00018-4)

Wohl, E. (2014). *Time and the rivers flowing: Fluvial geomorphology since 1960*.

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.

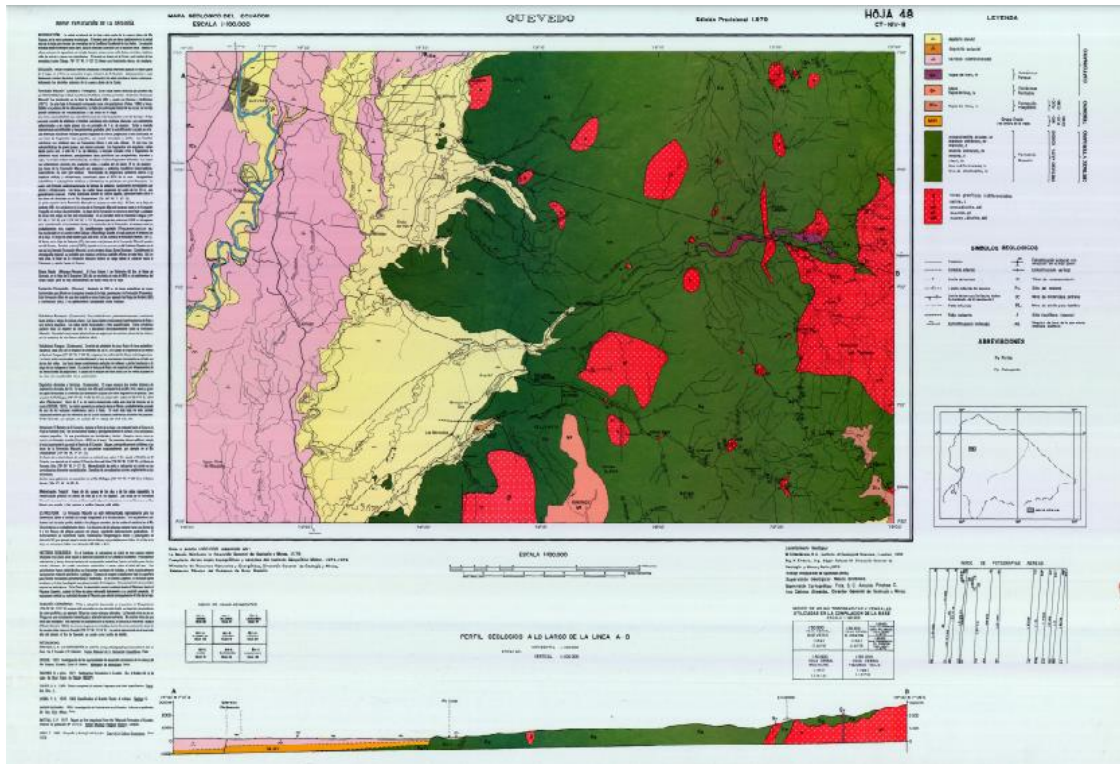
Chuvieco, E. (23 de Abril de 1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Recuperado el 18 de octubre de 2019, de Ediciones RIALP: <http://pdfhumanidades.com/sites/default/files/apuntes/FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO.pdf>

CONSCRIPTO BERNARDI. (19 de septiembre de 2009). *Tededetección*. Recuperado el 18 de octubre de 2019, de Rodrigo Geógrafo: http://www.essa.ara.mil.ar/cens/MATERIAS%20TERCER%20A%C3%91O/3%C2%B0%20A%C3%91O/09-TELEDETECCION/PRIMER%20CUATRIMESTRE/PRIMER%20CUATRIMESTRE.pdf?fbclid=IwAR1YaNIATSS_RQXlu74MlebAxCLmbXe4i5AgtG2IMX3-hPytET5-FPluFB8

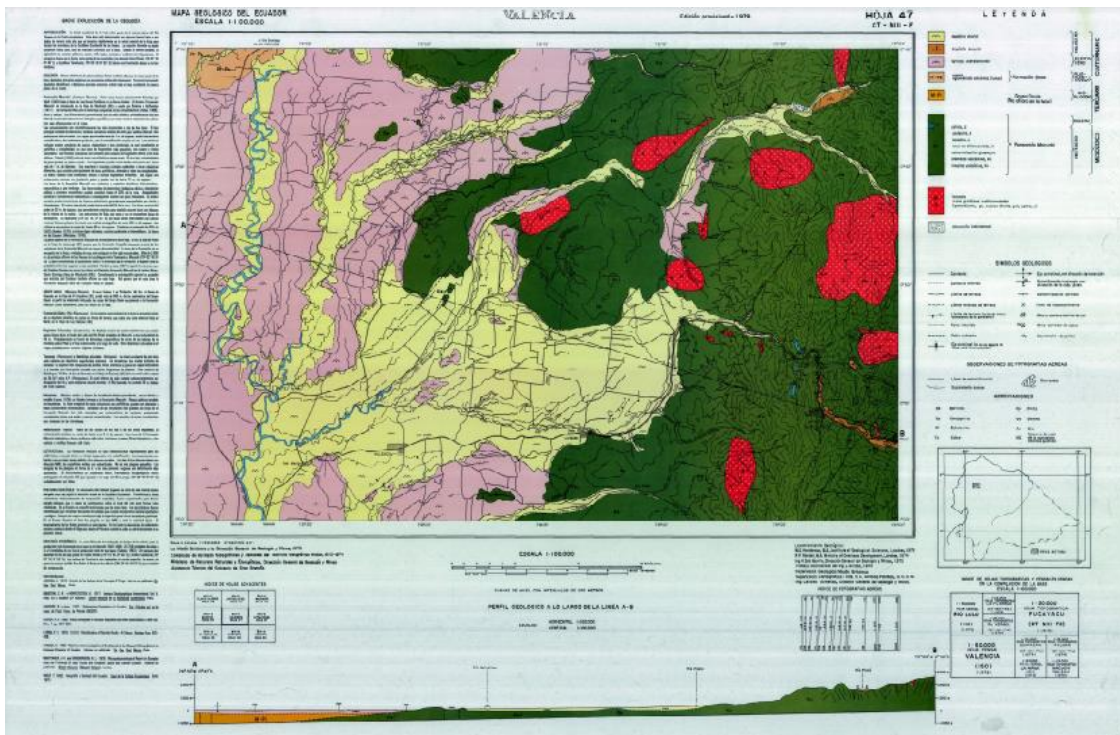
FERNANDEZ, R. I. (19 de junio de 2015). *Generalidades de la Teledetección*. Recuperado el 18 de octubre de 2019, de Normativa Internacional: https://profesoresdegeografia.files.wordpress.com/2015/06/chuvieco.pdf?fbclid=IwAR23k_GpvQD04tqEzWEPY58Zt5Fq_2-HIXaeK_ziKwWOEdCXbU5KIhIU5Uo

R.W, S. (15 de julio de 1996). *The United Nations Principle of Non-Discriminatory Data Access*. Recuperado el 18 de octubre de 2019, de University of North Dakota: <http://www.space.edu/Library/Research/remote.html>

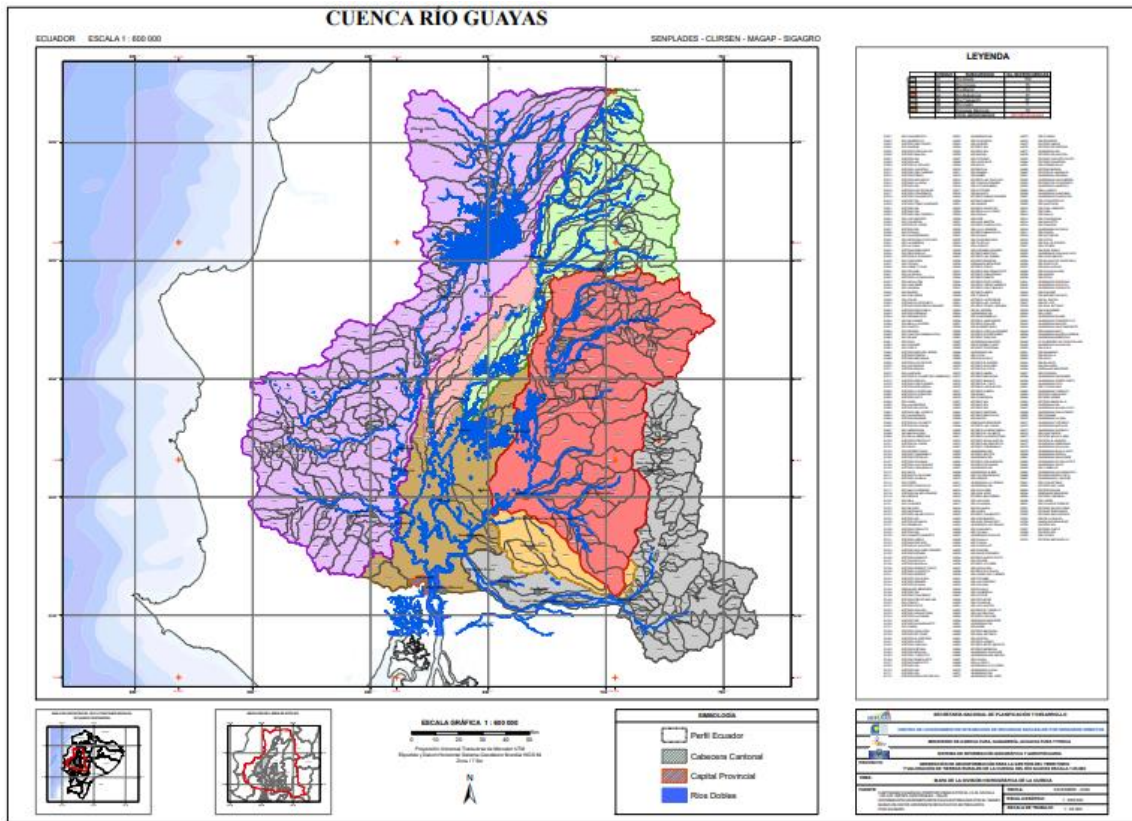
ANEXOS



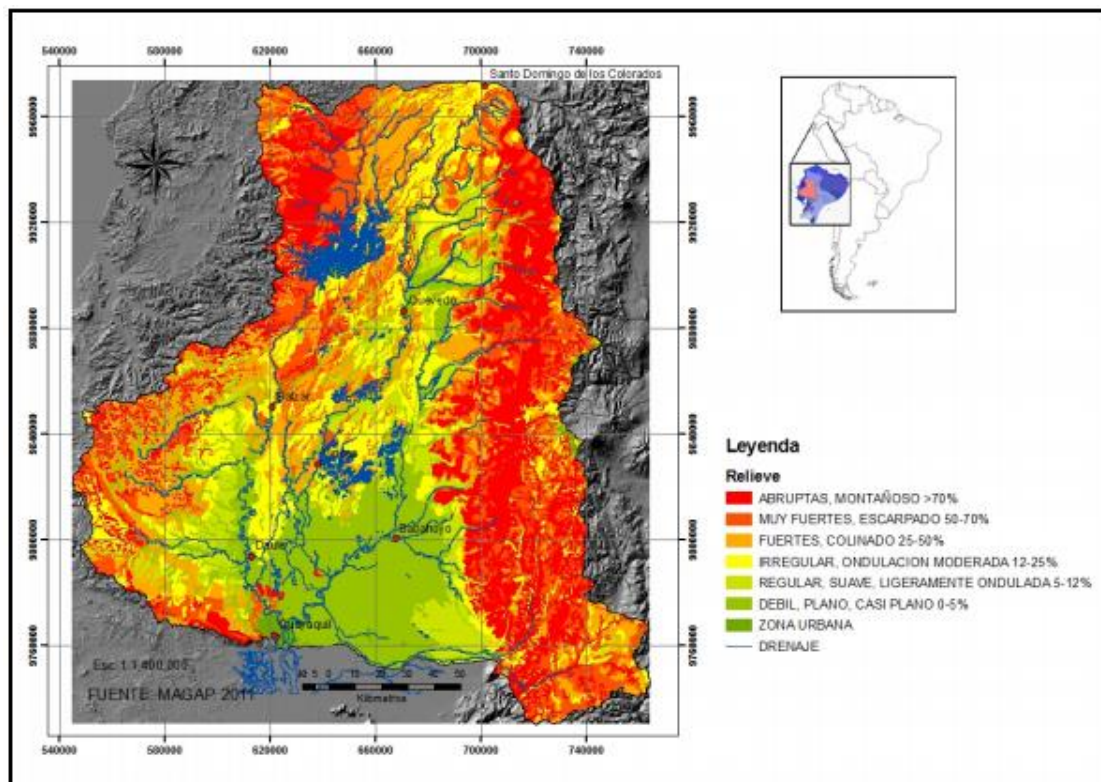
Mapa 1. Hoja Geológica #48 de Quevedo (1:100000). Fuente: (IGM, 2016)



Mapa 2. Hoja Geológica #47 de Valencia (1:100000). Fuente: (IGM, 2016)



Mapa 3. Mapa de la Cuenca Hidrográfica del río Guayas con sus respectivas subcuencas y microcuencas (1:600000). Fuente: (SENPLADES, 2009)



Mapa 4. Mapa de relieve de la Cuenca del río Guayas (1:400000). Fuente: (ESPOL, 2000)

