

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

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

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Geología

Presentado por:

MARLON JOEL MUÑOZ RAMÍREZ

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

Dedico este trabajo en especial a nuestro Señor pues es Él quien nos brinda los dones que nos permiten desarrollarnos profesionalmente. A mi madre, Nina por darme la oportunidad de vivir, me has dado la mayor muestra de amor. A mi padre, Fabián por apoyarme y brindarme su más sincero cariño desde el primer día. A mi hermano Mateo, llegaste para cambiar nuestras vidas y llenarnos de alegría. A mis familiares, en especial mi abuelita María y tío Wilmer, quienes con sus consejos y ejemplo de vida me han ayudado a superar las adversidades. A mi Day, que también es la dulzura de mis días, caminar y soñar junto a ti es solo el inicio de nuestra historia.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo académico de este proyecto de titulación no es un logro individual, más bien, es consecuencia del trabajo y apoyo de muchas personas quienes han aportado en gran medida al alcance de este objetivo. A mis padres y hermano gracias por apoyarme en este difícil proceso, su amor y comprensión son y serán la base de mi vida.

A los profesores que contribuyeron en mi formación académica, pero en especial a aquellos que con sus consejos aportaron a mejorar mi vida

A mi tutor, MSc. David, gracias por sus consejos y paciencia en el desarrollo de este proyecto.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Marlon Joel Muñoz Ramírez y doy mi 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"



Marlon Joel Muñoz
Ramírez

EVALUADORES

.....
MSc. David Altamirano

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
MSc. David Altamirano

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La geomorfología fluvial es una rama importante de la geología que permite comprender el comportamiento de los ríos y el impacto que generan en su entorno, sirviendo como una herramienta inicial para el correcto desarrollo de estrategias en planificación territorial. Para el desarrollo de este proyecto se utilizaron imágenes satelitales obtenidas a partir de los satélites Landsat 5, Landsat 7 y Sentinel 2 respectivamente. Los cuerpos de agua fueron extraídos utilizando dos índices, el NDWI propuesto por Mcfeeters (1996) y MNDWI desarrollado por Xu (2006); en ambos casos resultó necesario completar manualmente los datos generados por estos dos métodos. El análisis multitemporal consistió en analizar los cambios en la morfología del río Quevedo en los distintos intervalos de tiempo, para esto se determinaron 4 zonas con importantes variaciones ubicadas al Noreste de la zona de estudio en las que se observaron importantes desplazamientos de canales y meandros con dirección Suroeste, además se calcularon parámetros morfológicos como radio de curvatura e índice de Sinuosidad. En base a este último parámetro se elaboraron mapas del río Quevedo siguiendo la clasificación propuesta por Tiwari (2016). La información recopilada en el desarrollo de este proyecto apoya los lineamientos asociados al cuaternario propuestos por Dumont (2007) y aporta valiosa información para una actualización del mapa geomorfológico del río Quevedo.

Palabras Clave: Análisis multitemporal, Geomorfología fluvial, Landsat, MNDWI, NDWI, Sentinel

ABSTRACT

Fluvial geomorphology is an important branch of geology that allows to understand the river's pattern and their impact generated on the environment, serving as an initial tool for land use strategies. In this project, satellite images were obtained from Landsat 5, Landsat 7 and Sentinel 2. Water bodies were extracted using two indices, the NDWI proposed by Mcfeeters (1996) and the MNDWI developed by Xu (2006); in both cases, it was necessary to manually complete the data generated by these two methods. The multitemporal analysis consisted of analyzing changes in Quevedo's river morphology at different times. Four zones with important variations were located to the Northeast of the study area. Displacements of channels and meanders with Southwest direction, in addition morphological parameters such as radius of curvature and sinuosity index were calculated. Based on this last parameter, Quevedo's River maps were elaborated following the classification proposed by Tiwari (2016). The information collected in the development of this project supports the quaternary guidelines proposed by Dumont (2007) and provides valuable information for an update to the geomorphological map of Quevedo's River.

Keywords: Fluvial Geomorphology, Landsat, NDWI, MNDWI, Multitemporal Analysis, Sentinel

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ABREVIATURAS	VII
SIMBOLOGÍA.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XIII
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	2
1.4 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	3
1.5 OBJETIVOS.....	4
1.5.1 Objetivo General	4
1.5.2 Objetivos Específicos.....	4
1.6 MARCO GEOLÓGICO	4
1.6.1 Geología Regional	4
1.6.2 Geología Local.....	7

1.6.3 Geomorfología	8
1.7 HIDROLOGÍA	8
1.8 CLIMA.....	10
CAPÍTULO 2.....	11
MARCO CONCEPTUAL	11
2.1 GEOMORFOLOGÍA.....	11
2.1.1 Geomorfología Fluvial	11
2.1.2 Drenajes	11
2.1.3 Ríos	12
2.1.4 Parámetros geomorfológicos asociados a un río meándrico.	12
2.1.5 Cuenca Hidrográfica	13
2.1.6 Clasificación de cuencas hidrográficas	14
2.1.7 Parámetros geomorfológicos asociados a una cuenca hidrográfica	15
2.2 TELEDETECCIÓN.....	21
2.2.1 Elementos de un sistema de Teledetección	22
2.2.2 Resoluciones	23
2.2.3 Programas de Teledetección espacial	23
2.2.3 Aplicaciones de la Teledetección	24
2.2.4 Identificación de masas de aguas	25
CAPÍTULO 3.....	30
DESARROLLO METODOLÓGICO	30

3.1 ADQUISICIÓN DE DATOS	30
3.1.1 Imágenes Satelitales.....	30
3.1.2 Mapas Geológicos	31
3.1.3 Formatos shapefile (SHP).....	31
3.2 METODOLOGÍA	31
3.2.1 ANÁLISIS MULTITEMPORAL.....	32
3.2.2 PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS.....	36
CAPÍTULO 4.....	38
RESULTADOS.....	38
4.1 PARÁMETROS ASOCIADOS A LA CUENCA	38
4.2 PARÁMETROS ASOCIADOS AL RÍO QUEVEDO.....	41
4.2.1 ZONA 1.....	41
4.2.2 ZONA 2.....	43
4.2.3 ZONA 3.....	45
4.2.4 ZONA 4.....	47
4.2.5 SINUOSIDAD DEL RÍO QUEVEDO.....	49
CAPÍTULO 5.....	51
ANÁLISIS DE RESULTADOS	51
5.1 PARÁMETROS ASOCIADOS A LA CUENCA	51
5.2 PARÁMETROS ASOCIADOS AL RÍO QUEVEDO.....	51
Lineamientos del cuaternario	51

Los grandes aportes de fluido al caudal del río Quevedo.....	52
Acción Antrópica.....	52
CAPÍTULO 6.....	54
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	54
6.1 CONCLUSIONES.....	54
6.2 RECOMENDACIONES.....	54

ABREVIATURAS

AWEI:	Automated Water Extraction Index
GIS:	Geographical Information System
IGM:	Instituto Geográfico Militar
INAMHI:	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
INEC:	Instituto Nacional de Estadística y Censos
MIR:	Medium Infra-Red
MNDWI:	Modified Normalized Difference Water Index
MSP:	Ministerio de Salud Pública
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
TCW:	Tasselled Cap Wetness
USGS:	United States Geological Survey
WI:	Water Index

SIMBOLOGÍA

D _d :	Densidad de drenaje
E	Este
F _f :	Factor de forma
F _s :	Frecuencia de flujo
km:	Kilómetros
L _g :	Longitud de flujo terrestre
L _u :	Longitud del flujo
L _{sm} :	Longitud media del flujo
m:	Metros
N:	Norte
N _u :	Número de flujo
O:	Oeste
R:	Relieve
R _b :	Relación de bifurcación
R _{bm} :	Relación media de bifurcación
R _c :	Radio de curvatura
R _{ci} :	Relación de circularidad
R _e :	Relación de alargamiento
R _L :	Relación de longitud del flujo
R _r :	Relación de relieve
S:	Sur
SI:	Índice de Sinuosidad
T:	Textura de drenaje
U:	Orden del flujo

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación de la zona de estudio. [Autor]	3
Figura 1.2 Evolución de la costa ecuatoriana desde el cretácico tardío hasta el mioceno. [Jaillard et al., 1995]	5
Figura 1.3 Esquema de las redes de drenaje y las estructuras cuaternarias de la cuenca del río Guayas. [Dumont, 2007].....	6
Figura 1.4 Cuenca del Guayas y sus principales afluentes. [Rossel et al., 1996]	9
Figura 2.1 Clasificación morfológica de las redes de drenaje. [Gregory & Walling, 1973]	11
Figura 2.2. Estimación del Radio de curvatura en un río. [Charlton, 2007]	12
Figura 2.3 Esquema de un sistema fluvial idealizado, en el que se identifica la zona de producción, transferencia y de sedimentación. [Schumm, 1997]	14
Figura 2.4. Variación de la curva hipsométrica en función de la edad del río. [Ibáñez et al., 2010]	21
Figura 2. 5 Componentes de un sistema de teledetección. [Chuvienco, 2008].....	22
Figura 2.6 Esquema de métodos para la extracción de masas de agua. [Autor]	25
Figura 3.1 Esquema de la metodología utilizada para obtener la morfología del Río Quevedo. [Autor]	32
Figura 3.2 Imágenes satelitales utilizadas En el presente estudio. La imagen A se obtuvo en el año 1986 a partir del satélite Landsat 5. La imagen B se obtuvo en el año 2000 a partir del satélite Landsat 7. La imagen C se obtuvo en el año 2019 a partir del satélite Sentinel 2. [Autor].....	33
Figura 3.3 Aplicación de los índices de extracción NDVI, NDWI y MNDWI. En ambos casos, NDWI y MNDWI, se obtuvieron mejores resultados en comparación al NDVI. [Autor]	34

Figura 3.4 Aplicación de NDWI y MNDWI a las imágenes satelitales. La imagen A presenta la información proporcionada por el satélite. La imagen B muestra el resultado de aplicar NDWI en la zona de interés. La imagen C muestra el resultado de la aplicación del MNDWI al área de estudio. En ambos casos B y C se muestra información referente a los píxeles con características de Agua y No Agua. [Autor].....	35
Figura 3.5 Corrección, delimitación y depuración de los datos obtenidos al aplicar MNDWI. Se ha eliminado manualmente la información relacionada a la nubosidad del sector y cuerpos de agua ajenos al cauce principal del río Quevedo. [Autor]	35
Figura 3.6. Curva Hipsométrica de la cuenca del río Quevedo. [Solano & Vintimilla, 2013]	37
Figura 4.1 Esquema general del río Quevedo en los años 1986, 2000 y 2019. [Autor] 40	
Figura 4.2 Variación de la morfología del río Quevedo en el intervalo de tiempo 1986 - 2019 en la zona 1. [Autor]	41
Figura 4.3 Radio de circularidad en la zona 1 durante los años 1986, 2000 y 2019. [Autor]	42
Figura 4.4. Variación de SI y Rc en las secciones L1, L2, L3, L4 desde 1986-2019 en la Zona 1. [Autor]	43
Figura 4.5 Variación de la morfología del río Quevedo en el intervalo de tiempo 1986 - 2019 en la zona 2.....	43
Figura 4.6 Radio de curvatura en la zona 2 durante los años 1986, 2000 y 2019. [Autor]	44
Figura 4.7 Variación de SI y Rc en las secciones L1, L2, L3, L4 desde 1986-2019 en la Zona 2. [Autor]	45
Figura 4.8 Variación de la morfología del río Quevedo en el intervalo de tiempo 1986 - 2019 en la zona 3. [Autor]	45
Figura 4.9 Radio de circularidad en la zona 3 durante los años 1986, 2000 y 2019. [Autor]	46

Figura 4.10 Variación de SI y Rc en las secciones L1, L2, L3, L4 desde 1986-2019 en la Zona 3. [Autor]	47
Figura 4.11 Variación de la morfología del río Quevedo en el intervalo de tiempo 1986 - 2019 en la zona 4. [Autor]	47
Figura 4.12 Radio de circularidad en la zona 3 durante los años 1986, 2000 y 2019. [Autor]	48
Figura 4. 13 Variación de SI y Rc en las secciones L1, L2, L3, L4 desde 1986-2019 en la Zona 4. [Autor]	49
Figura 4.14 Índices de sinuosidad estimados para las 4 zonas de estudio propuestas. [Autor]	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de los ríos en base a su Índice de Sinuosidad. [Tiwari et al., 2016]	13
Tabla 2.2 Clasificación de cuencas según su tamaño. [Faustino & Jiménez, 2000]	15
Tabla 3.1 Descripción de las características correspondientes a las imágenes satelitales obtenidas de Landsat y Sentinel. [Autor]	31
Tabla 3.2 Parámetros geomorfológicos calculados para la cuenca del río Quevedo.[Autor]	36
Tabla 4.1 Parámetros geomorfológicos calculados para la cuenca del río Quevedo I, utilizando SIG. [Autor]	38
Tabla 4. 2. Parámetros morfológicos de la cuenca del río Quevedo II. [Autor]	39
Tabla 4.3 Radios de curvatura e índices de sinuosidad para la Zona 1 en los años 1986, 2000 y 2019. [Autor]	42
Tabla 4.4 Radios de curvatura e índices de sinuosidad para la Zona 2 en los años 1986, 2000 y 2019. [Autor]	44
Tabla 4.5 Radios de circularidad e índices de sinuosidad para la Zona 2 en los años 1986, 2000 y 2019. [Autor]	46
Tabla 4.6 Radios de circularidad e índices de sinuosidad para la Zona 2 en los años 1986, 2000 y 2019. [Autor]	48
Tabla 4. 7 Rangos de índices de sinuosidad estimados para las 4 zonas analizadas del río Quevedo en el intervalo de tiempo 1986-2000-2019. [Autor].....	49

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ec. 2.1.....	13
Ec. 2.2.....	16
Ec. 2.3.....	17
Ec. 2.4.....	17
Ec. 2.5.....	17
Ec. 2.6.....	18
Ec. 2.7.....	18
Ec. 2.8.....	18
Ec. 2.9.....	18
Ec. 2.10.....	19
Ec. 2.11.....	19
Ec. 2.12.....	19
Ec. 2.13.....	20
Ec. 2.14.....	20
Ec. 2.15.....	20
Ec. 2.16.....	21
Ec. 2.17.....	26
Ec. 2.18.....	27
Ec. 2.19.....	27
Ec. 2.20.....	28

Ec. 2.21.....28

Ec. 2.22.....28

Ec. 2.23.....29

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La geomorfología fluvial es una disciplina que estudia y analiza las formas fluviales resultantes de los procesos erosivos, de transporte y sedimentación, entendidos todos estos como procesos fluviales (Ollero, 2008). Es fundamental en la comprensión y manejo de los ríos para así lograr el desarrollo de estrategias que contribuyan al desarrollo sostenible de la sociedad (Wohl, 2014).

Los ríos son sistemas complejos y dinámicos en el tiempo y espacio; sus características morfológicas están determinadas por el transporte de agua y sedimentos y pueden ser alteradas por procesos naturales asociados a fenómenos climáticos, como las crecidas debido a intensas precipitaciones (Llena et al., 2016), y procesos antrópicos relacionados al calentamiento global, asentamientos humanos cercanos a las cabeceras de los canales, construcción de represas e hidroeléctricas, extracción de agua para la irrigación en la agricultura, entre otros (Goudie, 2006; Harden, 2006).

Tradicionalmente la evolución de los ríos han sido estudiados a través de modelos analíticos (Ikeda et al., 1981; Seminara, 2006), datos de campo (Hooke & Yorke, 2011), y modelos numéricos (Eke et al., 2014), sin embargo, los avances tecnológicos y la disponibilidad de imágenes satelitales han hecho posible su extracción y estudio, incluso de manera automática (RiMARS y PyRIS) utilizando datos de sensores remotos (Monegaglia et al., 2018; Shahrood et al., 2020).

En este ámbito, las imágenes satelitales han sido utilizadas para investigar y determinar procesos fluviales y cambios morfológicos en ríos de Asia (Sarma, 2005; Zhang et al., 2015), conocer el efecto de las inundaciones en la morfología de los ríos y sus bancos de arenas (Wang et al., 2018; Yousefi et al., 2018), estimar parámetros de sinuosidad y tasas de migración de canales (Pal & Pani, 2019).

En Ecuador los estudios a partir de imágenes satelitales, han sido enfocados principalmente en determinar el uso y cobertura vegetal del suelo (Aguirre & Vera, 2019; Medina, 2015; Rosero, 2017) y estimar el crecimiento urbano de las ciudades (Mejía, 2018; Pazmiño, 2016). En cambio, el uso de imágenes satelitales para el estudio de los sistemas fluviales ha sido enfocados principalmente en la parte baja de la cuenca del río Guayas (J.-F. Dumont et al., 2010; J. Dumont et al., 2007; Muñoz & Guaranda, 2008; Sánchez et al., 2020.)

Los ríos son agentes erosivos que ,a través de procesos de drenaje, erosión y transporte de sedimentos, modifican transforman y modelan el paisaje a través del tiempo (Munro, 2010). En este sentido el análisis multitemporal del río Quevedo se considera una importante herramienta inicial para la planificación territorial, puesto que expone las zonas con mayor variación en su cauce.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La problemática por tratar es la variación del cauce del río Quevedo y cómo ésta afecta su entorno y al desarrollo socioeconómico de la población. Dicha variación genera zonas de acumulación y erosión de sedimentos, abandono de canales-meandros y un continuo cambio en la forma del río que afecta de manera directa al sector primario e indirecta al secundario y terciario.

El comportamiento del cauce del río está relacionado con factores geográficos, geológicos, geomorfológicos y climáticos, además, se ve agravada por las actividades antrópicas como la extracción no controlada y supervisada de los recursos destinados a obras civiles.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El presente proyecto analiza la geomorfología fluvial a lo largo del río Quevedo a través de un análisis multitemporal de imágenes satelitales, identificando las zonas que presentan mayores cambios morfológicos.

Estás áreas identificadas pueden servir de insumo a las entidades municipales y provinciales para que desarrollen distintas actividades de prevención. Consiste en una herramienta inicial que podrá ser utilizada para la planificación territorial.

1.4 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El río Quevedo es un importante sistema fluvial del Ecuador ubicado entre las provincias de Guayas, Los Ríos y Pichincha. Atraviesa los cantones de Quevedo, Mocache, Valencia y Palenque (Ver Figura 1.1).

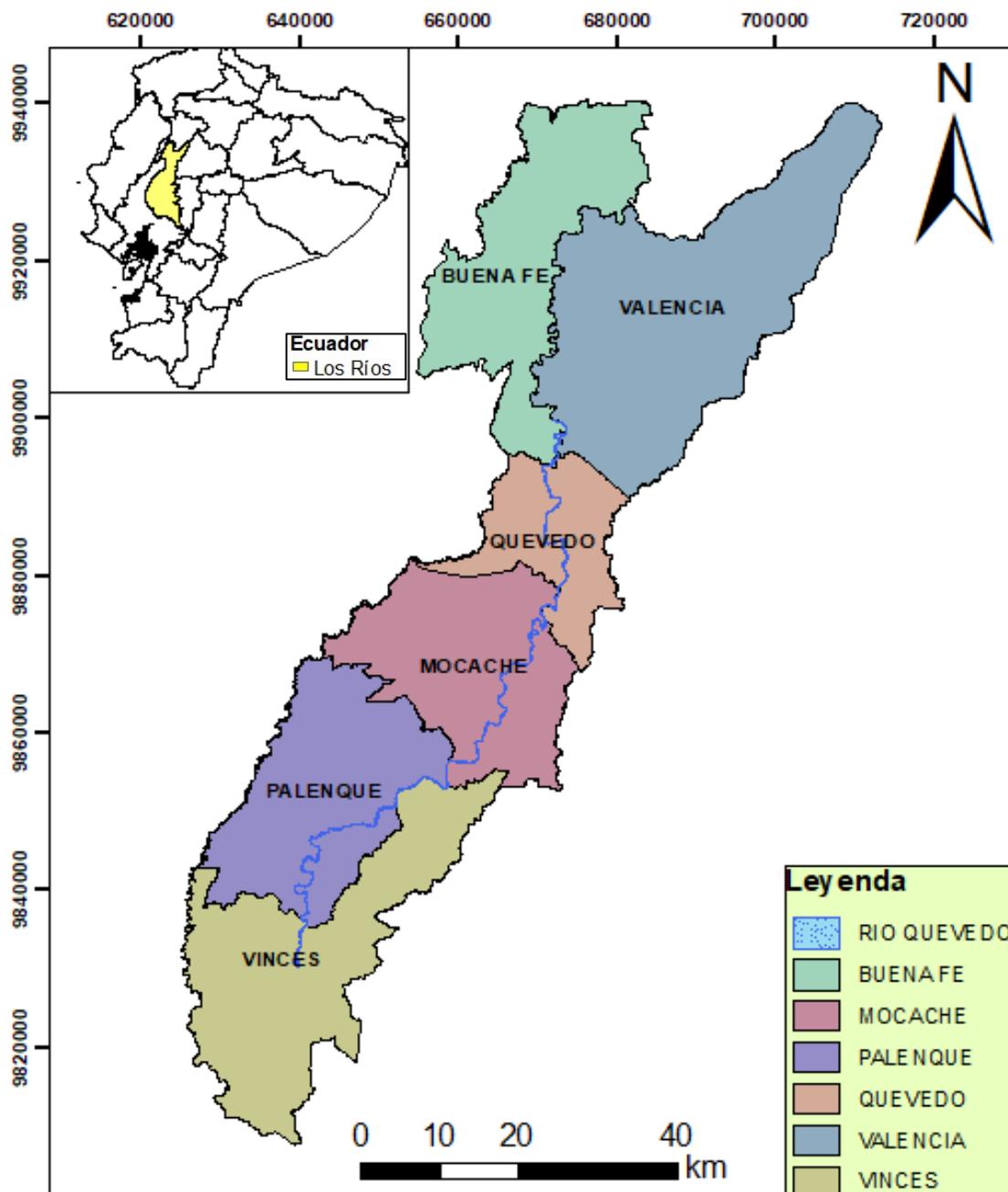


Figura 1.1 Ubicación de la zona de estudio. [Autor]

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

Analizar los cambios geomorfológicos del río Quevedo, mediante análisis multitemporal de imágenes satelitales (1985 - 2019) como una herramienta inicial para la planificación y ordenamiento territorial.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Categorizar los cambios a través del tiempo de la morfología del río Quevedo mediante el uso de sistemas de información geográfica.
- Determinar parámetros morfológicos asociados a los grandes cambios en la morfología del río.
- Elaborar el mapa geomorfológico del río Quevedo.

1.6 MARCO GEOLÓGICO

1.6.1 Geología Regional

Ecuador continental se encuentra localizado en un margen convergente de dos placas tectónicas. La placa de Nazca se subduce por debajo de la placa continental sudamericana con una velocidad promedio de 54 mm/año según Collot et al. (2009), mientras que Nocquet et al. (2009) propone una velocidad de 55-58 mm/año. Además, en la placa sudamericana, se produce un movimiento con dirección noreste a través del sistema dextral mayor (Winter et al., 1993) con una velocidad aproximada de 6mm/año (Trenkamp et al., 2002).

La región costa es una de las tres provincias fisiográficas propuestas por Feininger & Bristow, (1980). El basamento, está conformado por terrenos oceánicos acrecionados, que a su vez está constituido por amplios basaltos toleíticos provenientes del cretácico, además de lavas de composición andesíticas con origen de plateau oceánico. Jaillard et al. (1995) menciona que sobre este basamento se depositaron sedimentos en la cuenca marginal abierta entre el arco Cayo perteneciente al Cretácico superior y el arco San lorenzo del Cretácico terminal y Paleoceno (ver Figura 1.2). Posterior a este evento, durante el Paleoceno superior, se produce la colisión entre el arco remanente Cayo y el margen andino, dando como resultado la primera cuenca antearco. En el Eoceno medio

existe una subsidencia extensiva de cuencas antearco las cuales probablemente se invirtieron durante una fase comprensiva en el Eoceno tardío. Siguiendo esta fase de emersión, durante el Eoceno-Oligoceno, se formaron nuevas cuencas extensionales tras arco mientras el golfo de Guayaquil se abría.

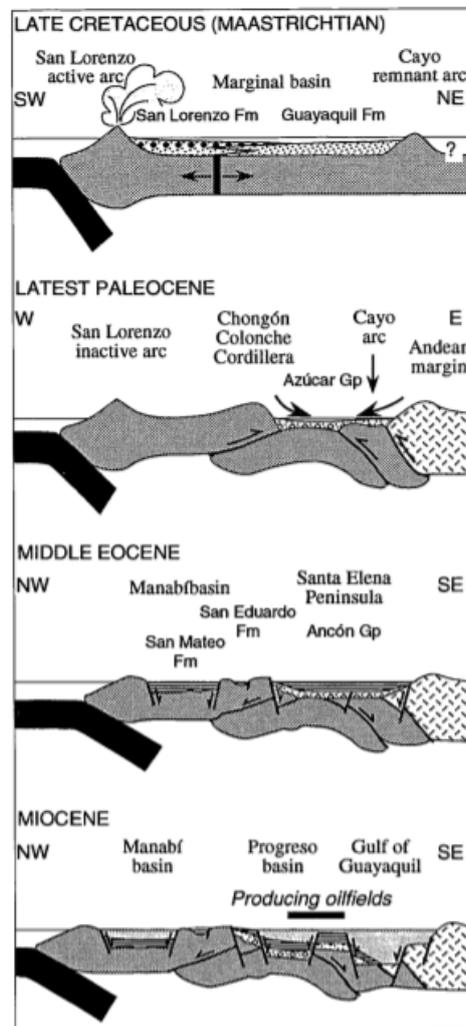


Figura 1.2 Evolución de la costa ecuatoriana desde el cretácico tardío hasta el mioceno. [Jaillard et al., 1995]

En la región costa se pueden encontrar 18 sistemas hidrográficos que desembocan en el océano pacífico. Una de estas cuencas es la del río Guayas (INAMHI, 2012). Baldock, (1982) sugiere que esta cuenca se originó durante el Plioceno mientras sucedía el levantamiento de la cordillera costanera, lo cual desplazó el eje de deposición de la cuenca hacia el occidente. En consecuencia, potentes depósitos de pie de monte y estuario fueron depositados ocasionando que el drenaje se concentre al pie de los Andes

y su evacuación hacia el océano se produzca, al sur por el golfo de Guayaquil, y al norte por el corredor de las fallas de Esmeraldas y Bahía Ancón de Sardinias.

Dumont et al. (2007) propone que la red de drenaje de la cuenca del río Guayas muestra dos tendencias de movimiento principalmente (ver Figura 1.3). En la sección norte los ríos muestran una orientación hacia el suroeste, mientras que en el sur esta orientación cambia hacia el sur y sureste. Estos lineamientos son controlados por fallas con dirección noreste-suroeste al norte, y noroeste-sureste al sur.

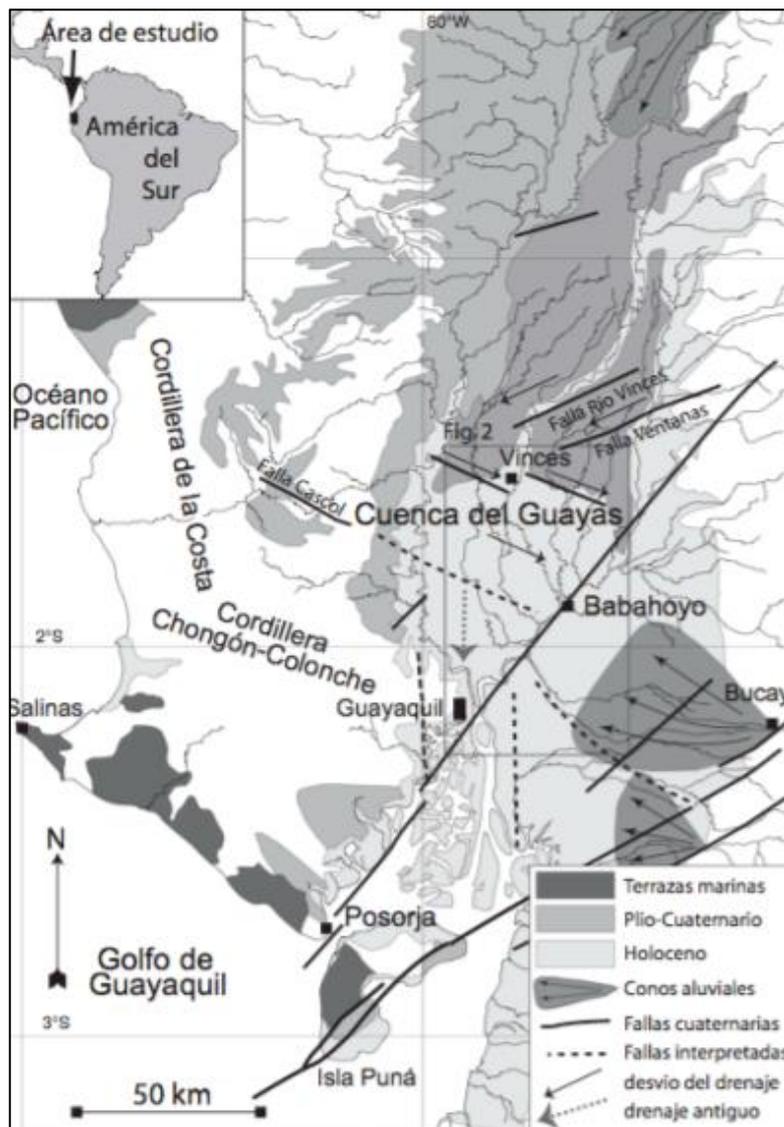


Figura 1.3 Esquema de las redes de drenaje y las estructuras cuaternarias de la cuenca del río Guayas. [Dumont, 2007]

1.6.2 Geología Local

Las formaciones identificadas cercanas al cauce del río Quevedo son las siguientes:

Formación Baba (Plio-Pleistoceno): esta formación aparece descrita en la carta geológica de Valencia elaborada por el IGM (1979), al noreste de dónde se origina el río Quevedo y consiste en un depósito laharítico de ceniza en forma de terraza.

Formación Balzar (Plioceno): En el mapa geológico elaborado por Baldock (1982), esta formación aparece al oeste y noroeste de la zona de estudio; comprende series bien estratificadas de conglomerados, arenas, limos y arcillas las cuales pueden exceder los 300 metros de espesor en los depósitos de la formación Pichilingue.

Formación San Tadeo (Pleistoceno): Esta formación es visible tanto en los mapas elaborados por Baldock (1982) y Reyes & Michaud (2012), aunque en las hojas geológicas publicadas por IGM (1979) no aparece. En el primero esta formación es visible al norte del área de estudio, cerca de “El Carmen”; comprende piroclastos, conglomerados volcánicos, material laharítico y flujos de lodo que forman laminas o terrazas. En el segundo mapa, esta formación aparece en conjunto con la formación Balzar en las facies más lejanas de la cuenca del Río Guayas; comprende series de lodolitas masivas con tonalidades café amarillentas mal consolidadas.

Formación Pichilingue (Cuaternario): En las hojas geológicas de Valencia, El Empalme y Quevedo impresas por IGM (1979), se observa esta formación como terrazas indiferenciadas conformadas por arcillas y arenas resultantes de la erosión de la cordillera de los Andes durante el Pleistoceno. Por su parte Baldock (1982) asigna este nombre a las terrazas indiferenciadas, además indica que pueden estar parcialmente cubiertas de aluviones tardíos y que su potencia alcanza hasta los 3000 metros en el centro de la cuenca del Guayas.

Depósitos aluviales (Cuaternario): Las hojas geológicas 48, 62 y 67 impresas por IGM (1979) indican que estos depósitos se formaron en el holoceno y están constituidos principalmente por arenas, arcillas y limos.

1.6.3 Geomorfología

El relieve circundante al río Quevedo es variable; para su análisis se ha tomado en consideración los mapas morfo-pedológicos de Quevedo y Babahoyo elaborados por PRONAREG (1983). Estos mapas han sido publicados hace más de 40 años, sin embargo, proveen una breve idea de las geoformas del sector. En base a estos mapas, se determinaron las siguientes unidades morfo - pedológicas:

Conos de Deyección y esparcimiento: conformados por cantos y bloques rodados, aluviones pedregosos, arenas de origen volcánico y cubiertas por material piroclástico reciente. En referencia a las formas de relieve puede ser observadas superficies planas de disección ligeramente onduladas, asociadas a pequeñas gargantas

Llanura antigua de depositación: conformada por arenas, areniscas poco cementadas, conglomerados, capas de arcilla y toba, cantos de rodados de origen volcánico en algunas ocasiones cubierto parcialmente por material volcánico reciente. Respecto a las formas de relieve se han logrado identificar superficies disectadas con cimas redondas y agudas con pendientes dominantes; gargantas de ríos moderadamente encañonadas; superficies planas o ligeramente onduladas

Valles Fluviales: conformados por depósitos aluviales de textura variable y, localmente cubiertos por material piroclástico. Las formas de relieve van desde terrazas altas localmente colgantes, terrazas medias indiferenciadas, meandros abandonados, zonas aluviales deprimidas que generalmente se inundan gran parte del año

Valles y llanuras aluviales: conformado por depósitos aluviales de texturas variables. Pueden ser visualizadas distintas formas de relieve como: llanuras onduladas con presencia de agua y llanuras planas a ligeramente onduladas.

1.7 HIDROLOGÍA

La cuenca del río Guayas constituye el sistema fluvial más importante de la costa ecuatoriana (Rossel et al., 1996). Está conformada por cuatro afluentes principales que aportan con sus aguas en dirección norte-sur y este-oeste; en ambos casos convergen a la ciudad de Guayaquil para formar el río Guayas.

Al oeste se localiza el río Daule en la zona baja costanera; al este el río Babahoyo cuyo origen se sitúa en la región andina; al sureste se localizan los ríos Chimbo y Bulubulu y finalmente en el centro se localiza el río Quevedo-Vinces con origen en las estribaciones de la Cordillera Occidental (ver Figura 1.4).

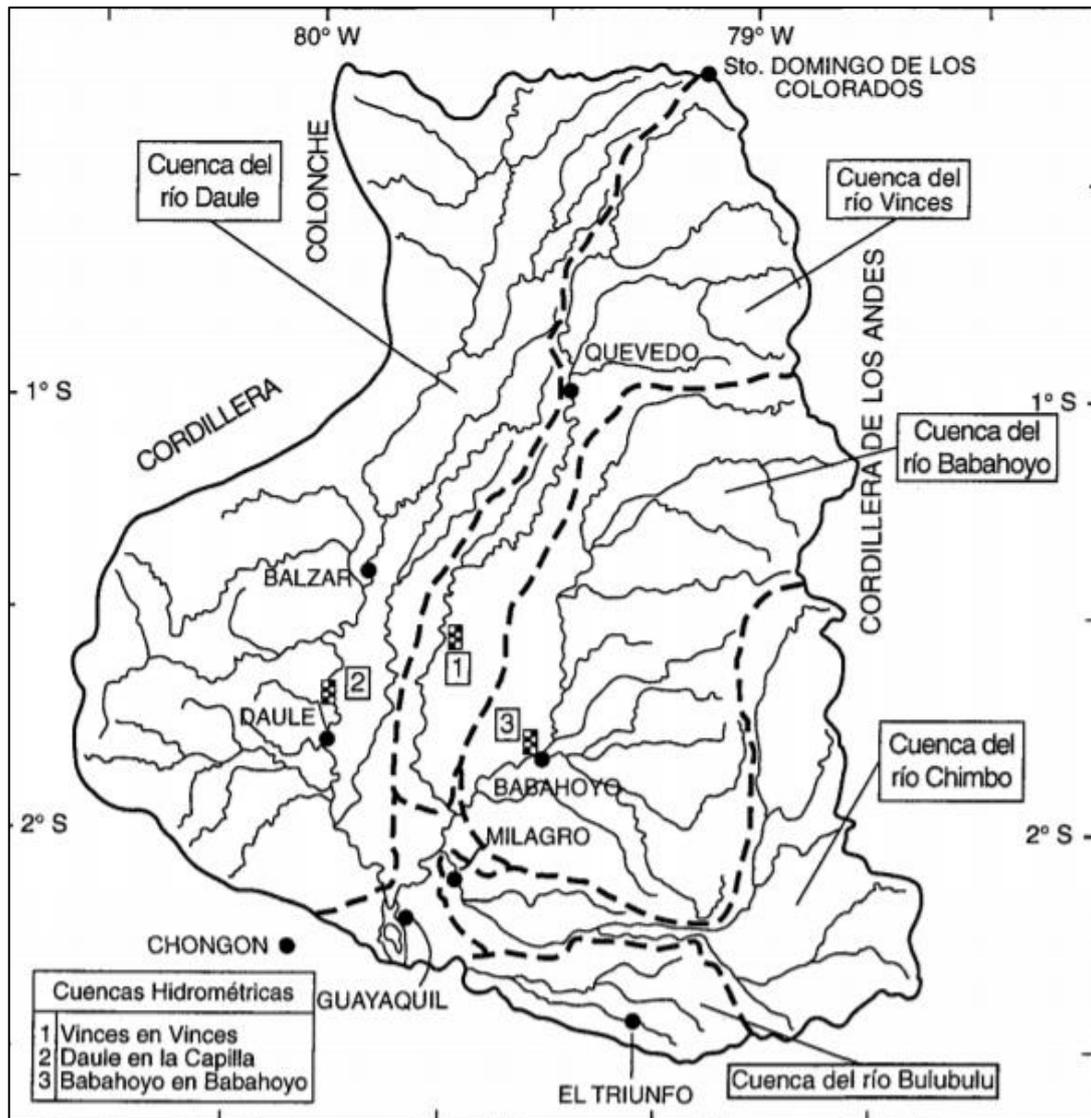


Figura 1.4 Cuenca del Guayas y sus principales afluentes. [Rossel et al., 1996]

El río Quevedo se define como de régimen permanente debido a sus características de drenaje; conduce grandes cantidades de agua y sedimentos especialmente en la época invernal. Su cuenca es de área mediana-pequeña, sin embargo, presenta altas pendientes lo cual contribuye a la formación de torrentes, además de facilitar el

transporte de bloques, piedras, gravas, arenas, limos, arcillas que son depositadas en las terrazas bajas en el cauce del río (Proaño, 2006).

1.8 CLIMA

En la cuenca del río Guayas, Tapia (2012) indica que existen algunos factores que alteran el clima estacional a lo largo del año: la circulación atmosférica continental destacada por los vientos alisios del sureste; el Océano Pacífico que actúa como generador de masas de aire húmedo; las corrientes de Humboldt y El Niño; las características propias de las estribaciones andinas que acoplan grandes masas de humedad. Estos elementos provocan periodos bien definidos a lo largo del año, generando dos estaciones bien diferenciadas: la estación seca caracterizada por una deficiencia de lluvias entre junio y diciembre y, una estación lluviosa caracterizada por largos periodos de lluvias y en algunos casos desbordamiento de ríos, como los suscitados en la costa ecuatoriana durante los años 1972, 1982 y 1998 en las provincias de Esmeraldas, El Oro, Los Ríos y Guayas principalmente en periodos coincidentes con el Fenómeno de “El Niño” (MSP & OPM, 2016; Rossel et al., 1996; Zambrano, 1986).

El Fenómeno del Niño es un proceso natural resultante del movimiento de una corriente estacional cálida que se desplaza de norte a sur a lo largo de las costas ecuatorianas y colisiona con la corriente fría de Humboldt proveniente de las costas chilenas-peruanas (Glantz, 1998). Durante el año 1998 este fenómeno afectó gravemente a la costa ecuatoriana (MSP & OPM, 2016), provocando daños a los servicios de saneamiento ambiental de agua y alcantarillado como consecuencia de las intensas lluvias, avalanchas y crecidas de los ríos. Gran parte de las localidades ubicadas cerca de los ríos sufrieron pérdidas materiales y humanas, sin embargo, en ciudades como Babahoyo dónde fueron implementaron adecuadas medidas de mitigación, el daño fue reducido en gran medida.

CAPÍTULO 2

MARCO CONCEPTUAL

En esta sección del capítulo se detallan definiciones referentes a geomorfología y teledetección requeridas para el desarrollo del proyecto.

2.1 GEOMORFOLOGÍA

2.1.1 Geomorfología Fluvial

Charlton (2007) la define como el estudio de las interacciones entre las formas del canal del río y los procesos de los cauces fluviales en distintas escalas espaciales y temporales. Además, indica que los eventos del pasado son importantes para explicar la forma actual de los canales fluviales. Richards (1987) por su parte afirma que la geomorfología fluvial tiene como objetivo explicar las relaciones entre los procesos físicos del flujo en el sistema fluvial, el transporte de los sedimentos y los canales aluviales creados por este proceso.

2.1.2 Drenajes

Corresponde a los medios por el cual el agua fluye a través de cursos fluviales desde las laderas de las montañas hasta la cuenca hidrográfica (Charlton, 2007). Existen varios tipos de drenajes en función de la forma que adoptan (ver Figura 4), entre ellos se diferencian: dendríticos, rectangulares, radiales, centripeta, enrejada, paralela, anular y desordenada.

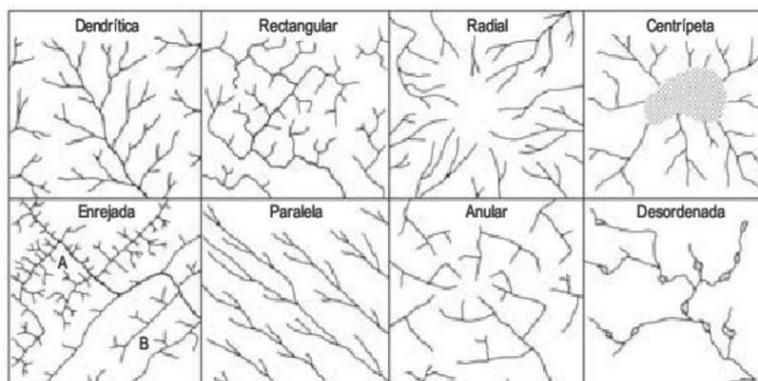


Figura 2.1 Clasificación morfológica de las redes de drenaje. [Gregory & Walling, 1973]

2.1.3 Ríos

Son los principales agentes de erosión, meteorización y transporte de sedimentos; transfirieren grandes cantidades de sedimentos de zonas altas del continente hacia los océanos (Gutierrez, 2008). En base a su morfología pueden ser clasificados como rectilíneos, si presentan baja sinuosidad, caudal de alta energía y gran capacidad erosiva; meándricos si presentan alta sinuosidad y meandros como unidad geométrica; anastomosado o trenzados si presentan múltiples canales, gran capacidad de transporte y sedimentación.

2.1.4 Parámetros geomorfológicos asociados a un río meándrico.

Radio de curvatura (R_c)

El radio de curvatura (R_c) según Charlton (2007) es un indicador de la deflexión y extensión de las curvas que forman un río meándrico. Mide la distancia que hay desde el punto central de la morfología cuasi circular de uno de los meandros hasta uno de los extremos de la periferia que conforma el canal del río (ver Figura 2.2).

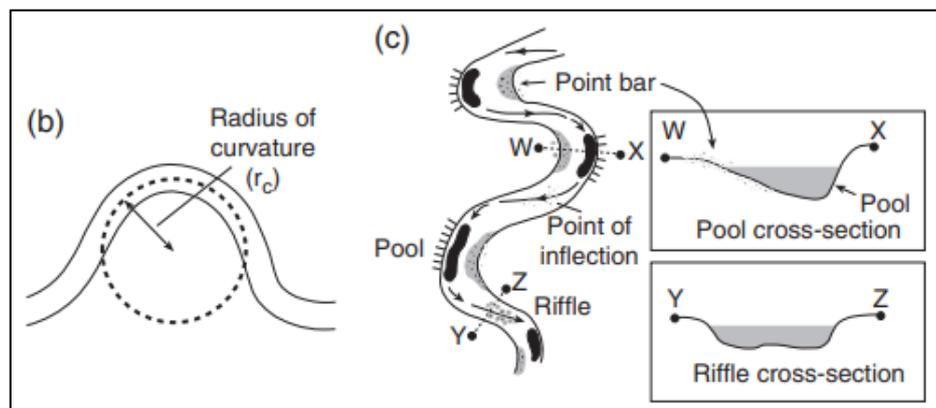


Figura 2.2. Estimación del Radio de curvatura en un río. [Charlton, 2007]

Índice de Sinuosidad (SI)

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

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

Ec. 2. 1

Además Tiwari et al. (2016) en base a los valores de sinuosidad propuso una clasificación para los ríos meándricos. Esta clasificación puede ser observada 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 (SI)	Clasificación
SI<1.05	Straight
1.05<SI<1.25	Winding
1.25<SI<1.50	Twisty
SI>1.50	Meandering

2.1.5 Cuenca Hidrográfica

Ramakrishna (1997) define a una cuenca como un área natural en la que el agua proveniente de las lluvias, forman un curso principal de agua. Además, se define como la unidad fisiográfica constituida por un grupo de sistemas de cursos de agua definidos por el relieve. Por su parte Gaspari et al. (2013) la define como una unidad morfológica integral, definida en un área donde las aguas superficiales desembocan en un cauce delimitado por la existencia de la divisoria de agua.

Schumm (1977) propone un esquema idealizado de una cuenca, la cual comprende zona de producción, zona de transferencia y zona de sedimentación (ver Figura 2.3). La zona de producción representa la cuenca alta y es donde se generan los aportes líquidos y sólidos de la cuenca; estos aportes están asociados a factores climáticos, litológicos, de relieve y cobertura vegetal. La zona de transferencia transporta sedimentos desde la zona de producción y pueden formarse cauces meándricos en la parte inferior debido a la disminución de las pendientes, sedimentos más finos y llanuras de inundación más amplias. Finalmente, en la zona de sedimentación se depositan los sedimentos arrastrados desde la zona de producción; esta zona puede ser el mar o el océano donde se forman deltas (Basile, 2018).

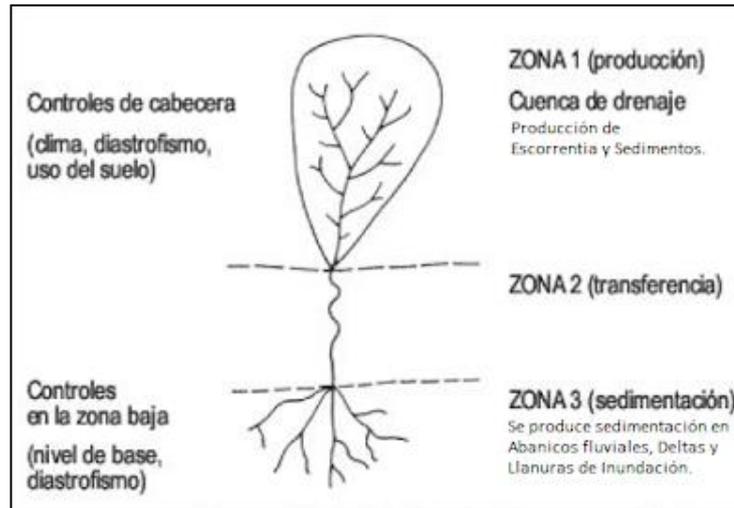


Figura 2.3 Esquema de un sistema fluvial idealizado, en el que se identifica la zona de producción, transferencia y de sedimentación. [Schumm, 1997]

2.1.6 Clasificación de cuencas hidrográficas

2.1.6.1 Cuencas en base al sistema de descarga

Según Faustino & Jimenez (2000) indica que las cuencas pueden ser clasificadas en base a la desembocadura sus aguas.

- *Arreicas*: este tipo de cuencas no logran drenar a un río, mar o lago debido a que sus aguas se evaporan o infiltran sin llegar a formar un escurrimiento subterráneo
- *Criptoarreicas*: Las redes de drenaje en este tipo de cuencas no poseen organización y se mueven como ríos subterráneos
- *Endorreicas*: las aguas de este tipo de cuenca transcurren hacia un embalse o lago, pero no llegan al mar
- *Exorreicas*: sus vertientes conducen el agua hacia grandes ríos o mares.

2.1.6.2 Cuenca en base al sistema de drenaje

Hewlett (1982) propone una clasificación basada en el sistema de drenaje, así clasifica como cuencas de primer orden, segundo orden, tercer orden, cuarto orden y así sucesivamente dependiendo del orden del río principal en el interior de la cuenca.

2.1.6.3 Cuencas en base a su balance hídrico

Faustino & Jimenez (2000) propone una clasificación en base a la oferta y demanda hídrica de la cuenca hidrográfica, así:

- *Cuencas balanceadas*: cuando la oferta y su demanda de son compatibles
- *Cuencas deficitarias*: cuando la demanda es mayor que la oferta
- *Cuencas con exceso*: cuando la oferta es mayor que la demanda

2.1.6.4 Cuencas en base a su Relieve

Muñoz (2007) basado en el relieve y los accidentes del terreno, propone la siguiente clasificación:

- *Cuencas de montaña*: el relieve posee fuertes pendientes y bastantes accidentes geográficos. El cauce de los ríos se caracteriza por ser muy inestable, con fuertes tasas erosivas.
- *Cuencas de Valle*: el relieve posee pendientes muy suaves y pueden establecerse en diferentes altitudes

2.1.6.5 Cuencas en base a su tamaño

Pueden ser clasificadas en función de su tamaño, tal y como puede ser observado en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Clasificación de cuencas según su tamaño. [Faustino & Jiménez, 2000]

UNIDAD	N ° DE ORDEN	ÁREA (KM ²)
Microcuenca	1,2,3	10-500
Subcuenca	4,5	500-2000
Cuenca	6,7 o más	2000

2.1.7 Parámetros geomorfológicos asociados a una cuenca hidrográfica

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

Los parámetros geomorfológicos que se utilizaron son:

Área (A)

El área de la cuenca representa la superficie de la cuenca medida y puede ser obtenida automáticamente digitalizando las cuencas en un software de Sistemas de Información Geográfica (GIS)

Longitud (L)

Es definida por la longitud del cauce principal, lo que equivale a la distancia que recorre el río entre el punto de desembocadura aguas abajo y un punto situado a mayor distancia aguas arriba. Este parámetro influye en la generación de la escorrentía.

Perímetro (P)

Expresa la forma de la cuenca y constituye la longitud de la línea divisoria. Al igual que el área puede ser obtenida automáticamente digitalizando las cuencas en un software de Sistemas de Información Geográfica (GIS).

Orden del flujo (U)

Es el principal parámetro para establecer y para clasificar el orden de la cuenca de un río. Fue definido en primera instancia por Horton (1932), sin embargo requería cierta subjetividad al momento de tomar decisiones. Por su parte Strahler (1952) define al orden más pequeño o de primero orden a los canales; los de segundo orden están constituidos por la unión de los canales de primer orden; los canales de tercer orden son formados por la unión de los canales de segundo orden y así sucesivamente.

Número de flujo (N_u)

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

$$N_u = N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n \quad \text{Ec. 2.2}$$

Longitud del flujo (L_u)

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

$$L_u = L_1 + L_2 + L_3 + \dots L_n \quad \text{Ec. 2.3}$$

Longitud media del flujo (L_{sm})

Según Strahler (1964) la longitud media del flujo (L_{sm}) es un parámetro adimensional de la cuenca fluvial que indica el tamaño de los componentes característicos de una red de drenaje y las superficies contribuyentes. Se lo calcula por medio de la razón entre L_u y N_u tal y como se indica en la siguiente ecuación:

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

Relación de longitud del flujo (R_l)

Es la razón entre (L_u) y el próximo orden inferior de los segmentos de flujo en los arroyos de la cuenca. Representa los distintos cambios superficiales en la pendiente y la topografía, provocados por los diferentes agentes de erosión y meteorización, indicando la etapa joven y madura del desarrollo geomórfico en los canales fluviales de la cuenca (Horton, 1945a). Se representa con la siguiente ecuación:

$$R_l = \frac{L_u}{L_u - 1} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Relación de bifurcación (R_b)

Es un parámetro adimensional que indica el nivel de integración que prevalece en las ramificaciones de los canales de varios órdenes en una cuenca hidrográfica. Se la calcula mediante la razón entre el número de cauces de un orden determinado (N_u) con el próximo orden superior en una red de drenaje (Rai et al., 2020). Se lo representa a través de la siguiente ecuación:

$$R_b = \frac{N_n}{N_n + 1} \quad \text{Ec. 2.6}$$

Relación media de bifurcación (R_{bm}):

Strahler (1953) utilizó la relación media de bifurcación (R_{bm}) como el producto de la relación de bifurcación (R_b) por cada par subsiguiente de órdenes con el número de flujos involucrados en esta, obteniendo como resultado final la media o promedio de la suma de las relaciones de bifurcación de todo orden. Esta relación se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$R_{bm} = \frac{N_u}{N_u + 1} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Densidad de drenaje (D_d)

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

$$D_d = \frac{L_u}{A} \quad \text{Ec. 2.8}$$

Frecuencia de flujo (F_s)

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

$$F_s = \frac{N_u}{A} \quad \text{Ec. 2.9}$$

Textura de drenaje (T)

Es uno de los parámetros más importantes en el concepto de geomorfología fluvial, ya que esta depende generalmente de la litología, capacidad de infiltración y el relieve de la superficie o corteza terrestre (López & Romero, 1987). Smith (1950) propuso una clasificación de la textura del drenaje (T) con base en los siguientes intervalos: gruesa ($T < 4$), intermedia ($4 < T < 10$), fina ($T > 10$) y). Se representa a través de la siguiente ecuación:

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

Relación de alargamiento (R_e)

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

$$R_e = \frac{D}{L} = \frac{1.128 * \sqrt{A}}{L} \quad \text{Ec. 2.11}$$

Relación de circularidad (R_{ci})

Miller (1953) estableció este parámetro como la relación entre el área de la cuenca y el área de un círculo igual al tamaño de la cuenca, influenciada especialmente por las características litológicas de la subcuenca. En este parámetro la variación de la pendiente y el relieve indican una fase dendrítica en sus redes drenaje. Además, los diferentes valores que arroje el R_c darán la indicación de que la cuenca se encuentra en una etapa joven, madura o senil, dependiendo de las medidas de sus índices circulatorios. Se representa a través de la siguiente ecuación:

$$R_{ci} = \frac{4\pi * A}{p^2} \quad \text{Ec. 2.12}$$

Factor de forma (F_f)

Según Horton (1932), es directamente proporcional a las cuencas con lavabos anchos y circulares e inversamente proporcional a las cuencas con lavabos largos y angostos. Se lo representa por medio de la razón entre el área total de la cuenca y el cuadrado de la longitud máxima o axial de esta. Se la representa a través de la siguiente ecuación:

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

Longitud de flujo terrestre (L_g)

La longitud de flujo terrestre (L_g) es el alcance máximo a lo que ha llegado el agua, medida desde el terreno hasta antes de que fluya o circule por los canales de los ríos por medio de las redes de drenaje. Puede ser representada como la longitud de flujo medida desde la línea divisoria hasta el arroyo en una cuenca de primer orden, correspondiendo a la mitad de la inversa de la densidad de drenaje (Horton, 1945a). Se la representa a través de la siguiente ecuación:

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

Relieve (R)

Es una de las propiedades físicas más importantes para definir la forma de una cuenca hidrográfica. Este parámetro indica y evidencia los cambios geomorfológicos que ha tenido el paisaje a lo largo del tiempo, producto de la denudación que ha sufrido la superficie o corteza terrestre, contribuyendo con la formación de los diferentes tipos de redes de drenaje que van a generar las riberas o canales de los ríos. Representa la diferencia de altura entre los puntos máximos y mínimos que conforman el valle de una cuenca (Magesh et al., 2013). Se la representa a través de la siguiente ecuación:

$$R = H - h \quad \text{Ec. 2.15}$$

Relación de relieve (R_r)

Representa el valor del gradiente de una cuenca hidrográfica, midiendo la pendiente general del valle de un río e indicando la intensidad de erosión que operan en los márgenes de la cuenca. Se la define por medio de la razón entre el relieve máximo y el alcance horizontal a través de la dimensión más larga de una cuenca paralela al eje principal de drenaje (Schumm, 1956). Es representada a través de la siguiente ecuación:

$$R_r = \frac{R}{L}$$

Ec. 2.16

Curva Hipsométrica

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

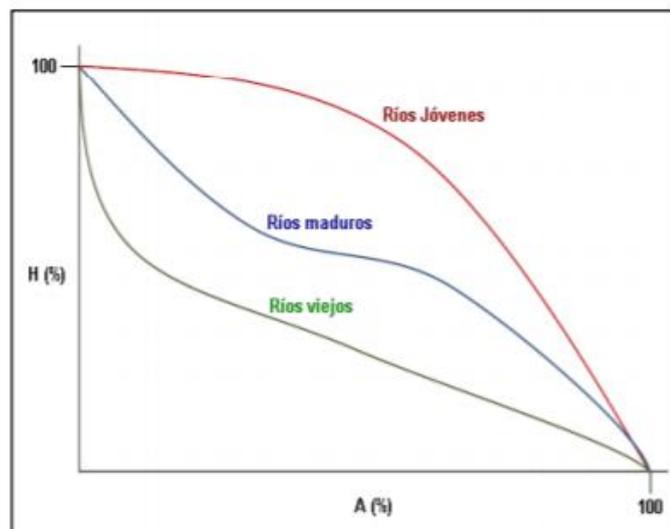


Figura 2.4. Variación de la curva hipsométrica en función de la edad del río. [Ibáñez et al., 2010]

2.2 TELEDETECCIÓN

Perez & Muñoz (2006) afirman que es una técnica de adquisición de información que tiene como objetivo capturar, tratar y analizar imágenes digitales provenientes de satelitales artificiales. Así mismo, Sobrino (2001) indica que la teledetección permite reconocer características de la superficie de la Tierra y los fenómenos que en ella suceden a partir de los datos registrados por el satélite.

2.2.1 Elementos de un sistema de Teledetección

Los elementos esenciales de la teledetección según Chuvieco (2008) son descritos a continuación (ver Figura 2.5):

- *Fuente de energía:* comprende el origen del flujo de energía detectado por el sensor. Este puede ser pasivo, si posee un foco externo al sensor, y activo si el sensor emite un haz de luz de energía.
- *Cubierta Terrestre:* comprende las distintas coberturas de la tierra que reciben y reflejan la energía según sus características. Puede ser vegetal, de suelo, masas de agua y construcciones humanas
- *Sistema Sensor:* es el sistema comprendido por el sensor y la plataforma que lo sostiene. Tiene como función capturar la energía proveniente de las coberturas terrestres, codificarlas y almacenarlas y en ciertas ocasiones enviarla de manera directa al sistema de recepción.
- *Sistema de recepción:* recibe la información transmitida por el sensor, la graba, aplica una serie de correcciones y posteriormente la distribuye a los usuarios.
- *Intérprete:* transforma la información recibida orientándola a solucionar una problemática.
- *Usuario final:* analiza el resultado obtenido por el intérprete.

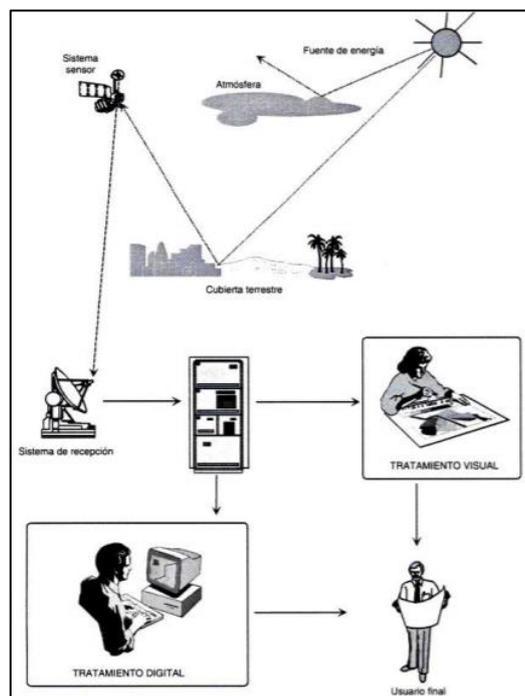


Figura 2. 5 Componentes de un sistema de teledetección. [Chuvieco, 2008]

2.2.2 Resoluciones

Existen cuatro tipos de resolución con las que trabajan los satélites:

- *Resolución espacial:* Comprende el tamaño de cada píxel en la imagen.
- *Resolución espectral:* Indicada el número y ancho de las regiones del espectro de la información captada por el sensor.
- *Resolución Radiométrica:* Número de intervalos de intensidad que puede captarse
- *Resolución temporal:* Intervalo de tiempo que transcurre entre la toma de dos imágenes.

2.2.3 Programas de Teledetección espacial

La teledetección espacial surge y se desarrolla en la segunda mitad del siglo XX con el objetivo de obtener información de la atmósfera, superficie terrestre y marina (Denore & López García, 1999). Se destacan los Satélites meteorológicos y aquellos enfocados a los recursos naturales.

2.2.3.1 Satélites Meteorológicos Geoestacionarios

Son los primeros en enfocarse en la observación espacial, hoy en día están bien consolidados y resultan imprescindibles para establecer los modelos meteorológicos. Consisten en una red de satélites meteorológicos geoestacionarios y satélites meteorológicos de órbita polar, coordinados de tal manera que aseguran la máxima eficiencia para adquirir datos. Entre este tipo de satélites se encuentran las misiones Meteosat, GOES-NEXT, NOAA y Metop.

2.2.3.2 Satélites de Recursos Naturales

Son grandes programas liderados por algunas de las agencias espaciales más importantes del mundo con el objetivo de proporcionar información sobre la superficie terrestre para la elaboración de cartografía temática (Denore & López García, 1999).

Landsat

Desde 1972 se ha establecido como líder mundial en teledetección y ha contribuido significativamente al entendimiento de la Tierra aportando imágenes satelitales regionales de alta resolución (Williams et al., 2006). Desde su lanzamiento hasta la actualidad se han efectuado 8 lanzamientos los cuales han beneficiado a la

comunidad científica debido al acceso libre y gratuito a esta información (Wulder et al., 2019). Entre estas misiones están:

Landsat 7: según USGS (2009) la información provista por este satélite posee una resolución radiométrica de 8 bits, resolución temporal de 16 días, 8 bandas de resolución espectral y una resolución espacial de 30 metros.

Landsat 5: USGS (2013) afirma que este satélite brinda información con resolución radiométrica de 16 bits, resolución temporal de 16 días, 8 bandas de resolución espectral y resolución espacial de 30 metros para las bandas multiespectrales y 15 m para la banda pancromática.

Sentinel

Surge como un programa de órbita polar, en conjunto de la Agencia Espacial Europea (ESA) y el Monitoreo Global del Ambiente y Seguridad (GEMS). Constituyen satélites con resoluciones espaciales de 10 metros enfocados en proporcionar información de la estructura terrestre para la planificación, misión, procesamiento de información y difusión (Torres et al., 2012). Estos satélites son adecuados para la vigilancia marina, monitoreo de hielo y aplicaciones de interferometría como detección de deslizamientos y hundimientos. Las características de la segunda misión del satélite, se describe a continuación:

Sentinel 2: este satélite brinda información con resolución radiométrica de 12 bits, resolución temporal de 10 días, 13 bandas de resolución espectral y resoluciones espectrales de 10 m para las bandas multiespectrales.

2.2.3 Aplicaciones de la Teledetección

Abordan una gran variedad de disciplinas las cuales se basan en el manejo de dichas imágenes espectrales desarrollando técnicas que comparan las firmas espectrales. En la actualidad se ha validado como herramienta de investigación y sus principales aplicaciones se resumen a continuación:

- Estudios de erosión en playas y arenales
- Inventarios de recursos para estudios de impacto ambiental
- Cartografía geológica

- Identificación de masas de aguas superficiales
- Control de movimiento de icebergs
- Análisis en tiempo real de masa nubosas
- Verificación de contenidos de salinidad
- Predicción de rendimientos de cultivos

2.2.4 Identificación de masas de aguas

Esta aplicación puede ser realizada a través de diferentes métodos (ver Figura 2.5) y su procedimiento depende del tipo de estudio que se realice. A continuación, se detallan algunos métodos para su extracción.

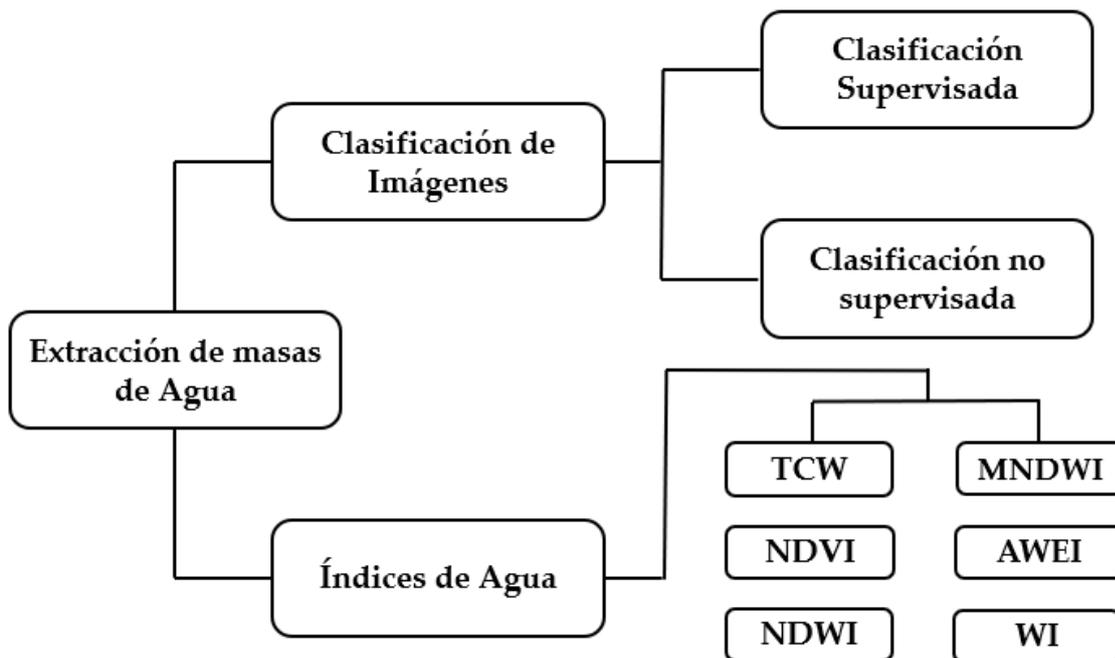


Figura 2.6 Esquema de métodos para la extracción de masas de agua. [Autor]

2.2.4.1 Extracción de masas de agua a través de clasificaciones

Clasificación no supervisada

Está basada en agrupar los casos o características de las imágenes por similitud espectral relativa, sin ser necesaria una intervención manual en la “toma de muestras” por parte del usuario (Foody, 2002).

Clasificación supervisada

Consiste en identificar áreas espectralmente similares a través de “muestras de entrenamiento” que el usuario previamente debe seleccionar dentro de la imagen. Las áreas de interés seleccionadas deben ser conocidas, de tal manera que el algoritmo elegido, extrapole las características espectrales escogidas y las compare con diferentes regiones dentro de la imagen, obteniendo así la clasificación (Castillejo-González et al., 2009).

2.2.4.2 Extracción de masas de agua a través de combinación de bandas

Los sensores remotos se han convertido en una fuente importante de información, al analizar y entregar datos referentes a los distintos cambios en los recursos del planeta tierra. En los cuerpos de agua, estos cambios son notables esencialmente mediante el análisis de la variación espacial, resolución temporal y espectral.

Tasseled Cap Wetness (TCW)

Propuesto por Crist (1985), fue uno de los primeros índices utilizados para la diferenciación de los cuerpos acuosos; consiste en el uso y combinación de las 6 bandas con coeficientes empíricamente determinados. El índice es calculado a través de la siguiente ecuación para las imágenes Landsat:

$$TCW = 0.1509\rho_1 + 0.1973\rho_2 + 0.3279\rho_3 + 0.3406\rho_4 - 0.7112\rho_5 - 0.4572\rho_7 \quad \text{Ec. 2.17}$$

Dónde:

TCW: Tasseled Cap Wetness

ρ_1 : reflectancia de la banda Azul

ρ_2 : reflectancia de la banda Verde

ρ_3 : reflectancia de la banda Roja

ρ_4 : reflectancia de la banda Infrarroja cercana

ρ_5 : reflectancia de la banda SWIR 1.550-1.750 [μm]

ρ_7 : reflectancia de la banda SWIR 2.090-2.35 [μm]

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Es uno de los índices vegetales más utilizados en el mundo para dar seguimiento y evaluar la evolución de la cobertura vegetal. Este índice es sensible y responde principalmente a la alta absorción de la banda roja, además de saturarse sobre

zonas boscosas debido a la sensibilidad ante la actividad fotosintética (Huete et al., 1995).

Zhan et al. (2002) afirma que es posible extraer los cuerpos de agua con este índice a través de una segmentación por umbral, debido a que estos toman valores cercanos a cero, diferenciándose así del resto de información. El índice es calculado a través de la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad \text{Ec. 2.18}$$

Dónde:

NDVI: Índice diferencial de Vegetación normalizado

NIR: Banda del infrarrojo cercano

Red: Banda del Rojo

Normalized Difference Water Index (NDWI)

Propuesto por McFeeters (1996), consiste en un método desarrollado para delinear los cuerpos de agua, además de mejorar su presencia en imágenes satelitales obtenidas remotamente a través de sensores. Este índice utiliza la radiación reflejada por la banda del infrarrojo cercano (NIR) y la luz verde visible para mejorar su presencia, mientras elimina características de la vegetación terrestre y el suelo. El índice es calculado a través de la siguiente ecuación:

$$NDWI = \frac{(GREEN - NIR)}{(GREEN + NIR)} \quad \text{Ec. 2.19}$$

Dónde:

NDWI: Índice diferencial de Agua normalizado

NIR: Banda del infrarrojo cercano

GREEN: Banda de la luz verde

Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)

Consiste en una modificación del MNDWI, reemplazando la banda NIR por la banda media del infrarrojo (MIR), propuesta por Xu, (2006). Esta modificación mejora la información obtenida a partir de MNDWI para los cuerpos de agua, mientras elimina o remueve el ruido de las construcciones, vegetación y suelo. Se recomienda

utilizar este índice en regiones acuosas con terrenos dominados por construcciones debido a las ventajas descritas anteriormente. Este índice es calculado a través de la siguiente ecuación:

$$MNDWI = \frac{(GREEN - MIR)}{(GREEN + MIR)} \quad \text{Ec. 2.20}$$

Dónde:

MNDWI: Índice Diferencial de Agua Normalizado Modificado

MIR: Banda del infrarrojo medio

GREEN: Banda de la luz verde

Automatic Water Extraction Index (AWEI)

Es un índice desarrollado por Feyisa et al. (2014), en imágenes Landsat 5 con el objetivo de maximizar la separación de los píxeles de agua y no agua a través de la diferenciación y adición de bandas, además de aplicar diferentes valores a los coeficientes. Se plantean 2 ecuaciones basadas en la afectación que puede tener las sombras sobre el terreno. La ecuación 2.21 ha sido desarrollada para áreas libres de sombras y la ecuación 2.22 para áreas en las que las sombras están presentes:

$$AWEI_{nsh} = 4 \times (\rho_{banda\ 2} - \rho_{banda\ 5}) - 0.25 \times \rho_{banda\ 4} + 2.75 \times \rho_{banda\ 7} \quad \text{Ec. 2.21}$$

$$AWEI_{sh} = \rho_{banda\ 1} + 2.5 \times \rho_{banda\ 2} - 1.5 \times (\rho_{banda\ 4} + \rho_{banda\ 5}) - 0.25 \rho_{banda\ 7} \quad \text{Ec. 2.22}$$

Dónde:

AWEI: Índice de Extracción de Agua Automatizado

ρ : Valor de la reflectancia de las bandas espectrales de Landsat 5 TM

Banda 1: Azul

Banda 2: Verde

Banda 4: Infrarrojo cercano

Banda 5: Infrarrojo de onda corta (SWIR) 1.550-1.750 [μm]

Banda 7: Infrarrojo de onda corta (SWIR) 2.090-2.35 [μm]

Water Index (WI)

Es un índice alternativo, calculado en primera instancia por Danaher & Collet (2006), y mejorado posteriormente por Fisher et al. (2016). Consiste en la estimación de los cuerpos de agua, mediante el análisis lineal discriminante de la reflectancia de la superficie en las bandas visibles del NIR y SWIR. El índice es calculado a través de la siguiente ecuación:

$$WI = 1.7204 + 171 \rho_{banda\ 2} + 3\rho_{banda\ 3} - 70\rho_{banda\ 4} - 45\rho_{banda\ 5} - 71\rho_{banda\ 7} \quad \text{Ec. 2.23}$$

Dónde:

WI: Índice de Agua

ρ : Valor de la reflectancia de las bandas espectrales de Landsat 7

Banda 2: Verde

Banda 3: Rojo

Banda 4: Infrarrojo cercano

Banda 5: Infrarrojo de onda corta (SWIR) 1.550-1.750 [μm]

Banda 7: Infrarrojo de onda corta (SWIR) 2.090-2.35 [μm]

2.2.3.3 Métodos Avanzados

A pesar de que existen varios métodos para la extracción de agua de las imágenes satelitales, su elección estará sujeta a la precisión que se desee tener en el estudio. Cuando se requiere un mayor grado de precisión es común el uso y combinación de múltiples índices y “*machine learning*”:

- Ouma & Tateishi (2006) propusieron un índice que utiliza la combinación lógica del TCW y NDWI para mejorar la estimación y delimitación de los límites de los lagos.
- Lu et al. (2011) plantearon un método para la extracción de cuerpos de agua basado en el NDVI y NDWI en combinación con la topografía del área de estudio.
- Monegaglia et al. (2018) utilizando herramientas computacionales desarrollaron PyRis, una herramienta que permite extraer ríos con extensos meandros, además de la morfodinámica de sus ramificaciones con la capacidad cuantificar la dinámica de sus bancos de arena.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO METODOLÓGICO

El presente estudio se enfocó en primera instancia en realizar el análisis multitemporal del río Quevedo, desde el año 1985 hasta el 2019 en intervalos de 10 años. Sin embargo, debido a las limitantes del proyecto el estudio se efectuó en los años 1986, 2000 y 2019. En estos años se evidenció los cambios morfológicos del río, además, se evaluaron parámetros inherentes a las características de este y de la cuenca hidrográfica en el que está localizado.

El análisis multitemporal evaluó, entre todos los índices de extracción de masas de agua, que metodología presenta mejores resultados en cuanto a la delimitación del río en estudio, con el objetivo de poder caracterizar sus cambios a lo largo de tiempo. Por su parte el análisis morfológico, comprendió calcular parámetros ligados tanto a la cuenca de drenaje como al río. Estos parámetros, aunque algunos han sido definidos hace 64 años, siguen siendo igual de importantes pues sirven para conocer el comportamiento del río, e incluso predecir cómo será este en años posteriores.

3.1 ADQUISICIÓN DE DATOS

Para el presente estudio es de vital importancia la calidad de información que pueda ser obtenida, pues a partir de esta se determina el alcance del proyecto. La obtención de dicha información está sujeta a restricciones y limitantes concerniente principalmente a la accesibilidad y/o disponibilidad de datos.

3.1.1 Imágenes Satelitales

Se utilizarán imágenes de dos tipos de satélites Landsat y Sentinel por ser insumos de acceso libre. Para el periodo de análisis comprendido entre los años 1985-2005 serán empleadas imágenes Landsat, mientras que para los años posteriores imágenes provenientes de Sentinel, debido a que presentan una mejor resolución espacial (ver Tabla 3.1)

Imágenes Landsat

Las imágenes fueron obtenidas a través de la plataforma: *Earth Explorer*. Estas imágenes pertenecen a los años de 1986 y 2000 ; fueron extraídas con la menor cantidad de nubosidad posible en el área de estudio.

Imágenes Sentinel

Las imágenes Sentinel fueron obtenidas a través de la plataforma “*Copernicus Open Acces Hub*” y pertenecen a los años 2019. Esta imagen fue extraída bajo el criterio de que el área de estudio se encuentre libre de nubosidad.

Tabla 3.1 Descripción de las características correspondientes a las imágenes satelitales obtenidas de Landsat y Sentinel. [Autor]

Imagen	Tipo satélite	Página web	Fecha emisión	Fecha descarga	Peso (Mb)
1	Landsat 5	USGS	09/06/1986	29/10/2020	179
2	Landsat 7	USGS	23/11/2000	26/10/2020	270
3	Sentinel 2	USGS	27/03/1985	29/10/2020	651

3.1.2 Mapas Geológicos

Los mapas geológicos usados son de escala 1:100.000 y corresponden a información de libre acceso que puede ser descargada a través del portal del IGM.

Las Hojas utilizadas son las siguientes:

- Hoja Geológica 48, Quevedo, IGM (1979)
- Hoja Geológica 67, El Empalme, IGM (1979)
- Hoja Geológica 62, Valencia, IGM (1979)
- Mapa Geológico del Ecuador, Baldock (1982)
- Mapa Morfo-pedológico de Quevedo, PRONAREG (1983)
- Mapa Geológico de la Margen Costera Ecuatoriana 2012, Reyes y Michaud (2012)

3.1.3 Formatos shapefile (SHP)

La información georreferenciada ha sido obtenida a partir del geo portal y comprende:

- Mapa de ríos y drenajes
- Mapa de cuencas hidrográficas
- Mapa de provincias y cantones

3.2 METODOLOGÍA

Las metodologías aplicadas para el análisis multitemporal y fluvio-morfológicos son descritas a continuación:

3.2.1 ANÁLISIS MULTITEMPORAL

El análisis multitemporal requiere la aplicación de técnicas de teledetección para identificar y estudiar los cambios a lo largo del tiempo, mediante el uso de imágenes provistas por los distintos satélites que se encuentran en órbita. Puede ser realizado en los distintos softwares disponibles en el mercado entre ellos ArcGIS, ENVI, Q-GIS, SNAP, etc.

En el presente estudio se realizará un análisis multitemporal del río Quevedo en la parte sur de la cuenca del río Vices, el cual comprende los cantones de Quevedo, Mocache y Buena Fe. La metodología utilizada para el presente estudio puede ser visualizada en la Figura 3.1.

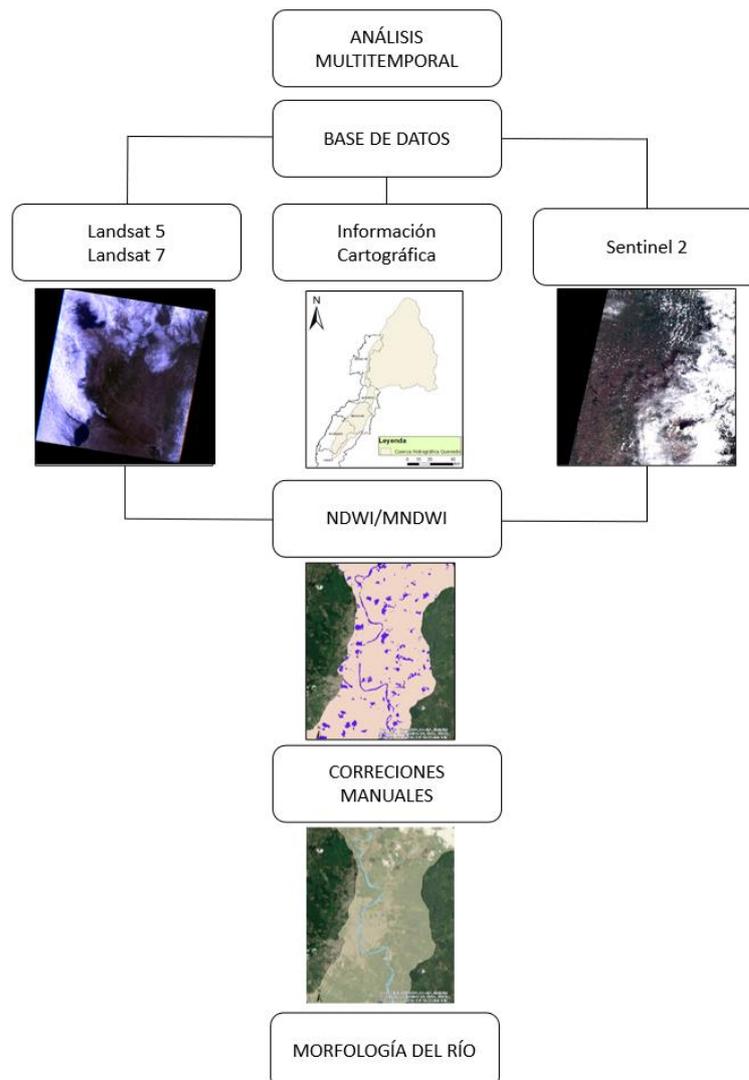


Figura 3.1 Esquema de la metodología utilizada para obtener la morfología del Río Quevedo. [Autor]

En primera instancia se crea una base de datos georreferenciada, la cual comprende imágenes de los satélites Landsat 5, Landsat 7 y Sentinel 2 (Ver Figura 3.2); e información cartográfica referente a redes hídricas, mapas geológicos, mapas morfo-pedológicos y geomorfológicos.

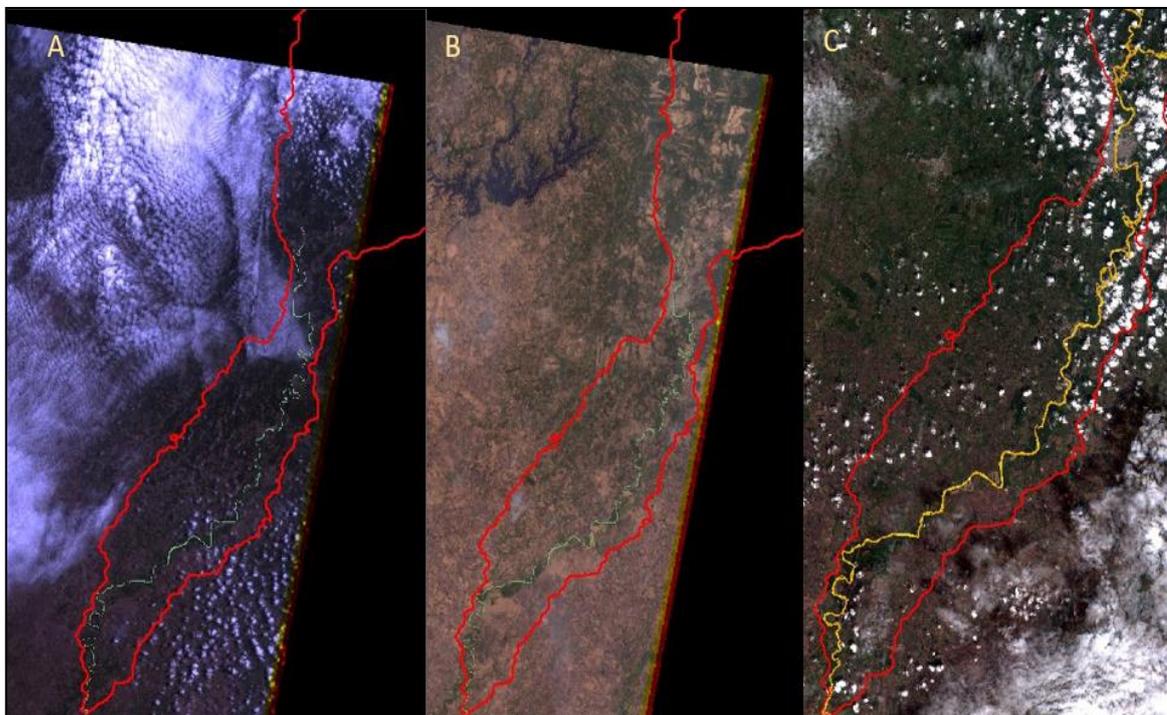


Figura 3.2 Imágenes satelitales utilizadas En el presente estudio. La imagen A se obtuvo en el año 1986 a partir del satélite Landsat 5. La imagen B se obtuvo en el año 2000 a partir del satélite Landsat 7. La imagen C se obtuvo en el año 2019 a partir del satélite Sentinel 2. [Autor]

Para la estimación de la morfología del río Quevedo en los años 1986, 2000 y 2019 se aplicaron índices de extracción de masas de agua. Los mejores resultados se obtuvieron al aplicar NDWI y MNDWI en comparación con el NDVI (ver Figura 3.3). Por su parte los índices AWEI y WI resaltaban las características de los píxeles de agua, sin embargo, al no ser índices normalizados, requerían un procesamiento supervisado para su extracción. En base a lo expuesto anteriormente y debido a las limitantes del proyecto, se decidió utilizar ambos índices: NDWI y MNDWI complementándolos con el WI, para una mejor definición de la morfología del río.

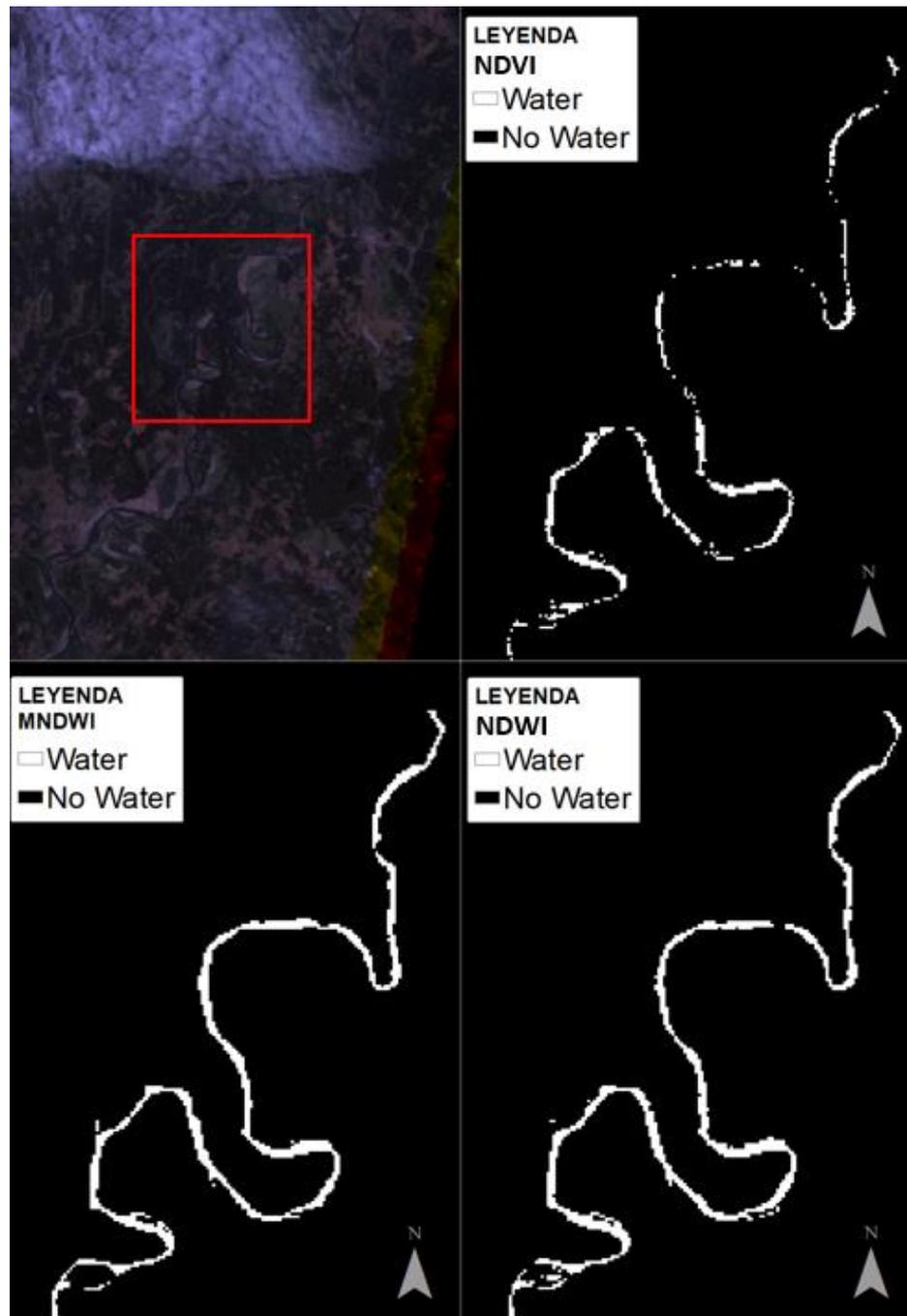


Figura 3.3 Aplicación de los índices de extracción NDVI, NDWI y MNDWI. En ambos casos, NDWI y MNDWI, se obtuvieron mejores resultados en comparación al NDVI. [Autor]

Definidos los índices a ser utilizados, el proceso se realizó en dos fases relacionadas al tratamiento de las imágenes satelitales.

Fase 1: Consiste en la aplicación los índices NDWI y MNDWI para la delimitar las masas de agua. En ambos casos los resultados obtenidos presentan errores ligados a la calidad de la información proporcionada por los satélites, ver Figura 3.4.

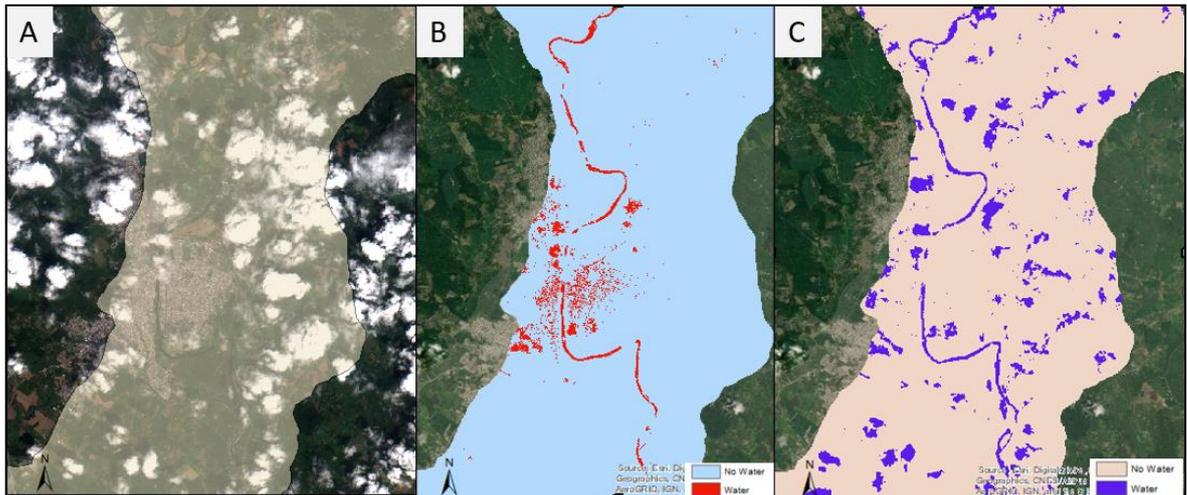


Figura 3.4 Aplicación de NDWI y MNDWI a las imágenes satelitales. La imagen A presenta la información proporcionada por el satélite. La imagen B muestra el resultado de aplicar NDWI en la zona de interés. La imagen C muestra el resultado de la aplicación del MNDWI al área de estudio. En ambos casos B y C se muestra información referente a los píxeles con características de Agua y No Agua. [Autor]

Fase 2: Los errores ligados a la nubosidad y áreas urbanas generan ambigüedad al momento de analizar los resultados. Esta fase consiste en la corrección, delimitación y depuración de los datos resultantes al aplicar los índices de extracción de masas de agua, realizados bajo el criterio del operador (ver Figura 3.5).

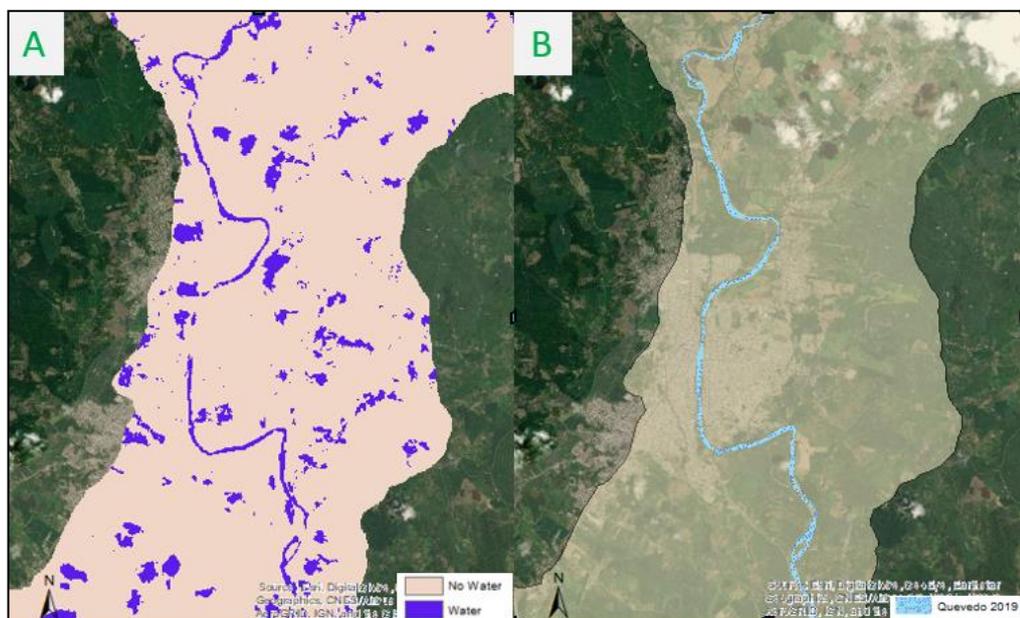


Figura 3.5 Corrección, delimitación y depuración de los datos obtenidos al aplicar MNDWI. Se ha eliminado manualmente la información relacionada a la nubosidad del sector y cuerpos de agua ajenos al cauce principal del río Quevedo. [Autor]

3.2.2 PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS

3.2.2.1 Parámetros geomorfológicos de la cuenca

Para la obtención de los parámetros geomorfológicos básicos de la cuenca hidrográfica -**área, longitud, perímetro**- se utilizó la información cartográfica referenciada base comprendida por archivos shp de cuencas hidrográficas, ríos y drenajes. Esta información fue procesada utilizando el SIG, ArcMap 10.5. Utilizando este SIG se calcularon los parámetros **U** -utilizando la metodología propuesta por (Strahler, 1952) -, **N_u** y **L_u**. los parámetros restantes fueron obtenidos basados en los parámetros mencionados en cuestión, utilizando las ecuaciones propuestas en la sección 2 (Ec. 2.6 - Ec. 2.16) y que pueden ser observadas en la Tabla 3.2. Finalmente, la **curva hipsométrica** (ver Figura 3.6) del río Quevedo fue obtenida a partir del “Estudio Fluviomorfológico del río Vinces y determinación de las áreas de inundación de la zona de influencia del proyecto Pacalori aplicando Hec-Georas” de Solano & Vintimilla (2013).

Tabla 3.2 Parámetros geomorfológicos calculados para la cuenca del río Quevedo.[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	R_b	$R_b = \frac{N_u}{N_u + 1}$
7	R_{bm}	$R_{bm} = \frac{N_n}{N_n + 1}$
8	F_s	$F_s = \frac{N_u}{A}$
9	T	$T = D_d * F_s$
10	Re	$R_e = \frac{1.128 * \sqrt{A}}{L}$
11	R_{ci}	$R_c = \frac{4\pi * A}{p^2}$
12	F_f	$F_f = \frac{A}{L^2}$
13	L_g	$L_g = \frac{1}{2 * D_d}$
14	R	$R = H - h$
15	R_r	$R_r = \frac{R}{L}$

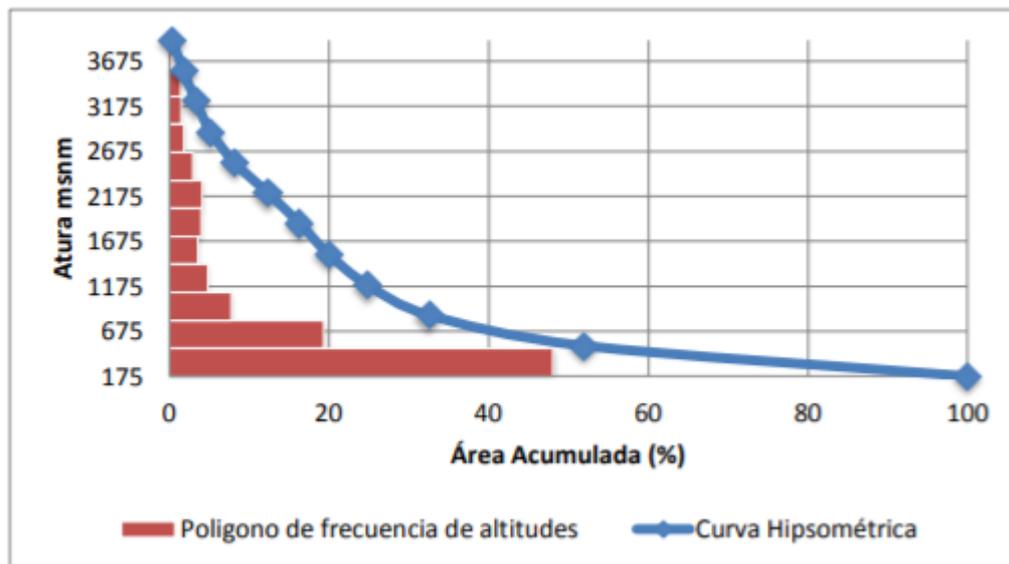


Figura 3.6. Curva Hipsométrica de la cuenca del río Quevedo. [Solano & Vintimilla, 2013]

3.2.2.2 Parámetros geomorfológicos del Río

Los parámetros morfológicos para el río Quevedo fueron calculados después de obtener su morfología utilizando ArcMap 10.5, estos parámetros fueron **SI** y **R_c**. SI se calculó aplicando la Ec 2.1, mientras **R_c** Se calculó siguiendo la metodología propuesta por Charlton (2007). En ambos casos, el cálculo fue realizado por secciones para comprender el comportamiento del río a lo largo de su cauce.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

En este apartado se expondrán los resultados cualitativos y cuantitativos, obtenidos posterior a la aplicación de los índices de extracción de masas de agua. De manera general se obtuvo parámetros geomorfológicos para la cuenca del río Quevedo y para el río mencionado en cuestión.

4.1 PARÁMETROS ASOCIADOS A LA CUENCA

Para la obtención de los parámetros asociados a la cuenca del río Quevedo, se analizó en primera instancia el río Quevedo y sus principales afluentes. Parámetros generales como el área, perímetro, longitud, N_u , y L_u (ver Tabla 4.1) fueron obtenidos a través de GIS. Los parámetros restantes se definieron principalmente en base a la longitud del flujo y su orden (ver Tabla 4.1 y Tabla 4.2).

Tabla 4.1 Parámetros geomorfológicos calculados para la cuenca del río Quevedo I, utilizando SIG. [Autor]

Parámetro	Resultado
A	4268 km ²
P	459.66 km
L	157.16 km
U	6° orden
N_u	4829
L_u	15080.31
R_L	1.10
R_b	0.65
R_{bm}	0.58

Tabla 4. 2. Parámetros morfológicos de la cuenca del río Quevedo II. [Autor]

Parámetro	Ecuación	Cálculos	Resultado
L_{sm}	$L_{sm} = \frac{L_u}{N_u}$	$L_{sm} = \frac{15080.31}{4829}$	3.12
D_d	$D_d = \frac{L_u}{A}$	$D_d = \frac{15080.31}{4268}$	3.53
F_s	$F_s = \frac{N_u}{A}$	$F_s = \frac{4829}{4268}$	1.13
T	$T = D_d * F_s$	$T = 3.53 * 1.13$	4.00
Re	$Re = \frac{1.128 * \sqrt{A}}{L}$	$Re = \frac{1.128 * \sqrt{4268}}{157.16}$	0.47
R_{ci}	$R_{ci} = \frac{4\pi * A}{p^2}$	$R_{ci} = \frac{4\pi * 4268}{459.66^2}$	0.25
F_f	$F_f = \frac{A}{L^2}$	$F_f = \frac{4268}{157.16^2}$	0.17
L_g	$L_g = \frac{1}{D_d} * 2$	$L_g = \frac{2}{3.53}$	0.56
R	$R = H - h$ [m]	$R = 4030 - 18$	4012
R_r	$R_r = \frac{R}{L}$	$R_r = \frac{4.01}{157.16}$	0.03

Un esquema general de la cuenca del río Quevedo y las variaciones de su principal cauce, pueden ser observadas en la Figura 4.1. La dirección del río Quevedo está orientada hacia el sur, sin embargo, después de la ciudad que lleva el mismo nombre, su trayectoria se modifica hacia el suroeste.

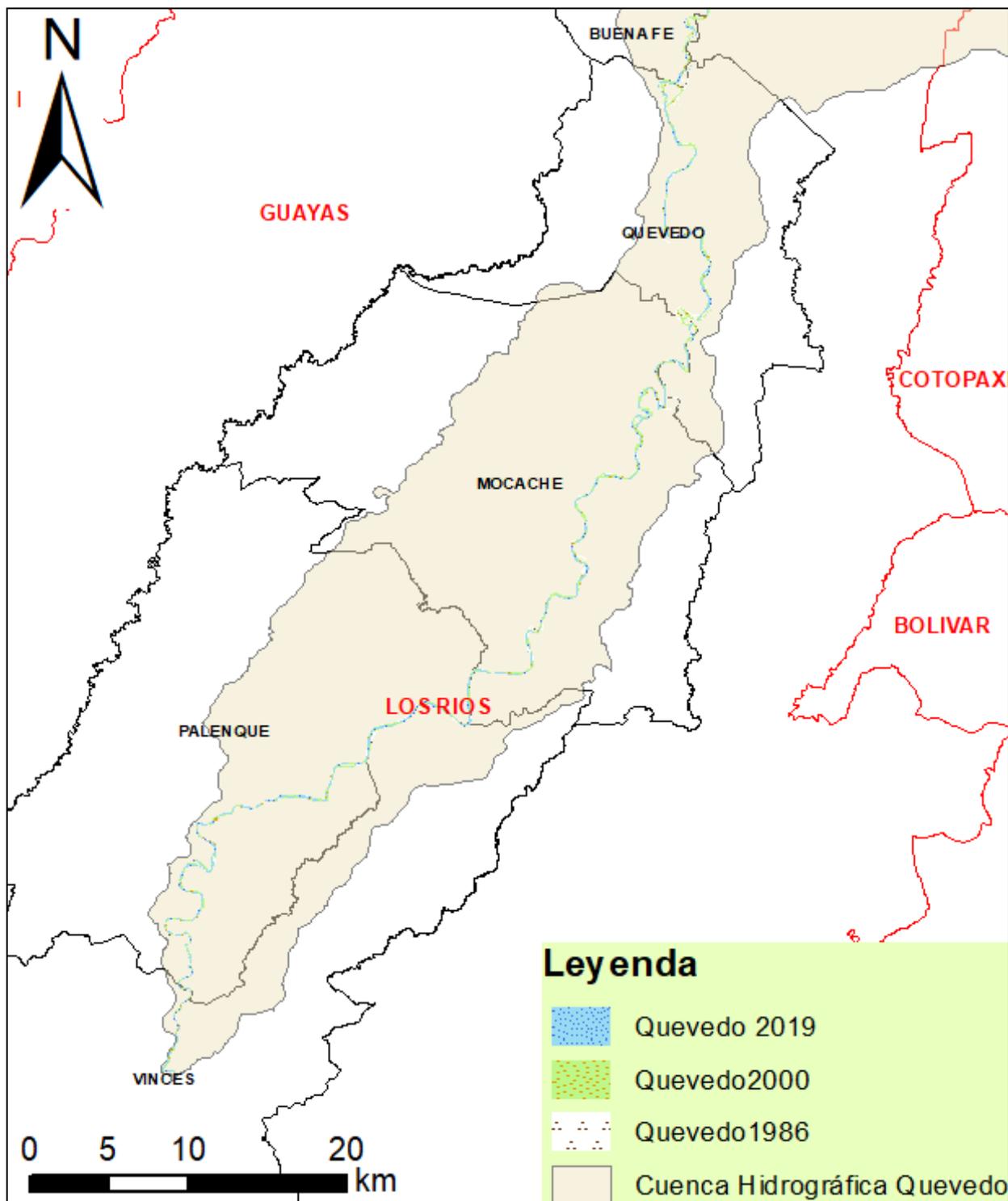


Figura 4.1 Esquema general del río Quevedo en los años 1986, 2000 y 2019. [Autor]

4.2 PARÁMETROS ASOCIADOS AL RÍO QUEVEDO

Se identificaron 2 zonas bien definidas a lo largo del cauce del río Quevedo.

La primera, sin cambios importantes, localizada al sur de la zona de estudio a partir del kilómetro 70 del río Quevedo. En dicha área tanto S_I como R_c se mantienen constantes o con pequeñas variaciones en el intervalo de tiempo propuesto para el estudio.

La segunda, y la más importante, comprende los primeros 70 kilómetros del cauce del río. Debido a la complejidad de sus cambios y la extensión del área en sí, se dividió a su vez en 4 zonas para evidenciar y calcular las variaciones morfológicas del río. Estas zonas son descritas y analizadas en mayor detalle a continuación

4.2.1 ZONA 1

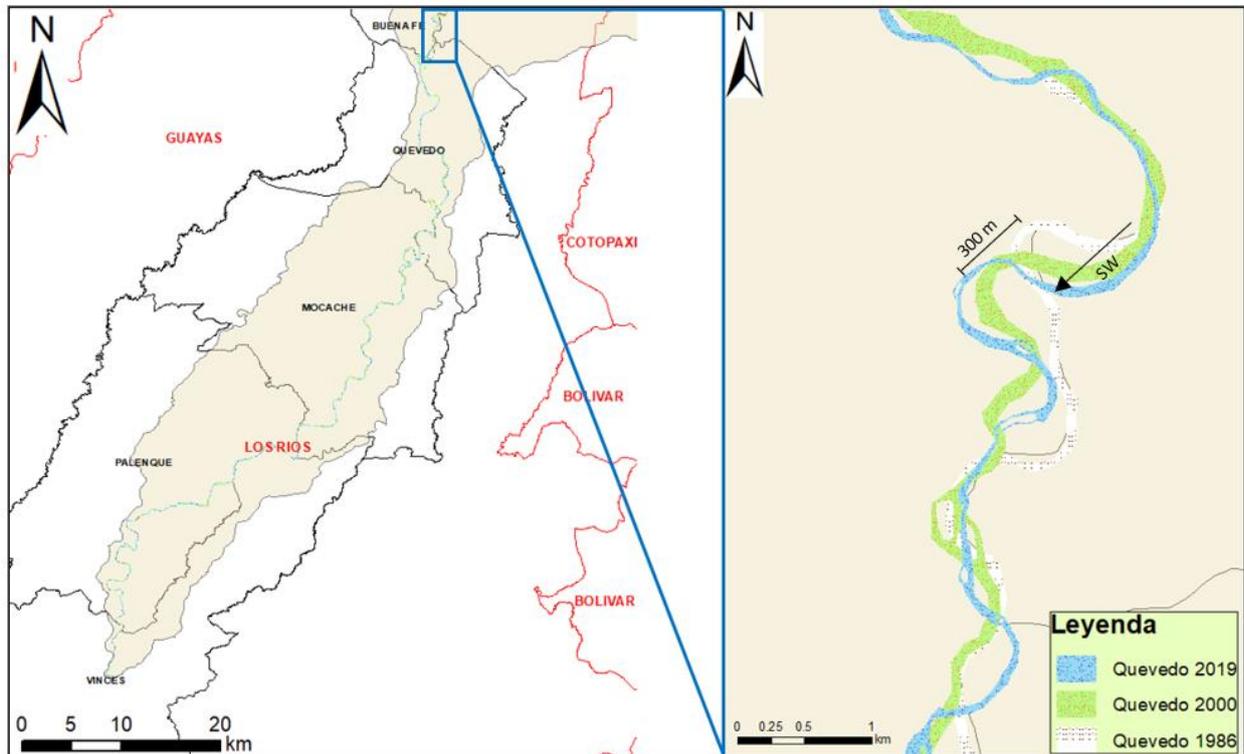


Figura 4.2 Variación de la morfología del río Quevedo en el intervalo de tiempo 1986 -2019 en la zona 1. [Autor]

Esta zona comprende los primeros 8 km del río en los que se observa importantes variaciones (ver Figura 4.2). El río Quevedo ha sufrido desplazamientos de hasta 300 metros aproximadamente en uno de sus meandros. Además, se evidencian distintas variaciones en el ancho del canal, posiblemente relacionadas a aumentos en el caudal del río relacionados a intensas precipitaciones.

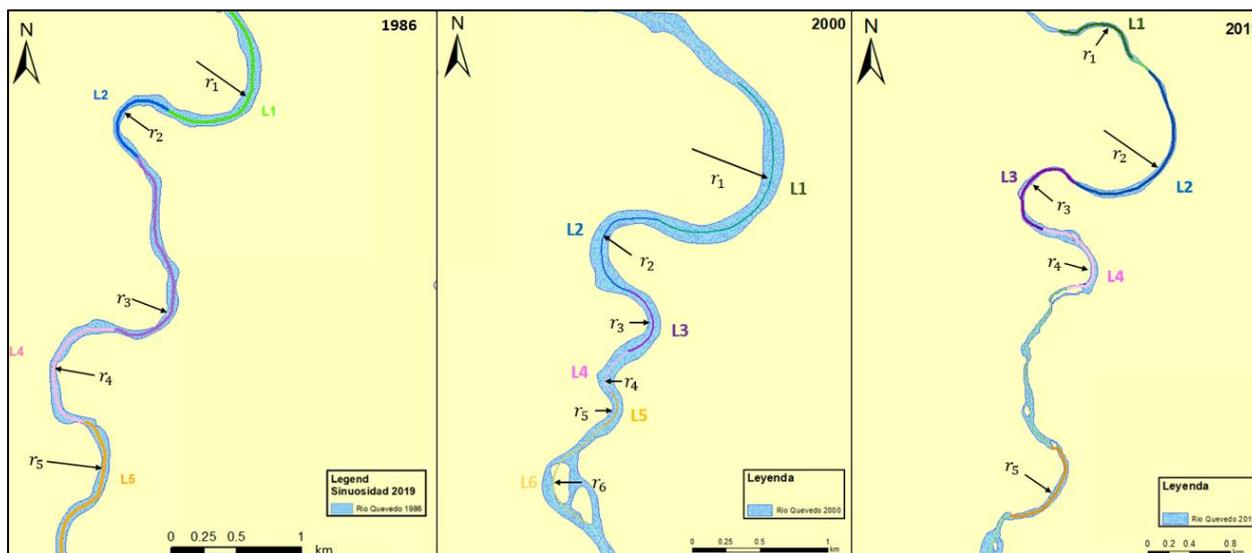


Figura 4.3 Radio de circularidad en la zona 1 durante los años 1986, 2000 y 2019. [Autor]

Los radios de curvatura han variado a través del tiempo (ver Figura 4.3), lo que se deriva en un aumento o disminución de los índices de sinuosidad en el área de estudio. Se observa que la sección L1, L2, L3 y L4 han tenido importantes variaciones desde 1986 hasta el 2019 respecto a SI y R_c (ver Tabla 4.3). El índice general de sinuosidad promedio para esta zona es de aproximadamente 1.5

Tabla 4.3 Radios de curvatura e índices de sinuosidad para la Zona 1 en los años 1986, 2000 y 2019. [Autor]

SECCIÓN	1986		2000		2019	
	R_c	SI	R_c	SI	R_c	SI
L1	420	1.64	515	1.57	210	1.21
L2	164	1.88	256	1.70	655	1.51
L3	292	1.45	217	1.38	275	2.04
L4	336	1.56	127	1.18	205	1.73
L5	330	1.16	110	1.2	410	1.36
L6	-	-	177	1.33	-	-
Promedio	300.2	1.53	233	1.39	351	1.57

La Figura 4.4 permite observar mejor estas variaciones: En la sección L1, **SI** ha tenido pequeñas variaciones, no obstante, **R_c** ha incrementado en el tiempo teniendo una variación mayor a 1.5 desde el año 1986. En las secciones L2, L3 y L4 **SI** ha variado considerablemente al igual **R_c** , pero sin ninguna tendencia en específico.

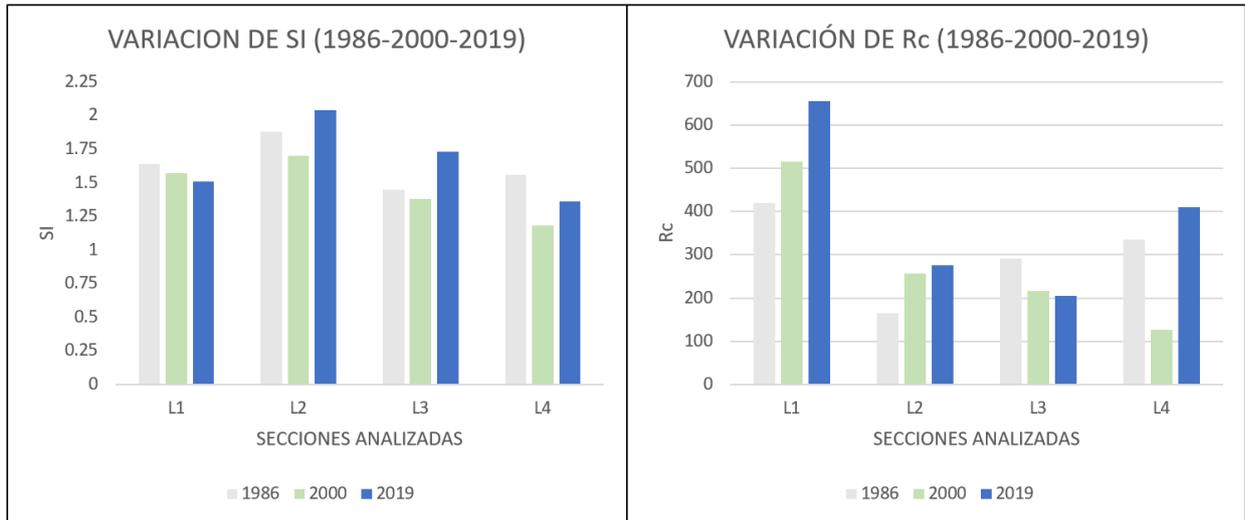


Figura 4.4. Variación de SI y Rc en las secciones L1, L2, L3, L4 desde 1986-2019 en la Zona 1. [Autor]

4.2.2 ZONA 2

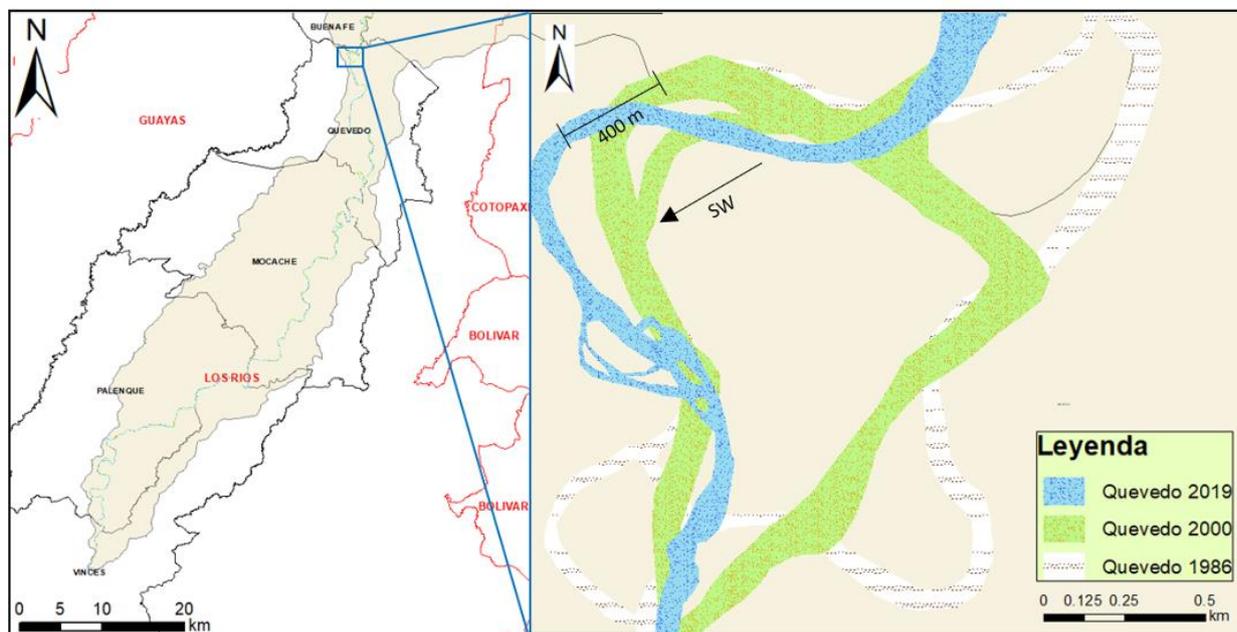


Figura 4.5 Variación de la morfología del río Quevedo en el intervalo de tiempo 1986 -2019 en la zona 2.

Comprende la sección del río entre el km 8 y 12 del río ubicado al norte de la ciudad de Quevedo. El principal cambio se evidencia en el abandono de los canales situados al este de la Figura 4.5. El cauce del río Quevedo se ha movido en sentido Suroeste y puede ser evidenciado en el desplazamiento de su meandro, una distancia aproximada de 400 metros. En esta sección el río abandona su bidireccionalidad y su caudal se mueve en la dirección descrita anteriormente.

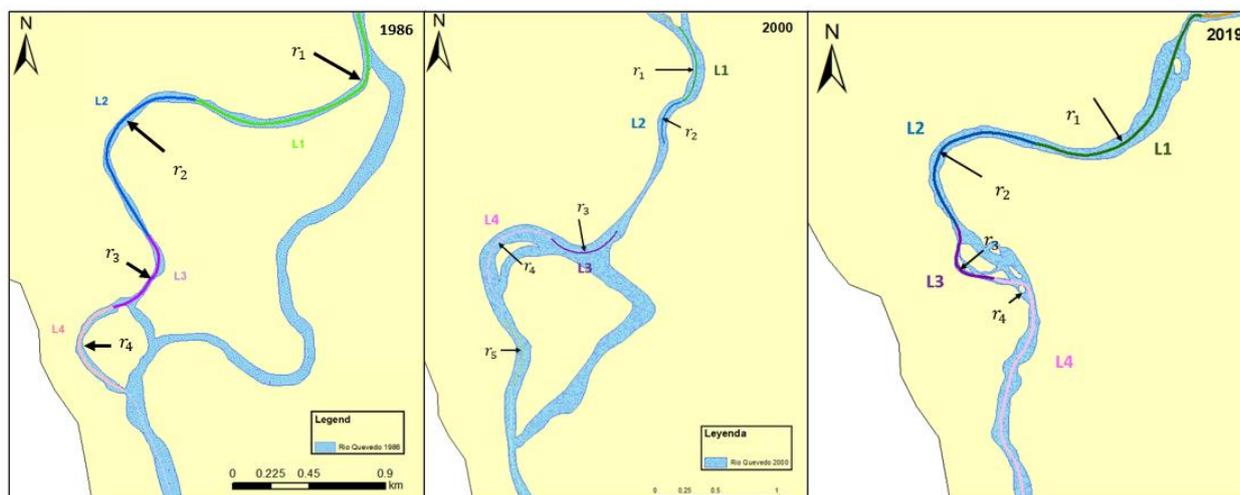


Figura 4.6 Radio de curvatura en la zona 2 durante los años 1986, 2000 y 2019. [Autor]

Los cambios en R_c en los distintos intervalos de tiempo se observan en especial en L2, donde se presenta una tendencia a disminuir su radio de curvatura; L1 y L3 varían ligeramente respecto a este mismo parámetro. SI en cambio tiene importantes variaciones en L1 y L2, mientras que en L3 permanece casi constante; en L2 existe una tendencia a aumentar SI (ver Figura 4.6 y Figura 4.7). En esta sección el SI promedio es de 1.28, mientras que R_c promedia 218.1 metros.

Tabla 4.4 Radios de curvatura e índices de sinuosidad para la Zona 2 en los años 1986, 2000 y 2019. [Autor]

SECCIÓN	1986		2000		2019	
	R_c	SI	R_c	SI	R_c	SI
L1	304	1.43	246	1.14	320	1.19
L2	338	1.35	125	1.15	250	1.60
L3	136	1.21	297	1.2	95	1.25
L4	161	1.42	301	1.36	150	1.23
L5	-	-	110	1.12	-	-
Promedio	234.75	1.35	215.8	1.19	203.75	1.32

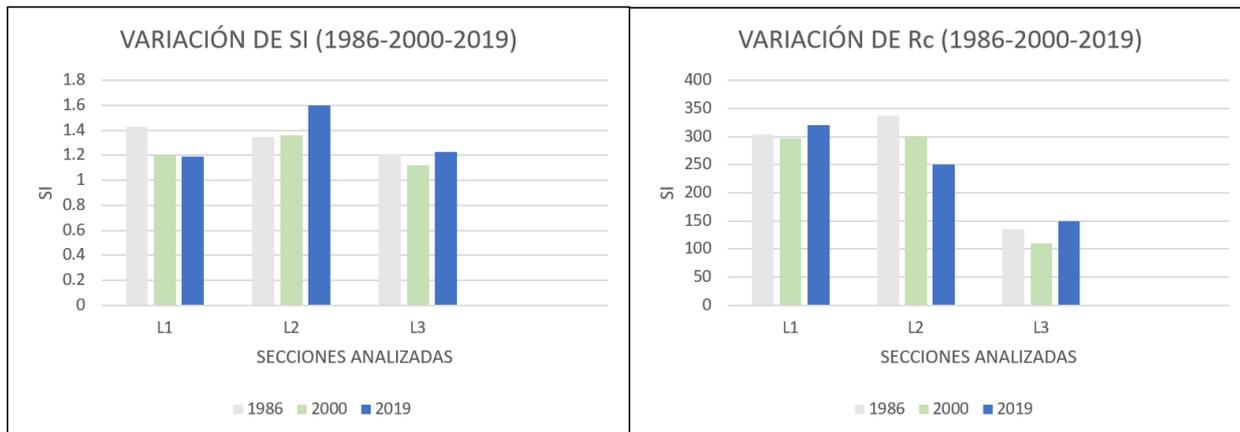


Figura 4.7 Variación de SI y Rc en las secciones L1, L2, L3, L4 desde 1986-2019 en la Zona 2. [Autor]

4.2.3 ZONA 3

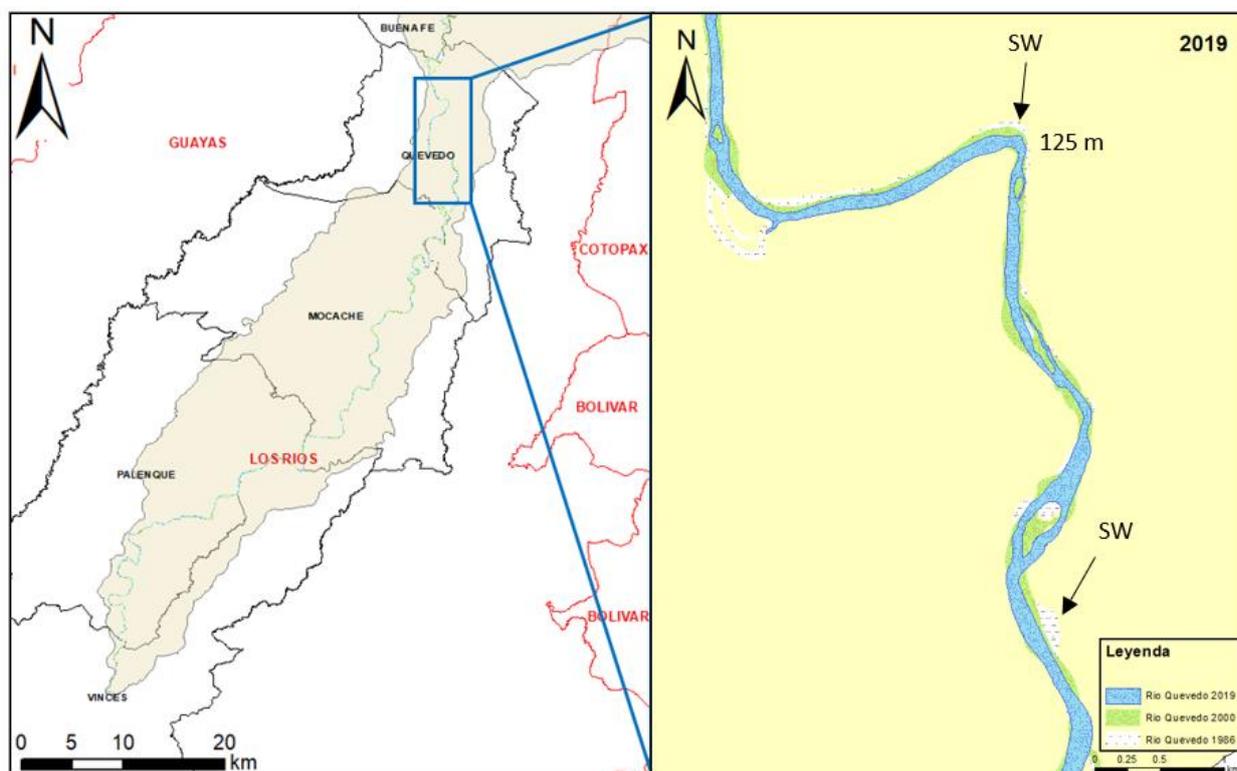


Figura 4.8 Variación de la morfología del río Quevedo en el intervalo de tiempo 1986 -2019 en la zona 3. [Autor]

Esta zona comprende desde el km 23 hasta el 30 y se localiza al sur de la ciudad de Quevedo. Presenta poca variación en comparación a las dos zonas analizadas anteriormente, sin embargo, puede observarse desplazamientos del canal con orientación suroeste en 2 secciones del canal del río de hasta 125 m (ver Figura 4.8).

Además, en la parte noroeste se observa que el río abandonó un cauce, orientándose hacia el Este.

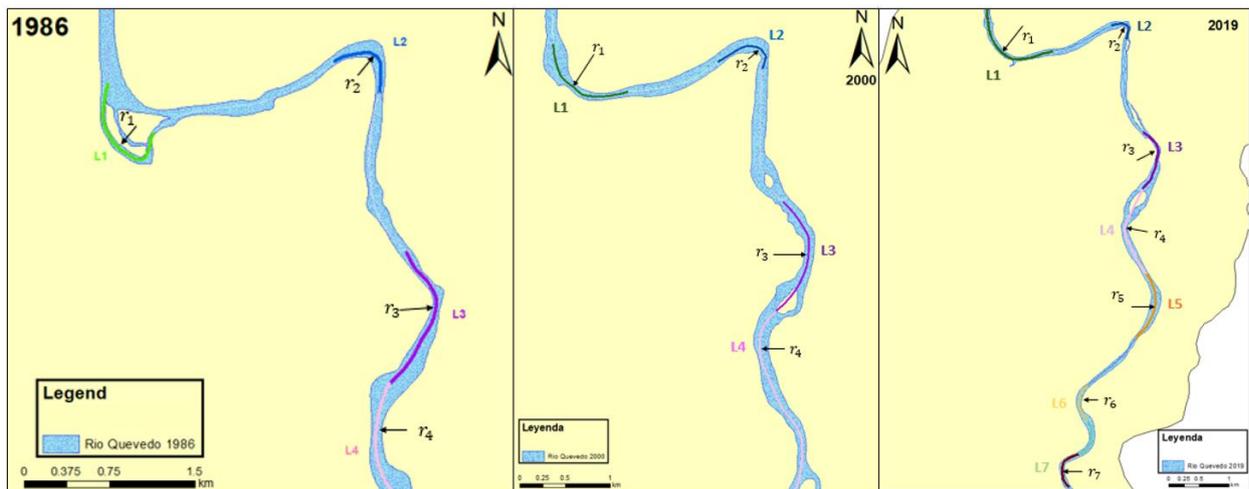


Figura 4.9 Radio de circularidad en la zona 3 durante los años 1986, 2000 y 2019. [Autor]

La Tabla 4.5 deja en evidencia que esta zona ha tenido grandes cambios respecto a R_c . No obstante, no se evidencian grandes variaciones en cuánto a SI a excepción de L1 (ver Figura 4.9). Esta área en cuestión tiene un promedio SI y R_c de 1.31 y 313.16 m respectivamente.

Tabla 4.5 Radios de circularidad e índices de sinuosidad para la Zona 2 en los años 1986, 2000 y 2019. [Autor]

SECCIÓN	1986		2000		2019	
	R_c	SI	R_c	SI	R_c	SI
L1	171	1.87	475	1.21	595	1.30
L2	183	1.5	140	1.57	120	1.53
L3	263	1.16	415	1.17	237	1.18
L4	430	1.04	385	1.10	350	1.11
Promedio	261.75	1.39	353.75	1.26	325.5	1.28

Los cambios en R_c en los distintos intervalos de tiempo se observan en especial en L1, sin embargo, no existe una tendencia definida; SI en cambio presenta una tendencia a aumentar conforme avanzan los años. L2, L3 y L4 se presentan casi invariables respecto a R_c mientras que SI varía con una tendencia a disminuir a excepción de L3 (ver Figura 4.10).

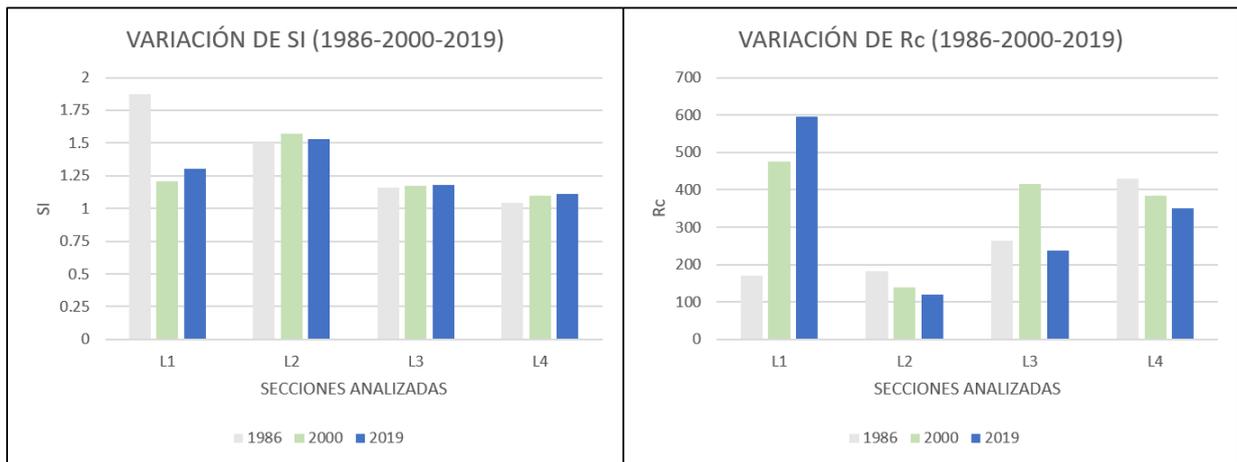


Figura 4.10 Variación de SI y Rc en las secciones L1, L2, L3, L4 desde 1986-2019 en la Zona 3. [Autor]

4.2.4 ZONA 4

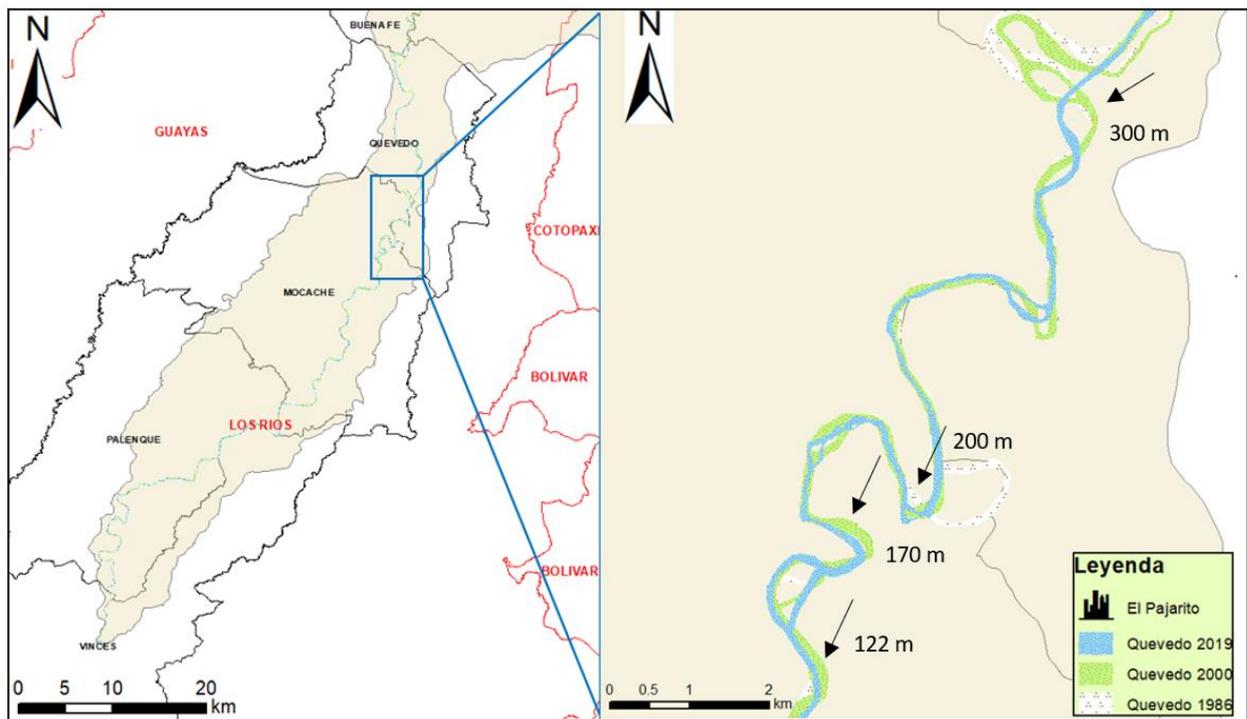


Figura 4.11 Variación de la morfología del río Quevedo en el intervalo de tiempo 1986 -2019 en la zona 4. [Autor]

Esta zona comprende desde el km 30 hasta el 70 aproximadamente. El principal cambio se evidencia en el cierre de meandros localizados al noreste y centro de la Figura 4.1, además de desplazamientos en el cauce del río Quevedo en dirección suroeste en diferentes sectores. Estos desplazamientos han alcanzado distancias entre 122 y 300 m.

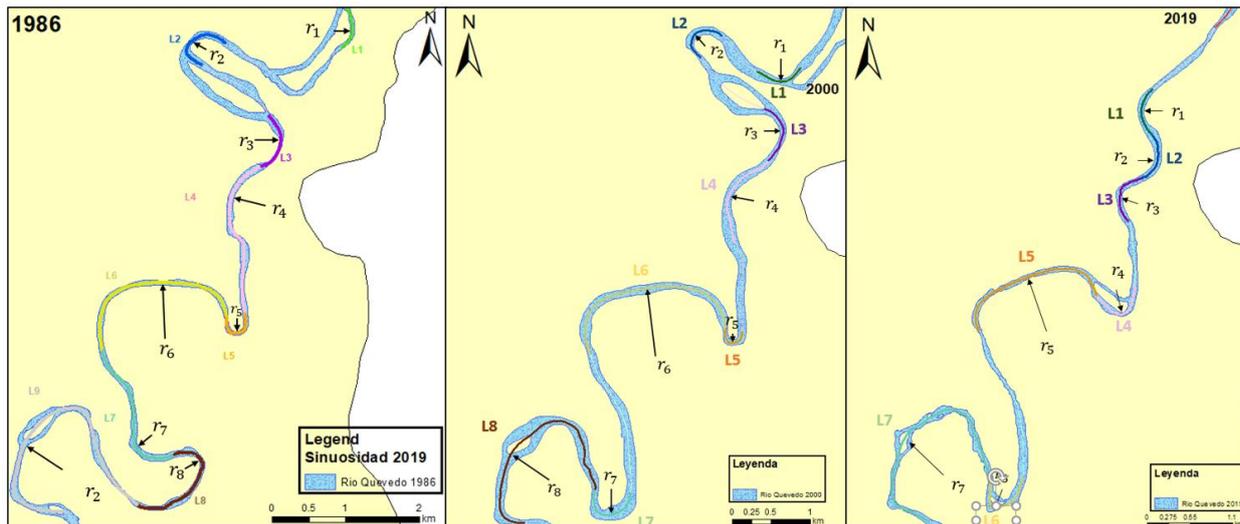


Figura 4.12 Radio de circularidad en la zona 3 durante los años 1986, 2000 y 2019. [Autor]

En la Figura 4.12 se observan los R_c estimados para esta última zona de estudio. Se evidencia que esta zona ha tenido grandes cambios respecto a este parámetro debido al abandono de los dos meandros mencionados en cuestión. La sección L6 y L8 muestran una particularidad contraria al comportamiento de los meandros, en lugar de cerrarse, buscando adquirir la forma de “herradura” característica de este proceso, se han desplazado en dirección Suroeste.

Tabla 4.6 Radios de circularidad e índices de sinuosidad para la Zona 2 en los años 1986, 2000 y 2019. [Autor]

SECCIÓN	1986		2000		2019	
	R_c	SI	R_c	SI	R_c	SI
L2	230	2.18	200	1.96	310	1.16
L3	335	1.25	261	1.25	215	1.31
L4	456	1.10	370	1.16	196	1.41
L5	135	2.63	124	2.16	760	2.43
L6	830	1.49	854	1.52	180	3.30
L7	276	1.96	230	1.97	630	3.29
L8	605	3.77	535	3.02	-	-
Promedio	409.57	2.05	367.71	1.86	381.83	2.15

La Tabla 4.5 y la Figura 4.13, muestran la variación de R_c sin una tendencia específica a excepción de L5 que ha muestra valores en descenso conforme avanzan los años. Por su parte **SI** ha variado en gran medida especialmente a partir de L3. Específicamente en L4 y L5 dónde se producen los mayores cambios en **SI**.

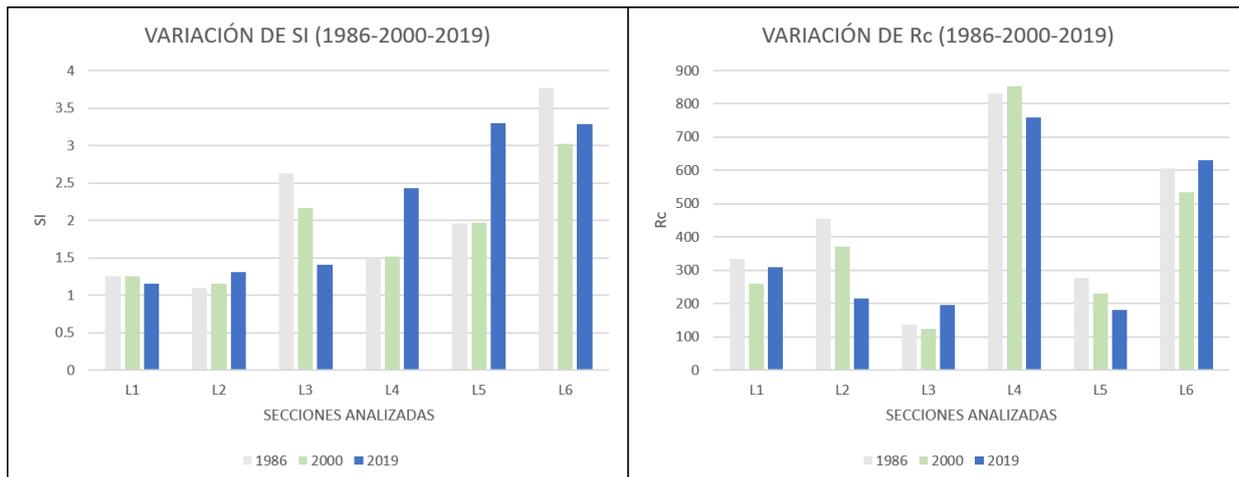


Figura 4. 13 Variación de SI y Rc en las secciones L1, L2, L3, L4 desde 1986-2019 en la Zona 4. [Autor]

4.2.5 SINUOSIDAD DEL RÍO QUEVEDO

Una vez se han determinado los índices de sinuosidad, y a través de la clasificación de los ríos en base a este parámetro (ver Tabla 4.7), se obtuvo para las 4 zonas analizadas en los años propuestos un esquema sinusoidal del río Quevedo (ver Figura 4.10).

Tabla 4.7 Rangos de índices de sinuosidad estimados para las 4 zonas analizadas del río Quevedo en el intervalo de tiempo 1986-2000-2019. [Autor]

Clasificación	Porcentaje		
	1986	2000	2019
-			
Straight	25.02	19.88	15.75
Winding	32.17	43.84	42.18
Twisty	21.85	15.76	21.96
Meandering	20.96	20.52	20.11

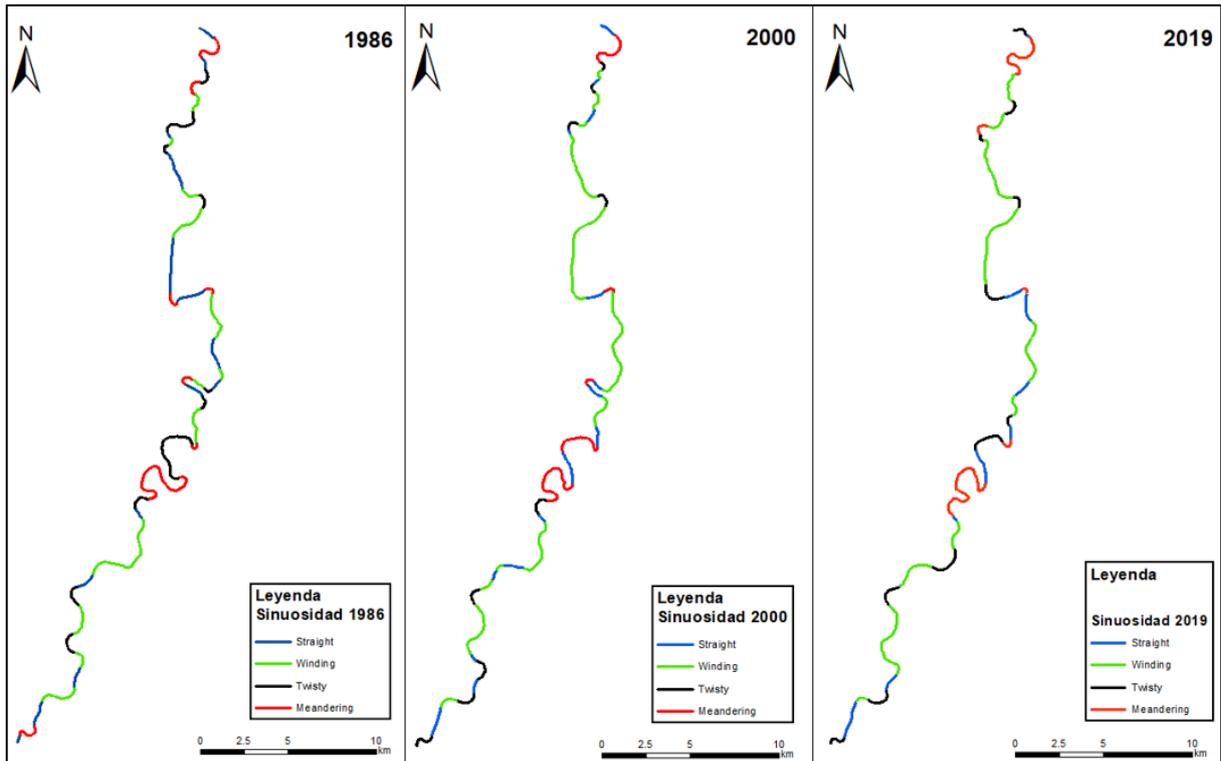


Figura 4.14 índices de sinuosidad estimados para las 4 zonas de estudio propuestas. [Autor]

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 PARÁMETROS ASOCIADOS A LA CUENCA

Los parámetros morfológicos de la cuenca del río Quevedo han sido calculados y los resultados son discutidos a continuación:

La cuenca del río Quevedo forma parte de la gran cuenca del río Guayas, tiene un área de 4268 km² alcanzando una altura mínima de 18 m. y máxima de 4030 m. En base a sus parámetros morfológicos (Ver tablas 4.1 y 4.2) se define como una cuenca de sexto orden, con drenajes detríticos sub-paralelos y alargada. Esta última característica se ve sustentada por los valores obtenidos para R_e , R_{ci} , F_f : 0.47, 0.25 y 0.17 respectivamente. F_f a su vez aporta información referente al estado de la cuenca, asignándole una etapa madura, lo que a su vez es corroborado para la forma sinusoidal de la curva hipsométrica. D_d y F_s indica que la cuenca hidrográfica es moderada y eficiente transportando los caudales de agua, con altos volúmenes de escurrimiento lo que implica una erosión moderada en su entorno (Fuentes, 2004). El valor de T según Smith (1950), indica que la cuenca se encuentra dominada por texturas intermedias. En este sentido Howard (1967) indica que arenas y limos son materiales propias de este tipo de textura en redes de drenaje moderadamente ramificadas.

5.2 PARÁMETROS ASOCIADOS AL RÍO QUEVEDO

Los parámetros estimados para el río Quevedo en las Zonas 1, 2, 3 y 4 fueron SI y R_c

La principal característica en el área de estudio es el desplazamiento de los canales y meandros del río Quevedo en dirección suroeste. Estos desplazamientos, que pueden ser observados en las Figuras 4.2, 4.5, 4.8 y 4.11, provocaron que, SI y R_c se modifiquen en la gran mayoría de los casos sin tendencia alguna. Estos cambios pueden estar asociados a diversos factores, los cuales se describen a continuación

Lineamientos del cuaternario

Dumont et al. (2007) propuso que durante el cuaternario aparecieron lineamientos que modificaron la red de drenaje de la parte baja de la cuenca del Guayas. Estos lineamientos presentan dos direcciones en específico, la primera en tendencia NO-SE y

la otra en dirección NE-SO (Ver figura 1.3). El área de estudio se encuentra entre dos lineamientos con dirección NE-SO, aunque no es atravesada por ninguno de ellos. A pesar de lo expuesto, es posible que existan más lineamientos entre los dos mencionados, puesto que hay tendencias en el río que siguen la misma dirección (canales y meandros desplazados hacia el SO). Además, al sur de la ciudad de Quevedo, el cauce del río modifica su dirección hacia el S, adquiriendo posterior a esta, una orientación hacia el SO.

Los grandes aportes de fluido al caudal del río Quevedo

Según Alonso et. al (2011) un solo proceso tormentoso con intensas precipitaciones puede marcar tasas erosivas extraordinarias. Durante la estación lluviosa o durante fenómenos climáticos como “El Niño”, existe un gran aporte al caudal del río Quevedo, lo que podría aumentar la tasa de erosión. Debido a las características de la cuenca (**T**), específicamente a su litología, se tiene conocimiento que la composición es principalmente arenas, limos y arcillas, los cuales son fácilmente erosionables especialmente en zonas no cubiertas por vegetación. Todos estos factores pudieron haber facilitado la erosión del suelo, modificando el cauce del río Quevedo.

Acción Antrópica

El río Quevedo ha sido expuesto a distintas acciones antrópicas a través del tiempo. En el estudio realizado por Proaño (2006) se afirma que los depósitos aluviales del río Quevedo han sido objeto de explotación, especialmente para obras ingenieriles; El Ministerio de Trabajo y obras Públicas en 2011 ejecutó la construcción, 3 km al norte de la ciudad de Quevedo, del Anillo Vial Quevedo Tramo II, abarcando una extensión de 27 km; El crecimiento urbano de las poblaciones en el entorno del río Quevedo. El Instituto Nacional de Estadística y Censos en el año indica que las poblaciones de Quevedo y Mocache, desde el año 2001 hasta el año 2010, han aumentado 33810 y 5160 habitantes respectivamente

Las acciones humanas descritas se ejecutan en un perímetro cercano a las zonas que mayor variación a través del tiempo han tenido, estableciendo una posible relación directa entre estas y la morfología del río Quevedo. Estudios realizados corroboran que el ser humano impacta en evolución morfológica de los ríos, así Alonso et al. (2011) afirma que las tasas de erosión geológica natural son sostenibles para la naturaleza, sin

embargo, las acciones de los seres humanos impactan directamente en su aumento por lo que cualquier alteración del equilibrio físico y biológico pueden modificar dichas tasas de erosión. Por su parte por Borzi (2018) revela que las acciones antrópicas tienen una influencia local, en específico las obras viales las cuales restringen el ancho de la llanura de inundación afectando al escurrimiento superficial en la cuenca. Finalmente Harden (2006) explica el impacto del ser humano en la morfología de los ríos, asegura que la deforestación, agricultura, carreteras y urbanizaciones incrementan la proporción de lluvia a los flujos de la red de drenaje durante las tormentas, brindando a este flujo la energía para erosionar y mover finos sedimentos.

Todas estas acciones en conjunto pueden ser las posibles causantes de que el río Quevedo muestre esta morfología cambiante en las 4 zonas analizadas.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Existen 4 zonas con importantes variaciones en la morfología del río Quevedo que podrían estar asociadas a posibles lineamientos estructurales localizados al norte de la zona de estudio, periodos de altas precipitaciones o la acción del ser humano en la naturaleza.
- El río Quevedo ha mostrado una tendencia durante los últimos 20 años a disminuir su régimen “Straight” y aumentar el régimen “Winding” como resultado del abandono de los grandes meandros. Se espera que este régimen se mantenga en los próximos años.
- Los cambios en la morfología de los ríos se producen de manera natural, sin embargo, pueden ser acelerados por factores antrópicos relacionados al desarrollo de la sociedad.
- La cuenca del río Quevedo por sus características pertenece a la parte baja de la zona de transferencia puesto que puede evidenciarse extensas zonas de acumulación de sedimentos y llanuras de inundación. Además, en base a los parámetros morfológicos calculados se define como una cuenca de sexto orden, madura y es alargada con lavabos largos y angostos.
- Referente a los métodos de extracción de las masas de agua se comprobó que el NDWI y MNDWI presentan resultados más exactos y fáciles de tratar que los otros índices mencionados. El MNDWI presenta mejores resultados en el entorno de las áreas urbanas, sin embargo, aporta información ambigua en ciertas zonas alejadas a estas.

6.2 RECOMENDACIONES

- La principal limitante al momento de la ejecución de este proyecto es la obtención de una base de datos con la menor nubosidad posible en el área de estudio, por lo que se recomienda obtener imágenes satelitales con una nubosidad menor al 20%.

- Los índices de obtención de las masas de agua pueden ser utilizados simultáneamente como herramienta complementaria en la delimitación de estas.
- La delimitación de los cuerpos de agua debe ser complementada por una supervisión manual por parte del usuario, debido al error que se pueden generar por la calidad de información disponible.

BIBLIOGRAFÍA:

- 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>
- Alonso, J., Bermúdez, F., & Rafaelli, S. (2011). La degradación de los suelos por erosión hídrica. Métodos de estimación (Editum (ed.)).
- 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.
- Basile, P. A. (2018). Transporte de sedimentos y morfodinamica de rios aluviales. In Biomass Chem Eng.
- Borzi, G. (2018). INFLUENCIA DE LA ACTIVIDAD ANTRÓPICA EN LA GEOHIDROLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO SAMBOROMBÓN. <http://www.elsevier.com/locate/scp>
- 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.
- Chuvieco, E. (2008). Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio. (3era edición).
- Collot, J. Y., Michaud, F., Alvarado, A., Marcaillou, B., Sosson, M., Ratzov, G., Migeon, S., Calahorrano, A., & Pazmino, A. (2009). Visión general de la morfología submarina del margen convergente de Ecuador - Sur de Colombia: implicaciones sobre la transferencia de masa y la edad de la subducción de la Cordillera de Carnegie. *Geología y Geofísica Marina y Terrestre Del Ecuador Desde La Costa Continental Hasta Las Islas Galápagos*, January, 47–74.

- Crist, E. P. (1985). A TM Tasseled Cap Equivalent Transformation for Reflectance Factor Data *. *Remote Sensing of Environment*, 17(3), 301–306.
- Danaher, T., & Collet, L. (2006). Development, optimisation and multi-temporal application of a simple Landsat based water index. In *Proceedings of the 13th Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference*, Vol. 29.
- Denore, B., & López García, M. (1999). Los satélites de observación de la tierra en el 2000. In *Cuadernos de geografía* (Issue 65, pp. 81–102). <https://doi.org/10.7203/CGUV.65-66.14562>
- Dumont, J.-F., Martillo, C., & Navarrete, E. (2010). Informe científico del proyecto: ríos y paleo-ríos (RIPAR) en la cuenca baja del Guayas. June 2014.
- 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.
- Eke, E. C., Czapiga, M. J., Viparelli, E., Shimizu, Y., Imran, J., Sun, T., & Parker, G. (2014). Coevolution of width and sinuosity in meandering rivers. *Journal of Fluid Mechanics*, 760, 127–174. <https://doi.org/10.1017/jfm.2014.556>
- Faustino, J., & Jimenez, F. (2000). *Manejo De Cuencas Hidrograficas* (p. 35).
- Feininger, T., & Bristow, C. R. (1980). Cretaceous and Paleogene geologic history of coastal Ecuador. *Geologische Rundschau*, 69(3), 849–874. <https://doi.org/10.1007/BF02104650>
- Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Remote Sensing of Environment Automated Water Extraction Index : A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
- Fisher, A., Flood, N., & Danaher, T. (2016). Remote Sensing of Environment Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. *Remote Sensing of Environment*, 175, 167–182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.055>

- 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)
- Fuentes, J. (2004). Análisis morfométrico de cuencas: Caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancítaro. Instituto Nacional de Ecología, 1–47. http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/morfometria_pico_tancitaro.pdf
- 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>
- Gutierrez, M. (2008). *Geomorfología*. Pearson.
- 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>
- Hewlett, J. (1982). *Principles of forest hydrology*. University of Georgia press.
- Hooke, J. M., & Yorke, L. (2011). Channel bar dynamics on multi-decadal timescales in an active meandering river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(14), 1910–1928. <https://doi.org/10.1002/esp.2214>
- 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)

- Howard, A. (1967). Drainage Analysis in Geologic Interpretation: A Summation. *AAPG Bulletin*, 51, 2246–2259. <https://doi.org/10.1306/5d25c26d-16c1-11d7-8645000102c1865d>
- Huete, A. R., Liu, H. Q., Batchily, K., & Leeuwen, W. Van. (1995). A Comparison of Vegetation Indices over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 4257(Table 1).
- Ibáñez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. (2010). Morfología de las cuencas hidrográficas. Universidad Politécnica de Valencia, 12.
- IGM. (1979a). 62.- Hoja geológica Valencia, escala 1 100.000.pdf.
- IGM. (1979b). 67.- Hoja geológica El Empalme - escala 1 100.000.pdf.
- Ikeda, S., Parker, G., & Sawai, K. (1981). Bend theory of river meanders. Part 1. Linear development. *Journal of Fluid Mechanics*, 112, 363–377. <https://doi.org/10.1017/S0022112081000451>
- INAMHI. (2012). Cuencas Hidrográficas del Ecuador. 2012.
- Jaillard, É., Ordoñez, M., Benitez, S., Berrones, G., Jiménez, N., Montenegro, G., & Zambrano, I. (1995). Basin Development in an Accretionary, Oceanic-Floored Fore-Arc Setting: Southern Coastal Ecuador During Late Cretaceous-Late Eocene Time in A. J. Tankard, R. Suárez S., and H. J. 1 Welsink, *Petroleum basins of South America*. AAPG Memoir 62., 615–631.
- 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.
- Mejía, V. (2018). PROCESOS DE URBANIZACIÓN Y MORFOLOGÍA URBANA EN ECUADOR : La evolución de los usos del suelo a la luz de la imagen satelital nocturna de la Tierra 1992-2018.
- 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>
- Muñoz, L. F. (2007). Manejo de Cuencas Hidrográficas Tropicales (C. . 17-33 P (ed.); Cce-Loja). Editorial “Gustavo A. Serrano.
- Muñoz, L., & Guaranda, K. (2008). Evolucion holocena de la red de drenaje Cuenca del Guayas.
- Munro, S. E. (2010). El río y la forma: Introducción a la geomorfología fluvial. (R. Editores (ed.)).

- 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
- Ollero, A. (2008). ALGUNOS APUNTES SOBRE LA DINÁMICA FLUVIAL: LOS RÍOS ACTUALES COMO RESULTADO DE SU PROPIA LIBERTAD Y DE LA INTERVENCIÓN HUMANA EN SUS RIBERAS. January. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2414.1843>
- 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. *Internation Journal of Remote Sensing*, 27(November 2012), 3153–3181. <https://doi.org/10.1080/01431160500309934>
- Pal, R., & Pani, P. (2019). Remote sensing and GIS-based analysis of evolving planform morphology of the middle-lower part of the Ganga River, India. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.01.007>
- Pazmiño, F. L. (2016). Aplicación de imágenes satelitales en procesos físico-urbanos. Caso de estudio: Crecimiento Urbanístico de Quito (Ecuador) año 1991 a 2000. April.
- Perez, C., & Muñoz, A. (2006). Teledeteccion: 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.
- PRONAREG. (1983). Quevedo: Mapa Morfo - Pedológico. https://esdac.jrc.ec.europa.eu/images/Eudasm/latinamerica/images/maps/download/ec13009_6so.jpg
- 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>

- Ramakrishna, B. (1997). Estrategias de extensión para el manejo integrado de cuencas hidrográficas: conceptos y experiencias. In IICA.
- Reyes, P., & Michaud, F. (2012). Mapa Geológico del Margen Costero Ecuatoriano.
- Richards, K. (1987). Fluvial Geomorphology. *Progress in Physical Geography*. 11, 432–457.
- 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.
- Rossel, F., Cadier, E., & Gómez, G. (1996). Las Inundaciones en la zona costera Ecuatoriana: Causas; obras de protección existentes y previstas. *Bull. Inst. Fr. Études Andines*, 25(3), 399–420. https://www.researchgate.net/profile/Eric_Cadier/publication/26430989_Las_inundaciones_en_la_zona_costera_ecuatoriana_causas_---_obras_de_proteccion_existentes_y_previstas/links/0912f50bcdf4cd94a9000000.pdf
- Sánchez, E., Malavé, J., & Loor, J. (2020). RECONOCIMIENTO DE MEANDROS ABANDONADOS A LO LARGO DEL RÍO DAULE TRAMO (DAULE – BALZAR) A TRAVÉS DE PROCESAMIENTO GEOBIA.
- Sapkale, J. (2010). Brick kilns of Umbraj and its impact on the lower reaches of river Tarali. *International Journal of Environment and Development*, 7(1), 23–33.
- Sarma, J. N. (2005). Fluvial process and morphology of the Brahmaputra River in Assam, India. *Geomorphology*, 70(3-4 SPEC. ISS.), 226–256. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.02.007>
- Schumm, S. (1977). *The fluvial system*.
- 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)

Seminara, G. (2006). Meanders. *Journal of Fluid Mechanics*, 554, 271–297.
<https://doi.org/10.1017/S0022112006008925>

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

Shahrood, A. J., Menberu, M. W., Darabi, H., Rahmati, O., Rossi, P. M., Kløve, B., & Haghighi, A. T. (2020). RiMARS: An automated river morphodynamics analysis method based on remote sensing multispectral datasets. *Science of the Total Environment*, 719. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137336>

Smith, K. G. (1950). Standards for grading texture of erosional topography. In *American Journal of Science* (Vol. 248, Issue 9, pp. 655–668).
<https://doi.org/10.2475/ajs.248.9.655>

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

Solano, T., & Vintimilla, N. (2013). Estudio Fluviomorfológico Del Río Vinces Y Determinación De Las Áreas De Inundación De La Zona De Influencia Del Proyecto Pacalori Aplicando Hec- Georas. In *Tesis de grado* (Vol. 31, Issue sup3.2).

Strahler, A. N. (1952). HYPSONETRIC (AREA-ALTITUDE) ANALYSIS OF EROSIONAL TOPOGRAPHY. *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>

- Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B. Ö., Floury, N., Brown, M., Traver, I. N., Deghaye, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L'Abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., ... Rostan, F. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 9–24. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>
- 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)
- Wang, Z., Li, H., & Cai, X. (2018). Remotely sensed analysis of channel bar morphodynamics in the middle Yangtze River in response to a major monsoon flood in 2002. *Remote Sensing*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/rs10081165>
- Williams, D. L., Goward, S., & Arvidson, T. (2006). Landsat : Yesterday , Today , and Tomorrow. 72(10), 1171–1178.
- Winter, T., Avouac, J. -P, & Lavenu, A. (1993). Late Quaternary kinematics of the Pallatanga strike-slip fault (Central Ecuador) from topographic measurements of displaced morphological features. *Geophysical Journal International*, 115(3), 905–920. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1993.tb01500.x>
- Wohl, E. (2014). Time and the rivers flowing: Fluvial geomorphology since 1960. *Geomorphology*, 216, 263–282. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.012>
- Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., Crawford, C. J., Masek, J. G., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., Belward, A. S., Cohen, W. B., Dwyer, J., Erb, A., Gao, F., Griffiths, P., Helder, D., Herмосilla, T., Hipple, J. D., Hostert, P., Hughes, M. J., ... Zhu, Z. (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225(November 2018), 127–147. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>
- 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>

- Yousefi, S., Mirzaee, S., Keesstra, S., Surian, N., Pourghasemi, H. R., Zakizadeh, H. R., & Tabibian, S. (2018). Effects of an extreme flood on river morphology (case study: Karoon River, Iran). *Geomorphology*, 304, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.034>
- Zambrano, E. (1986). El Fenómeno de “El Niño” y la oscilación Sur (ENSO). INOCAR.
- 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.
- Zhang, W., Xu, Y., Hoitink, A. J. F., Sassi, M. G., & Zheng, J. (2015). SC. *Marine Geology*. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.02.012>