



Pontificia Universidad
Católica del Ecuador

SEDE
ESMERALDAS

ESCUELA DE GESTIÓN AMBIENTAL

TESIS DE GRADO

CLASIFICACIÓN TIPOLOGICA DE LOS RÍOS DE LA CUENCA DEL RÍO ESMERALDAS

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DE TÍTULO DE
INGENIERA EN GESTIÓN AMBIENTAL**

AUTORA

MARGY GISSELL MACÍAS ZAMBRANO

ASESOR

PhD. JON MOLINERO ORTÍZ

Esmeraldas – Junio, 2018

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Trabajo de tesis aprobado luego de haber dado el cumplimiento a los requisitos exigidos por el reglamento de grado de la PUCE-SE previo a la obtención del título de Ingeniera en Gestión Ambiental.

Presidente Tribunal de Graduación

Lector1

Mgt. Fredy Quiroz Ponce

Lector2

PhD. Olga Carnicer Castaño

Coordinador de la Escuela Gestión Ambiental

PhD. Jorge Velazco Vargas

Director de Tesis

PhD. Jon Molinero Ortíz

Esmeraldas,....de.....2018

AUTORÍA

Yo, Margy Gissell Macías Zambrano, declaro que la presente investigación enmarcada en el actual trabajo de tesis es absolutamente original, auténtica y personal.

En virtud que el contenido de esta investigación es de exclusiva responsabilidad legal y académica del autor y de la PUCESE.

Margy Gissell Macías Zambrano

C.I. 080227204-7

AGRADECIMIENTO

Agradezco a las personas que me ayudaron a finalizar el trabajo investigativo, de manera muy especial a mi tutor Jon Molinero quien con paciencia impartió y brindó sus conocimientos y tutorías para el desarrollo exitoso de la investigación. Y por último pero no menos importante al especialista en SIG el Ingeniero Francisco quien trabaja en el Gobierno Autónomo Descentralizado de la provincia de Esmeraldas y aportó con su experiencia en gran parte para la realización de los resultados. Cada uno de ellos fue una guía importante en todas las etapas de la investigación de mi tesis.

También agradezco a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Esmeraldas, por ayudarme y facilitarme las herramientas para mi formación profesional.

DEDICATORIA

Dedico la culminación de mi carrera a aquellas personas que han estado incondicionalmente conmigo en toda la etapa de mi carrera universitaria, especialmente a mis padres Eddy Macías y Ana Zambrano quienes con esfuerzo, cariño y dedicación me impulsaron a conseguir esta anhelada meta en mi vida.

A mis hermanos quienes supieron entender cada día, el trabajo y sacrificio que conlleva mi formación profesional y en futuro superen mis logros.

Índice

Índice

AUTORÍA.....	iii
AGRADECIMIENTO	iv
DEDICATORIA	v
ABREVIATURAS.....	viii
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
Introducción:	1
Presentación del tema de investigación	1
Justificación del estudio	2
Objetivos.....	2
Objetivo General	2
Objetivos específicos.....	2
CAPITULO I: MARCO TEÓRICO	3
Bases teóricas científicas	3
Antecedentes:	6
Marco legal:.....	7
CAPITULO II: MATERIALES Y MÉTODOS	9
AREA DE ESTUDIO	9
GENERACIÓN DEL MAPA DE DRENAJE	9
Delimitación de la cuenca.....	9
Modelo digital de elevación.....	10
Análisis hidrológico de la cuenca del río Esmeraldas.....	10
DESCRIPTORES DE LOS CAUCES FLUVIALES	12
Orden.....	12
Elevación y pendiente media.....	12
Temperatura media anual.....	12
Vegetación alrededor del cauce.....	12
DESCRIPTORES DE LAS CUENCAS DE DRENAJE	13
Sustrato geológico.....	13
Precipitación anual.....	13

ANÁLISIS DE LAS VARIABLES Y CLASIFICACION TIPOLOGICA.....	14
Análisis de frecuencias	14
Análisis de componentes principales (ACP)	14
Clasificación por k-medias.....	14
Delimitación de las tipologías y creación del mapa	14
CAPITULO III: RESULTADOS.....	15
Orden.....	15
Temperatura media anual	16
Vegetación:	20
Elevación media	22
Pendiente media	24
Precipitación anual	27
Sustrato geológico	30
Análisis de componentes principales (ACP)	33
Clasificación por el método k-medias	37
CAPITULO IV: DISCUSIÓN.....	42
CAPITULO V: CONCLUSIONES	44
CAPITULO VI: RECOMENDACIONES	45
Bibliografía.....	46

ABREVIATURAS

SIG: Sistemas de Información Geográficos

DMA: Directiva del Marco del Agua de la Unión Europea

MAE: Ministerio del Ambiente del Ecuador

SNI: Sistema Nacional de Información

IGM: Instituto Geográfico Militar

MDE: Modelo Digital de Elevación

TIN: siglas en inglés que significan “Triangular Irregular Network”

QGIS: QGIS (anteriormente llamado también Quantum GIS) es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código libre para plataformas GNU/Linux, Unix, Mac OS, Microsoft Windows y Android.

SAGA: (acrónimo inglés de System for Automated Geoscientific Analyses o Sistema para Análisis Automatizados Geocientíficos en español) es un software híbrido de información geográfica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de la cuenca del río Esmeraldas.	9
Figura 2. Modelo digital de elevación de la cuenca del Río Esmeraldas a escala 1:1.500.00.....	10
Ilustración 3. Dirección de flujo de la red de drenaje de la cuenca del Río Esmeraldas a escala 1:1.500.000.....	11
Figura 4. Red de drenaje de la cuenca del Río Esmeraldas.....	15
Figura 5. Mapa de temperatura media anual de la cuenca del Río Esmeraldas a escala 1:1.500.000.....	17
Figura 6. Frecuencia relativa porcentual de la temperatura, según el orden del río.....	19
Figura 7. Mapa de vegetación de la cuenca del río Esmeraldas a escala 1:1.500.000	20
Figura 8. Frecuencia relativa porcentual de la geología según el orden de río.....	22
Figura 9. Mapa de elevación media de los cauces de la cuenca del río Esmeraldas	23
Figura 10. Frecuencia relativa porcentual de la elevación según el orden de río	24
Figura 11. Mapa de pendiente media de la cuenca del Río Esmeraldas a escala 1:1.500.000	25
Figura 12. Frecuencia de pendiente según el orden de río	27
Figura 13. Mapa de Isoyetas de la cuenca del Río Esmeraldas a escala 1:1.500.000	28
Figura 14. Frecuencia de la temperatura clasificada según el orden de río.	30
Figura 15. Mapa del sustrato geológico de la cuenca del Río Esmeraldas a escala 1:1.500.000.....	31
Figura 16. Frecuencia de la geología según el orden de río	33
Figura 17. Componente 1	36
Figura 18. Componente 2	36
Figura 19. Componente 3	36
Figura 20. Componente 4	36
Figura 21. Componente 5	36
Figura 22. Componente 6	36
Figura 23. Porcentaje de la variabilidad total explicado por la variabilidad entre clases para un número creciente de clases	37
Figura 24. Diagrama de caja de las variables ambientales de la cuenca del Río Esmeraldas.....	38
Figura 25. Diagrama de caja de la vegetación de la cuenca del Río Esmeraldas	39
Figura 26. Diagrama de caja de la geología de la cuenca del Río Esmeraldas	39
Figura 27. Mapa de tipología de la cuenca del Río Esmeraldas	40

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Número de tramos fluviales que hay en cada orden	16
Tabla 2. Análisis de componentes principales de las variables de estudio para la tipología de ríos de la cuenca Esmeraldas.....	35
Tabla 3. Clasificación tipológica de los ríos de la cuenca del Río Esmeraldas	41

TITULO

CLASIFICACIÓN TIPOLOGICA DE LOS RÍOS DE LA CUENCA DEL RÍO ESEMRALDAS.

RESUMEN

Este estudio tuvo como objeto elaborar una propuesta de clasificación tipológica de los ríos de la cuenca del río Esmeraldas. Para ello, se realizó mediante procedimientos SIG, el Modelo Digital de Elevación de la cuenca de estudio el cual permitió crear la red de drenaje y realizar el análisis hidrológico de la cuenca.

Siguiendo la sugerencia de la Directiva del Marco del Agua de la Unión Europea se establecieron las variables para el estudio temperatura media anual (°C), precipitación anual (mm), elevación media (m), pendiente media (m/m), bosque semideciduo (%), bosque siempreverde (%), matorral seco (%), matorral húmedo (%), páramo (%), no identificado (%), volcánico (%), mixto (%), calcáreo (%) y silíceo con los cauces de orden 4 o superior. Con la información obtenida de cada una de las variables se realizaron análisis estadísticos de frecuencias representados con gráficos y figuras, análisis de componentes principales y k-medias los cuales permitieron tener como resultado un mapa final de 6 tipologías, un número pequeño a pesar de que la cauce del río Esmeraldas cuenta con gran diversidad ya que sus cauces abarcan parte de la región costa y sierra.

PALABRAS CLAVES:

Modelo digital de elevación, cuenca, red de drenaje, tipología, Directiva del Marco de Agua, variables ambientales, cluster, análisis de componentes principales, k-medias.

TITLE

TYPOLOGICAL CLASSIFICATION OF THE RIVERS OF THE RIVER BASIN ESEMRALDAS.

ABSTRACT

The purpose of this study was to prepare a typological classification proposal for the rivers of the Esmeraldas river basin. To do this, the Digital Elevation Model of the study basin was created using GIS procedures, which allowed creating the drainage network and carrying out the hydrological analysis of the basin.

Following the suggestion of the Water Framework Directive of the European Union, the variables for the study were established: annual average temperature (°C), annual precipitation (mm), average elevation (m), average slope (m / m), semi-deciduous forest (%), evergreen forest (%), dry scrub (%), wet scrub (%), wasteland (%), unidentified (%), volcanic (%), mixed (%), calcareous (%) and siliceous with the channels of order 4 or higher. With the information obtained from each of the variables, statistical analyzes of frequencies represented with graphs and figures, analysis of principal components and k-means were performed, which allowed to obtain as a result a final map of 6 typologies, a small number despite the fact that The Caunce of the Esmeraldas River has great diversity since its channels cover part of the coast and mountain region.

KEYWORDS:

Digital elevation model, basin, drainage network, typology, Water Framework Directive, environmental variables, cluster, principal component analysis, k-medias

Introducción:

Presentación del tema de investigación

Los seres humanos hemos utilizado los ríos y otras fuentes de agua dulce para el avance, desarrollo y bienestar de nuestras civilizaciones. A pesar de los beneficios que nos ha otorgado la utilización de estos cuerpos de agua, hemos modificado su morfología y contaminado sus cauces, ya sea por obras de infraestructura, por canalizaciones, reservorios, hidroeléctricas y tomas de agua (Encalada, 2013). Estos cambios han producido una fragmentación de los sistemas acuáticos con graves efectos sobre la biodiversidad acuática, las funciones y los servicios ecosistémicos que suministran. Los ríos son ecosistemas dinámicos, complejos e integradores que tienen múltiples conexiones longitudinales aguas arriba – aguas abajo, laterales con la cuenca hidrográfica y la vegetación de ribera y verticales con las aguas subterráneas y la precipitación (Encalada, 2013).

Considerando la importancia de los ríos como ecosistema y como recurso, en muchos países alrededor del mundo se han elaborado legislaciones estrictas sobre el uso, la conservación y la gestión de estos cuerpos de agua (Encalada, 2013). Sin embargo, en Ecuador, no hay aún una visión clara sobre la importancia de estos ecosistemas. La legislación actual que abarca la Constitución del Ecuador y la Ley de Recursos Hídricos regula estos cuerpos de agua sólo desde el punto de vista de la demanda, es decir, como un recurso pero no como un ecosistema que tiene diversas funciones que necesita ser investigado y conservado.

El presente estudio consistió en realizar una clasificación tipológica de los ríos de la cuenca del río Esmeraldas utilizando un Sistema de Información Geográfico (SIG). Estos programas juegan un papel fundamental en la integración de la información y en el procesamiento espacial que permite la extracción automática de las variables que se incluyeron en el análisis de la cuenca. Se utilizó información cartográfica para determinar la conectividad de los ríos y su caracterización morfológica mediante la metodología sugerida por la Directiva Marco del Agua (DMA) de la Unión Europea (Anexo II) sistema B, para desarrollar una clasificación tipológica que pueda extenderse a otras cuencas de la provincia de Esmeraldas y del país.

Justificación del estudio

Debido a la importancia que los ríos tienen para numerosas actividades productivas y de un desarrollo que ha causado impactos en estos cuerpos de agua, surge la necesidad de construir una propuesta de clasificación tipológica de los ríos, habiéndose elegido la cuenca del río Esmeraldas para este estudio debido a su gran extensión, vegetación y diversidad que consideramos suficiente para testar esta metodología.

Para la elaboración de esta propuesta se empleó una metodología similar a la propuesta en la DMA y con el apoyo de un SIG se construyó un modelo digital de elevación que permitió la clasificación de los ríos de la cuenca en tipos. Considerando que en la actualidad no existe una clasificación de este tipo para los ríos de la provincia de Esmeraldas o de Ecuador, este trabajo permitirá establecer una metodología que podrá utilizarse en otras cuencas regiones o a nivel nacional.

Objetivos

Objetivo General

Elaborar una propuesta de clasificación tipológica de los ríos de la cuenca del río Esmeraldas.

Objetivos específicos

- Construir un modelo digital de elevación en un programa de sistemas de información geográfica para determinar la conectividad de los ríos de la cuenca.
- Determinar variables descriptoras para realizar un análisis hidrológico de los ríos de la Cuenca del Río Esmeraldas.
- Realizar un análisis estadístico de las variables descriptoras reclasificadas para determinar el número de tipos de ríos que contiene la cuenca del Río Esmeraldas, elaborando un mapa con las tipologías obtenidas.

CAPITULO I: MARCO TEÓRICO

Bases teóricas científicas

Cuenca hidrográfica

Una unidad morfológica que se encuentra delimitada por una línea imaginaria denominada divisoria de aguas; esta línea imaginaria es el límite entre las cuencas hidrográficas contiguas de dos cursos de agua. (CAMAREN, 2005).

Características morfológicas de una cuenca

Mediante el procesamiento de la información cartográfica y topográfica de la zona de estudio, se puede explicar las características morfológicas de una cuenca hidrográfica (Ramírez, 2015).

Análisis morfométrico de una cuenca

Realizar el análisis morfométrico permite conocer las características físicas de una cuenca. Se realiza considerando ciertas particularidades como superficie, relieve e hidrografía y permite realizar comparaciones con otras cuencas ayudando a comprender el funcionamiento hidrológico que muchas veces resulta complejo de entender (Aguirre, 2007).

Parámetros morfológicos

Perímetro

El perímetro de una cuenca hidrográfica se la conoce como la medición del contorno que encierra el área de la cuenca por la divisoria de aguas (Gaspari, et. al., 2010).

Longitud

En sentido del cauce principal, la longitud es la mayor distancia, medida en unidades de km, desde la parte más alta de la cuenca hasta su desembocadura (Ramírez, 2015).

Área

La superficie que encierra la divisoria de agua es el área de la cuenca y permite determinar el tamaño y nombre para la caracterización de una cuenca. El área es medida en unidades de km (Ramírez, 2015).

Factor de Forma

Indica de una manera aproximada la forma de la cuenca a una forma geométrica, con la finalidad de determinar la velocidad con la que el agua llega al río principal de la cuenca de estudio (Ramírez, 2015).

Parámetros de relieve

Altura media

La altura media indica la altura definida por el volumen de la cuenca en relación a la superficie de esta. (ULA, 2000).

Pendiente media de la cuenca

La pendiente media de una cuenca es una de las tareas más importantes en la realización de cualquier estudio hidrológico, ya que la pendiente media es la que controla la velocidad con que se dará la escorrentía superficial en la cuenca (Monsalve, 2002).

Sistemas de información geográfica (SIG)

Los SIG son una integración organizada de hardware, software y datos geográficos que ha sido diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográfica referenciada para solucionar temas de planificación y gestión (Rubén, 2010).

Utilización de herramientas SIG orientado al manejo de cuencas

Los SIG son herramientas que permiten almacenar y representar todos los datos que se pueden originar con el análisis de los parámetros y factores que intervienen en la cuenca hidrográfica para finalmente obtener los mapas en los que se encuentra la información detallada de cada parámetro estudiado. Con el empleo de los SIG se pueden mostrar de forma coherente y sistemática los datos de localización de los recursos y sus respectivas

características cualitativas y cuantitativas y ofrecer una visión definitivamente más integral y territorial.

Clasificación del cuerpo de agua

Es una operación en la que a cada cuerpo de agua se le asigna un tipo particular dentro de la tipología, siendo necesario determinar el rango en el que se encuentran para cada criterio de clasificación (Universidad de Chile, 2010). El producto de esta operación es una base de datos cartográfica de cuerpos de agua, en este caso de ríos, y una tabla de atributos asociada que indica el tipo al que pertenece cada cuerpo de agua (Universidad de Chile, 2010).

Para clasificar los cuerpos de agua en un SIG, es necesario seguir los siguientes pasos consecutivos:

- Se debe definir la cartografía a utilizar para cada tipo de cuerpo de agua.
- En segundo lugar se debe definir la cartografía disponible y la que va a utilizar para los criterios de clasificación.
- Asignar un tipo a cada cuerpo de agua dependiendo de su pertenencia a los rangos.

Modelo digital del terreno y sus aplicaciones (MDT)

Los MDT es uno de los elementos básicos de cualquier representación digital de la superficie, constituyendo la base para ser aplicado en un gran número de estudios en ciencias de la Tierra, ambientales e ingenierías de todo tipo incluyendo análisis estadísticos, modelos climáticos, hidrológicos, de visibilidad, etc. (GEAINTEC, 2017). Los MDT son un conjunto de capas, generalmente raster, derivadas del MDE (Universidad de Murcia, s.f.).

Modelo digital de elevación (MDE)

El conjunto de capas de los MDT las cuales representan distintas características de la superficie terrestre y que se derivan de una capa de elevaciones se lo conoce como MDE (Universidad de Murcia, s.f.).

Red de drenaje

Es el sistema jerarquizado de cauces, que va desde los pequeños surcos hasta los ríos, que confluyen unos en otros conformando un colector principal de toda la cuenca (González, 2004).

Antecedentes:

La DMA de la Unión Europea crea un marco comunitario de actuación para la protección de las aguas continentales superficiales y subterráneas, las aguas costeras y las aguas de transición. Sus objetivos son prevenir el deterioro de las aguas para mejorar el estado de los ecosistemas acuáticos, solucionar las necesidades de los ecosistemas terrestres y humedales y promover un desarrollo sostenible del agua (Parlamento Europeo, 2015).

Dentro de las investigaciones que se centran en el estudio de los cuerpos de agua desde el punto de vista ecosistémico, se encuentra el trabajo realizado por la Universidad de Chile por Rodrigo Fuster (2010) que analizó el Anexo II de la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea. La metodología empleada ha sido consensuada en un proceso participativo que finalizó con una propuesta de un sistema de tipificación para la clasificación de cuerpos de agua a escala nacional en Chile. Se determinaron ecorregiones en el territorio nacional, se definieron los criterios a emplear y los rangos que servirán para clasificar los diferentes tipos de cuerpos de agua. Finalmente, se realizó una clasificación de los cuerpos de agua mediante el empleo de un SIG de acuerdo con la información cartográfica que se encontró disponible.

Un segundo trabajo de la Asociación Española de Limnología (2002) emplea la tipología de ríos de la Directiva Marco del Agua del anexo II para realizar un ensayo de los puntos de muestreo de un proyecto. El anexo II de la DMA se refiere a la utilización de dos sistemas de clasificación A y B. El sistema A se orienta a la clasificación de las masas adscritas a las demarcaciones hidrográficas según las zonas geográficas. El sistema B está basado en una caracterización alternativa en la que se deben definir los factores físicos y químicos que se consideren como características determinantes de los cuerpos de agua a estudiar.

Un tercer trabajo del Ministerio del Ambiente de España (2005) aborda la caracterización de la Demarcación Hidrográfica e identificación de los tipos de masas de agua superficial mediante el informe resumen de los artículos 5 y 6 de la DMA. Este trabajo aborda una

propuesta que se llevó a cabo a través de una modelación en SIG de la red de drenaje de los cursos fluviales y se identificaron 29 tipos ambientales distintos de los ríos españoles de la Península Ibérica e Islas Baleares. En este trabajo, se emplearon tramos fluviales de 500 m, un modelo digital de elevación para determinar las conectividades de los ríos y un sistema de clasificación jerárquica que permitía establecer umbrales con límites naturales y homogéneos.

Marco legal:

Los siguientes artículos de la Ley de Recursos Hídricos y el Plan de Desarrollo del Buen Vivir, permiten abordar el marco legal que orienta y garantiza al recurso hídrico desde un punto de vista que enfocado al dominio público.

Ley Orgánica de Recurso Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua.

Título II Recursos Hídricos

El artículo 8 de la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua menciona que la única autoridad del agua (Secretaría del Agua) es la que se encargará de la delimitación de las cuencas hidrográficas que servirá para el conocimiento de la unidad territorial. La cuenca hidrográfica estará delimitada por la línea divisora y dentro de esta delimitación se abarcarán aspectos de infraestructura, áreas de conservación, protección y zonas productivas para que exista una gestión integral de los recursos hídricos. Esta zonificación será el eje transversal del sistema nacional descentralizado de planificación participativa para el desarrollo.

El artículo 28 se refiere a la Planificación de los recursos hídricos y cita la responsabilidad que tiene la autoridad del agua de realizar una planificación hídrica en base a un Plan Nacional de Recursos Hídricos al cual, el Estado y los Gobiernos Autónomos Descentralizados deben ajustarse. De igual manera, los planes de gestión integral de los recursos hídricos por cuenca deben vincularse a las entidades correspondientes que presten servicios relacionados con el agua.

Reglamento de la Ley orgánica del Agua

Primer suplemento del Registro Oficial N° 483

El artículo 7 se refiere a la cuenca hidrográfica y al principio de unidad de cuenca en la gestión de las Demarcaciones Hidrográficas reforzando lo indicado en el artículo N° 8 de la Ley Orgánica de Recursos Hídrico, Usos y Aprovechamiento del Agua. Distingue una autoridad única en temas de aprobación de delimitación de cuencas y considerando que la Demarcación Hidrográfica se compone de las zonas terrestre y marinas asociadas a una o varias cuencas hidrográficas vecinas y que las aguas de transición, subterráneas y costeras asociadas a dichas cuencas deben gestionarse de forma conjunta.

CAPITULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

AREA DE ESTUDIO

La metodología de clasificación fue empleada en la cuenca del río Esmeraldas como podemos ver en la Figura 1, la cual consta de 21.669 km². Se encuentra ubicada al norte del Ecuador abarcando a las provincias de Esmeraldas, Cotopaxi, Imbabura, Manabí, Pichincha y Santo Domingo de los Tsáchilas (Rosas, 2012).



Figura 1. Mapa de ubicación de la cuenca del río Esmeraldas.

GENERACIÓN DEL MAPA DE DRENAJE

Delimitación de la cuenca

Para la delimitación de la cuenca del Río Esmeraldas se utilizó el shapefile de cuencas hidrográficas disponible en el portal de la Secretaria Nacional del Agua SENAGUA, 2017 a una escala de 1:1000000.

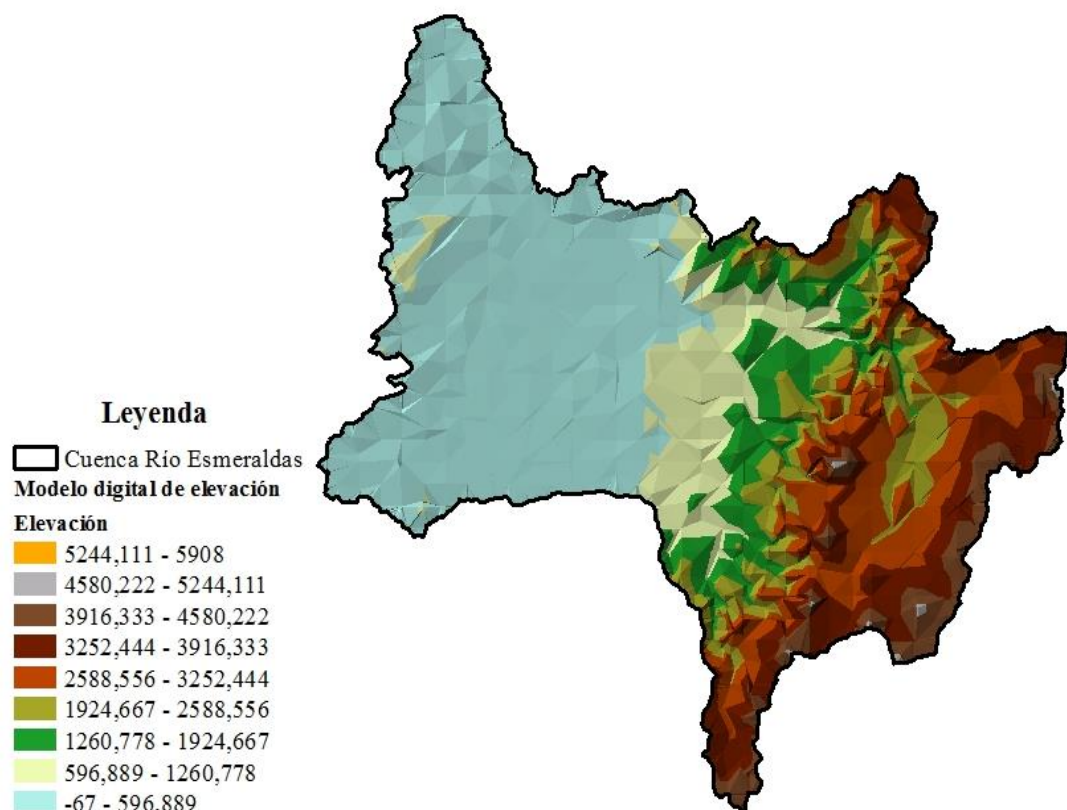


Figura 2. Modelo digital de elevación de la cuenca del Río Esmeraldas a escala 1:1.500.00

Modelo digital de elevación

Después de delimitar la cuenca de estudio, se construyó el modelo digital de elevación (MDE) del terreno a partir de los datos de radar obtenidos del portal de la NASA Alaska Satellite Facility (2017) con una resolución de 12.5 x 12.5 m. A la información obtenida se le realizó el corte para delimitar con la cuenca de estudio.

Análisis hidrológico de la cuenca del río Esmeraldas

El análisis hidrológico de la cuenca del Río Esmeraldas se realizó sobre el MDE del área de estudio mediante varias herramientas de SIG. Primero se utilizó la herramienta “fill sink” para rellenar aquellas posibles imperfecciones que existen en la superficie del MDE, de forma que las celdas en depresión alcancen un nivel del terreno para asegurar la continuidad de las líneas de flujo. Después se utilizó la herramienta “flow direction” para determinar la dirección del flujo superficial de agua. Al final, se obtiene como resultado un ráster que contiene las direcciones de un flujo sobre toda el área de la cuenca de estudio.

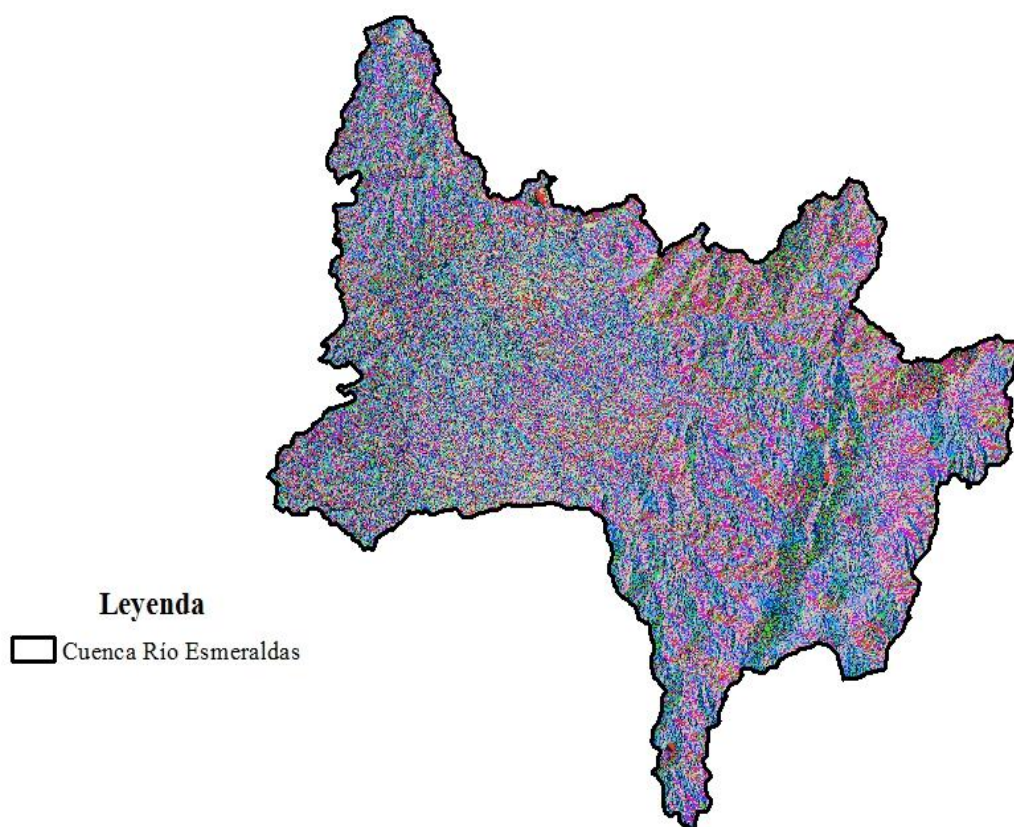


Figura 3. Dirección de flujo de la red de drenaje de la cuenca del Río Esmeraldas a escala 1:1.500.000

Una vez creada la dirección del flujo de la red de drenaje se utilizó la herramienta “flow accumulation” que crea un ráster en el que cada celda almacena el número de celdas situadas aguas arriba que vierten sobre ella. Con la herramienta “Stream definition” se calculó el raster de corrientes a partir de la acumulación de flujo; luego se empleó la herramienta “Stream Link” en el que se obtuvo un drenaje segmentado continuo a partir de la dirección de flujo. Con la herramienta “feature vertice to point”, se identificaron los puntos de intersección de cada los cauces encontrados y los vértices se convirtieron a puntos. Estos puntos representan los puntos de drenaje que sirven para determinar las cuencas asociadas a cada tramo fluvial. Finalmente, la herramienta “watershed delineation” se utilizó para delimitar la cuenca de drenaje de cada uno de los cauces generados a partir del MDE.

DESCRIPTORES DE LOS CAUCES FLUVIALES

Orden

Sobre la red de drenaje, se utilizó la herramienta “stream order” que permitió realizar una clasificación del orden jerárquico de los cauces de la red de drenaje de la cuenca. El orden es un indicador relativo de la anchura y caudal de un tramo fluvial y de su posición dentro de la red de drenaje. El procedimiento de clasificación consiste en considerar las corrientes que no tienen tributarios como de orden 1, y después, cuando dos corrientes del mismo orden confluyen, dan lugar a una corriente de un orden superior (Martínez, 2000).

Elevación y pendiente media

La elevación media de cada tramo fluvial se calculó a partir del MDE. La pendiente es fundamental en cuanto a la definición de la tipología de ríos, ya que puede darnos una indicación de la velocidad de corriente del río y de su capacidad de transporte de materiales. La pendiente del cauce se obtuvo directamente del MDE, calculando la diferencia de elevación entre el punto superior y el punto inferior de cada tramo fluvial y este valor se dividió por la longitud del tramo.

Temperatura media anual

Se consideró que la temperatura media anual del aire es un buen indicador de la temperatura de los ríos. Se utilizó el mapa de isotermas del Ecuador (INAMHI, 2017) para estimar la temperatura media anual de cada tramo fluvial identificado. Inicialmente, se calculó el valor medio de cada rango de isotermas y se reclasificó el mapa raster de isotermas con estos valores medios. La temperatura media de cada río se calculó a partir del raster reclasificado de temperatura media anual del aire.

Vegetación alrededor del cauce

Para determinar el tipo de cobertura vegetal alrededor de los cauces se utilizó el mapa de los ecosistemas de Ecuador de Cerón et al. (1999). El mapa original contiene 259 polígonos; Ecuador posee, según Cerón et al. (1999), 72 tipos de vegetación de los cuales 16 se encuentran presentes en la cuenca del Río Esmeraldas y que finalmente como resultado de un proceso de reclasificación se logró obtener siete clases de vegetación con lo que se realizó el estudio.

En la clase 2 denominada Bosque Siempreverde (BSV) se encuentran los tipos de vegetación Bosques Siempreverde Montaña Alto de los Andes Occidentales, Bosque Siempreverde Montaña Bajo de la Cordillera de la Costa, Bosque Siempreverde Montaña Bajo de los Andes Occidentales, Bosque Siempreverde Piemonataño de la Cordillera de la Costa. La clase 5 denominada Matorral Húmedo (MHUM) contiene los tipos de vegetación Matorral Montaña de los Andes del Norte y Centro y Matorral Montaña Bajo de los Andes del Norte y Centro. Y la clase 7 denominada Páramo (PARM) contiene los tipos de Páramo Herbáceo, Páramo Seco, Súper Páramo.

DESCRIPTORES DE LAS CUENCAS DE DRENAJE

Sustrato geológico

El sustrato geológico de la cuenca es un determinante del grado de mineralización de los ríos y se ha incluido en esta clasificación. La información se ha obtenido del mapa geológico del Ecuador a escala 1:100.000 obtenido en el SNI (2017). El mapa original de litología del Ecuador contiene 1166 polígonos de los cuales 31 tipos se encuentran presentes en la cuenca del Río Esmeraldas a los que se le aplicó una reclasificación determinando finalmente cinco clases de geología para la cuenca de estudio.

La clase 1 denominada Volcánica (VOLC) contiene tipos de geología como Lavas, Basaltos, Andesita, Brecha, Cenizas, Lapilli, Piedra Pómez, Lavas, Rocas ultrabásicas. La clase 2 denominada Mixta (MIX) contiene tipos de geología como Sedimentos aluviales, lacustres, Glaciares, Terrazas, Lahares, Derrumbe, Arsénicas Conglomerados, Arcillas, Turbidita, Lutitas Coluviales, Tillita. La clase 3 denominada Calcáreos (CALC) contiene tipos de geología como Calizas, otro tipo de Calizas, Cangua, Lentes Calcáreos. La clase 4 contiene tipos de geología como Granito, Gneiss, Dioritas, Pizarra, Tornalita y por último la clase 0 denominada No Identificada (NO ID) que contiene clase que se encuentra sin identificación dentro de la geología del Ecuador.

Precipitación anual

Como un indicador del caudal circulante en cada cauce, se utilizó la precipitación anual en la cuenca de drenaje. Se utilizó el mapa de isoyetas de Ecuador a escala 1:1.000.000, con esta información se calculó la precipitación anual sobre cada cuenca; primero se calculó la precipitación media de cada banda entre isoyetas y después la precipitación anual sobre cada cuenca.

ANÁLISIS DE LAS VARIABLES Y CLASIFICACION TIPOLOGICA

Análisis de frecuencias

Para cada variable de clasificación, se realizó un análisis de frecuencias segregado según el orden del cauce. El análisis de frecuencias proporciona información sobre la distribución de las variables de clasificación en la red de drenaje.

Análisis de componentes principales (ACP)

Se realizó un análisis de componentes principales con las variables temperatura media anual (°C), precipitación anual (mm), elevación media (m), pendiente media (m/m), bosque semidecíduo (%), bosque siempreverde (%), matorral seco (%), matorral húmedo (%), páramo (%), no identificado (%), volcánico (%), mixto (%), calcáreo (%) y silíceo con los cauces de orden 4 o superior. El análisis de componentes principales permite identificar las variables que explican una mayor variabilidad entre los tramos fluviales y las correlaciones entre las variables de clasificación. También produce una clasificación de los tramos fluviales en función de los componentes identificados. Los componentes resultantes del análisis se representaron en mapas que permiten ver su distribución espacial en la cuenca.

Clasificación por k-medias

El método de k-medias permite clasificar un grupo de objetos en un número de clases determinado por el investigador. Para decidir el número óptimo de clases se realizaron clasificaciones con un número creciente de clases y se representó el porcentaje de la variabilidad total explicada por las diferencias entre clases.

Delimitación de las tipologías y creación del mapa

Este método no indica que variables son las más importantes para determinar la pertenencia a cada clase. Por lo tanto, se realizaron gráficos de la información obtenida en los análisis estadísticos y en la clasificación jerárquica se utilizará para generar un mapa de las diferentes tipologías de ríos en la cuenca del río Esmeraldas. La información se presentó en un mapa a escala 1:50.000 de la red de drenaje en el que se reflejarán las diferentes tipologías mediante el uso de colores.

CAPITULO III: RESULTADOS

Orden

El análisis hidrológico del MDE nos permitió establecer la red de drenaje de la cuenca del río Esmeraldas y se identificaron 18.023 tramos fluviales.

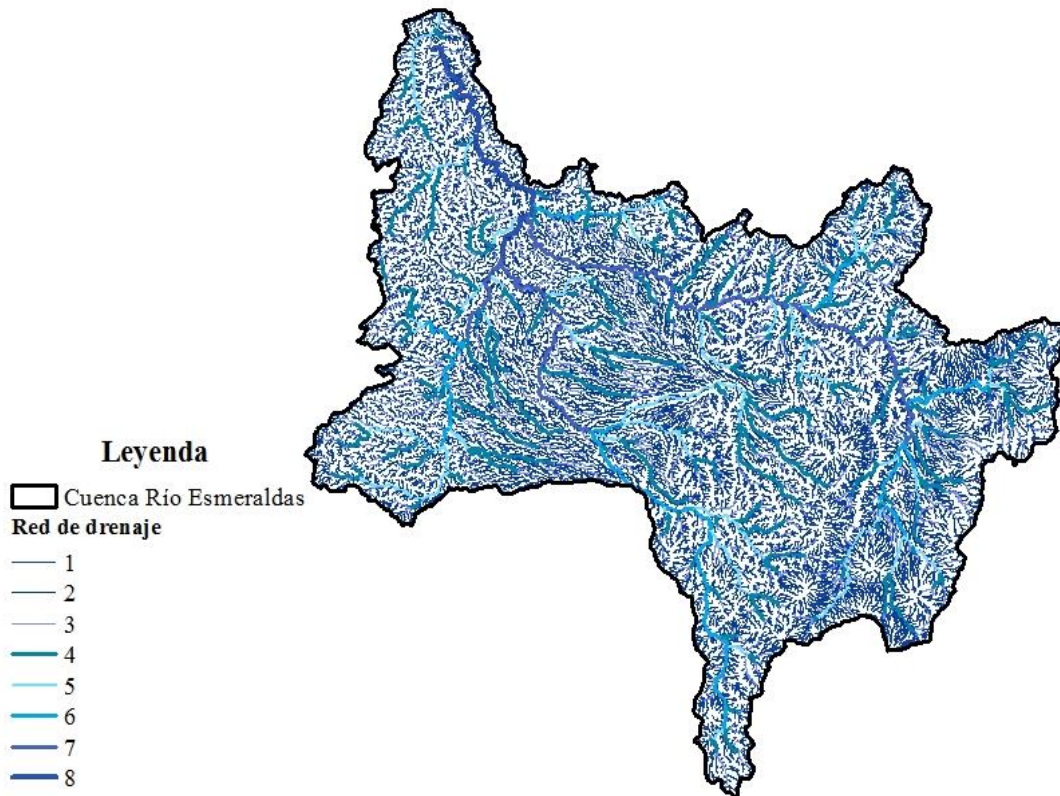


Figura 4. Red de drenaje de la cuenca del Río Esmeraldas

En la figura 4, se muestra la clasificación de las corrientes de agua según su orden. Se ha identificado que el río Esmeraldas, el cauce principal de la cuenca, es de orden 8.

Tabla 1. Número de tramos fluviales que hay en cada orden

Orden	N° de tramos
1	14110
2	3018
3	683
4	158
5	41
6	9
7	3
8	1

Temperatura media anual

En la figura 5 el color rojo representa los valores con mayor temperatura media anual en toda la cuenca del río Esmeraldas y podemos ver que conforme avanza hacia la región de la Sierra hay una disminución de temperatura que se representa con colores más claros y que por encontrarse en zonas frías las temperaturas son menores.

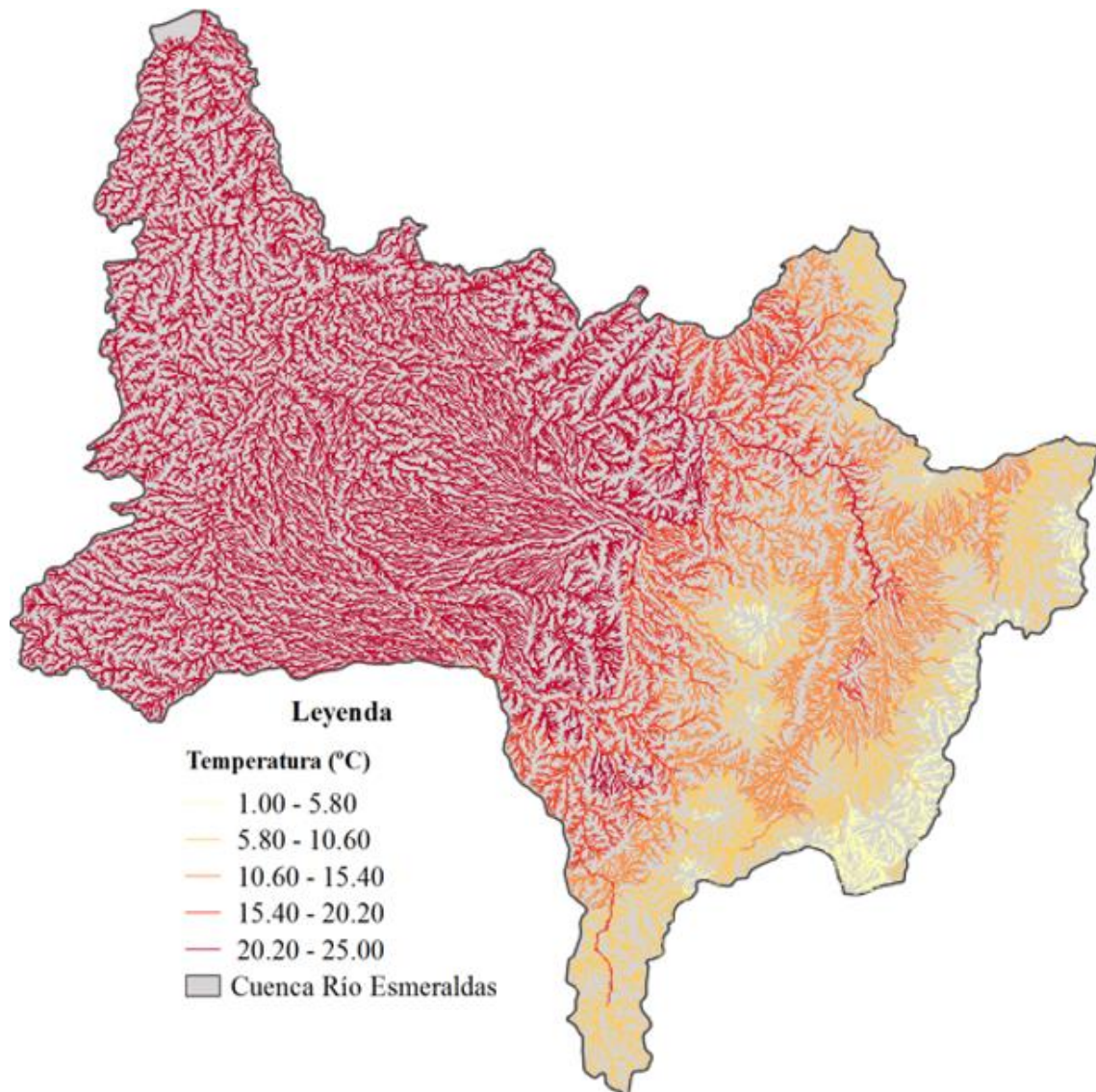
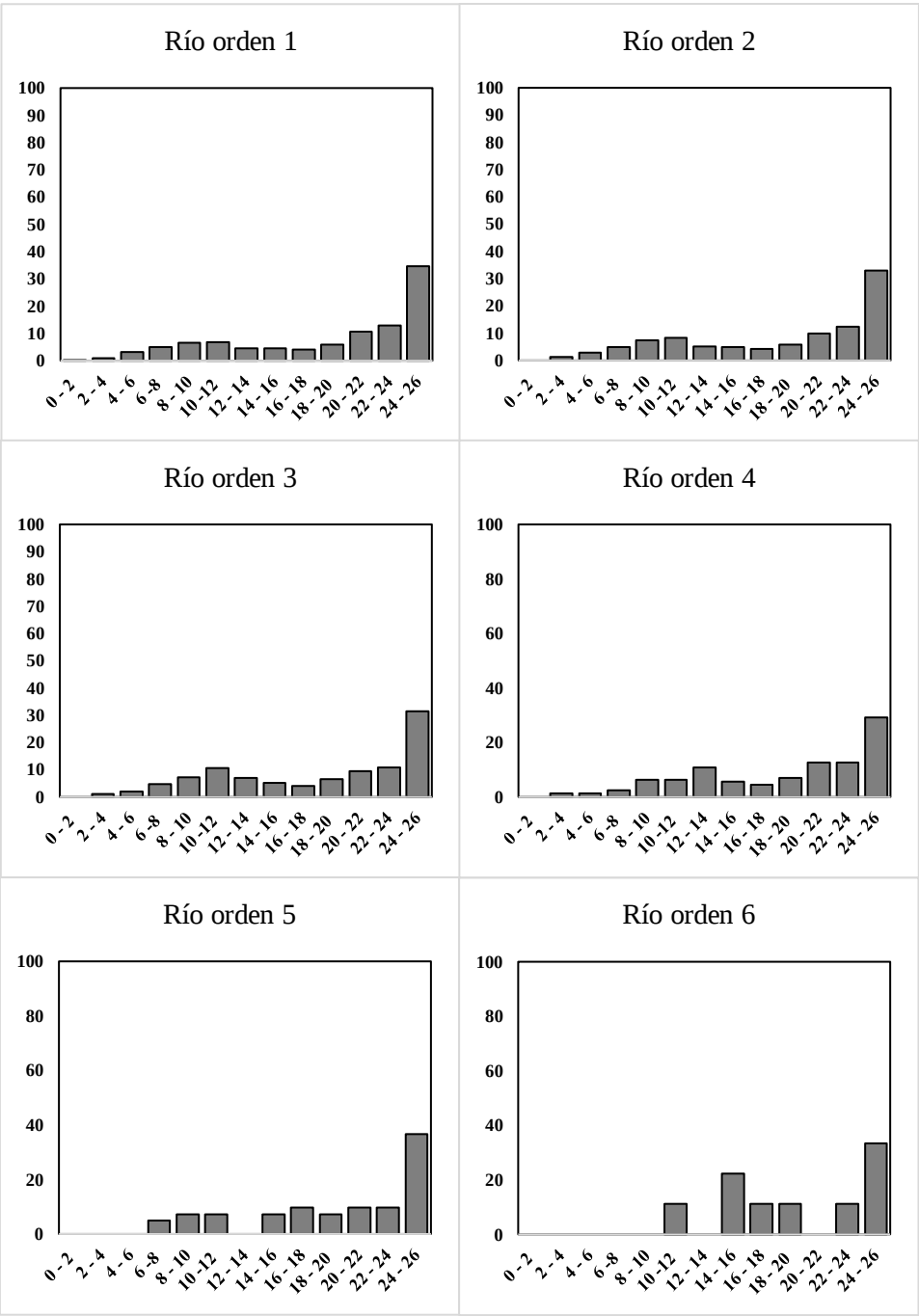


Figura 5. Mapa de temperatura media anual de la cuenca del Río Esmeraldas a escala 1:1.500.000

Las temperaturas en los ríos de orden 1, 2, 3, y 4 muestran una distribución similar, entre 0 y 26 °C, mientras que en los ríos de orden 7 y 8, las temperaturas oscilan entre 20 y 26 °C. Los ríos con una temperatura media entre 24 y 26 °C son los más abundantes en la cuenca del río Esmeraldas, como lo podemos ver en la siguiente figura 6.



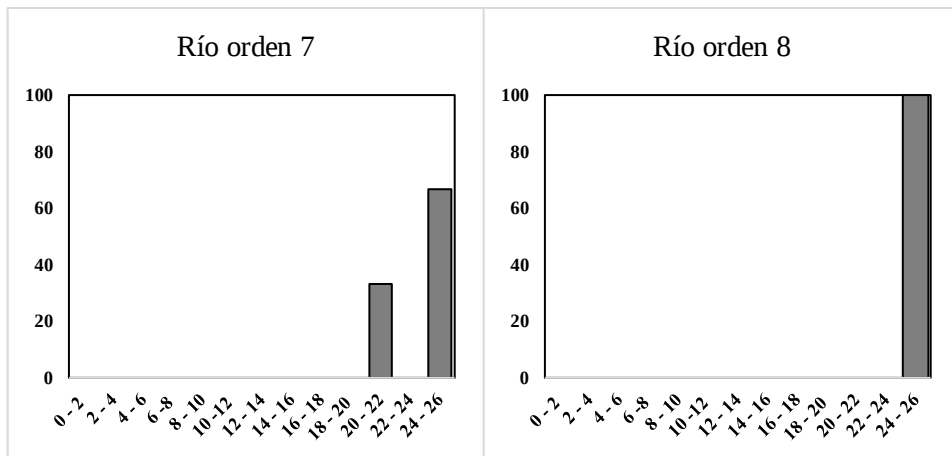


Figura 6. Frecuencia relativa porcentual de la temperatura, según el orden del río.

Vegetación:

La clase de vegetación predominante en la cuenca del río Esmeraldas es el bosque siempreverde (BSV) y se encuentra presente en la parte baja, media e inclusive en la parte baja de la cuenca representado por el color verde oscuro. La vegetación en los valles de Quito es de matorral húmedo (MHUM) y matorral seco (MSEC) e incluso encontramos esta clase de vegetación en la parte baja de la cuenca, cerca del estuario del río Esmeraldas, representado por los colores azul claro y anaranjado respectivamente. En la parte alta de la cuenca encontramos además nieves perpetuas (NPER) y páramos (PARM) ya que en estas zonas se encuentran los volcanes Antisana, Cayambe e Imbabura, representado por los colores azul oscuro y amarillo respectivamente (Figura 7).

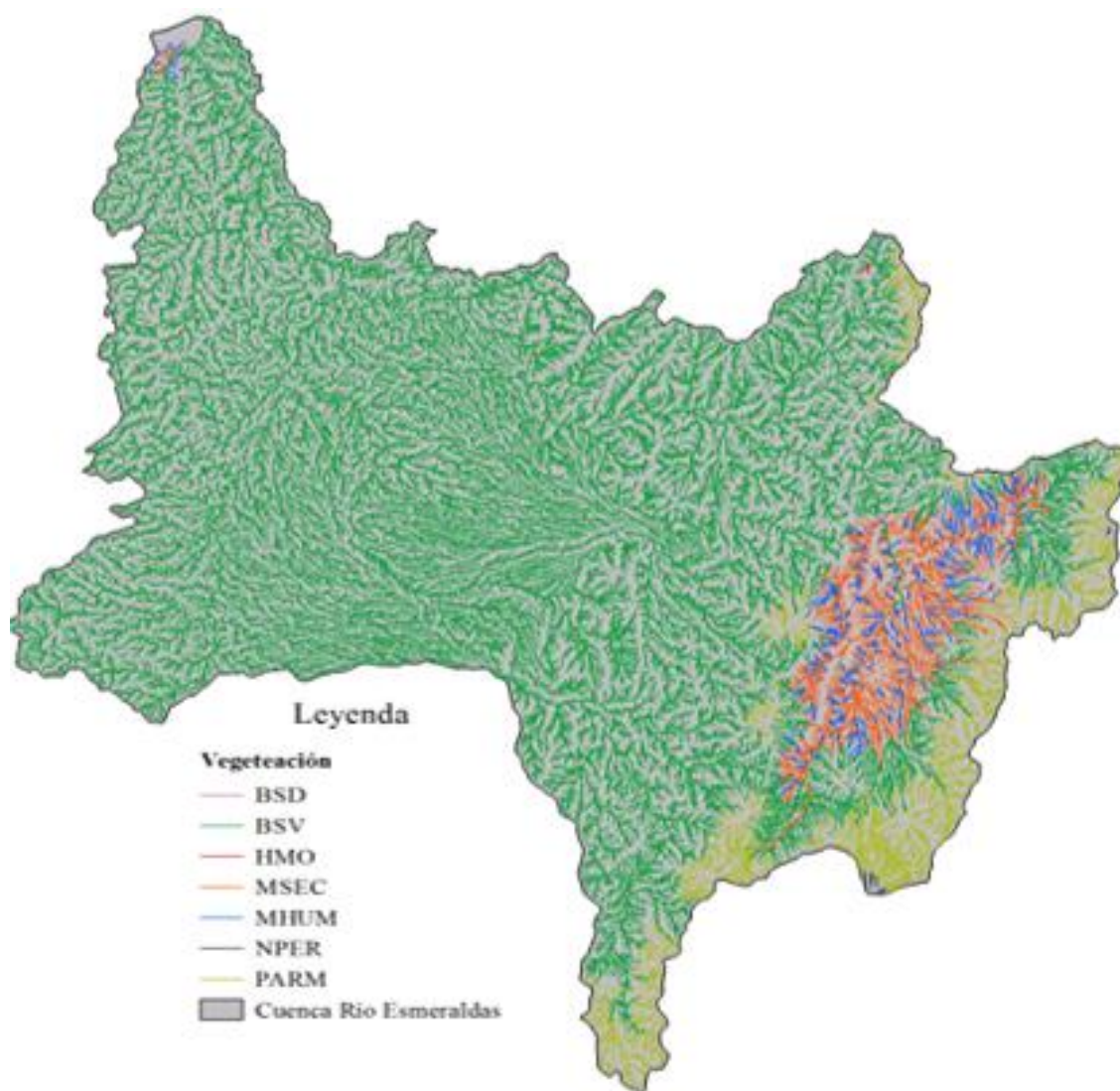
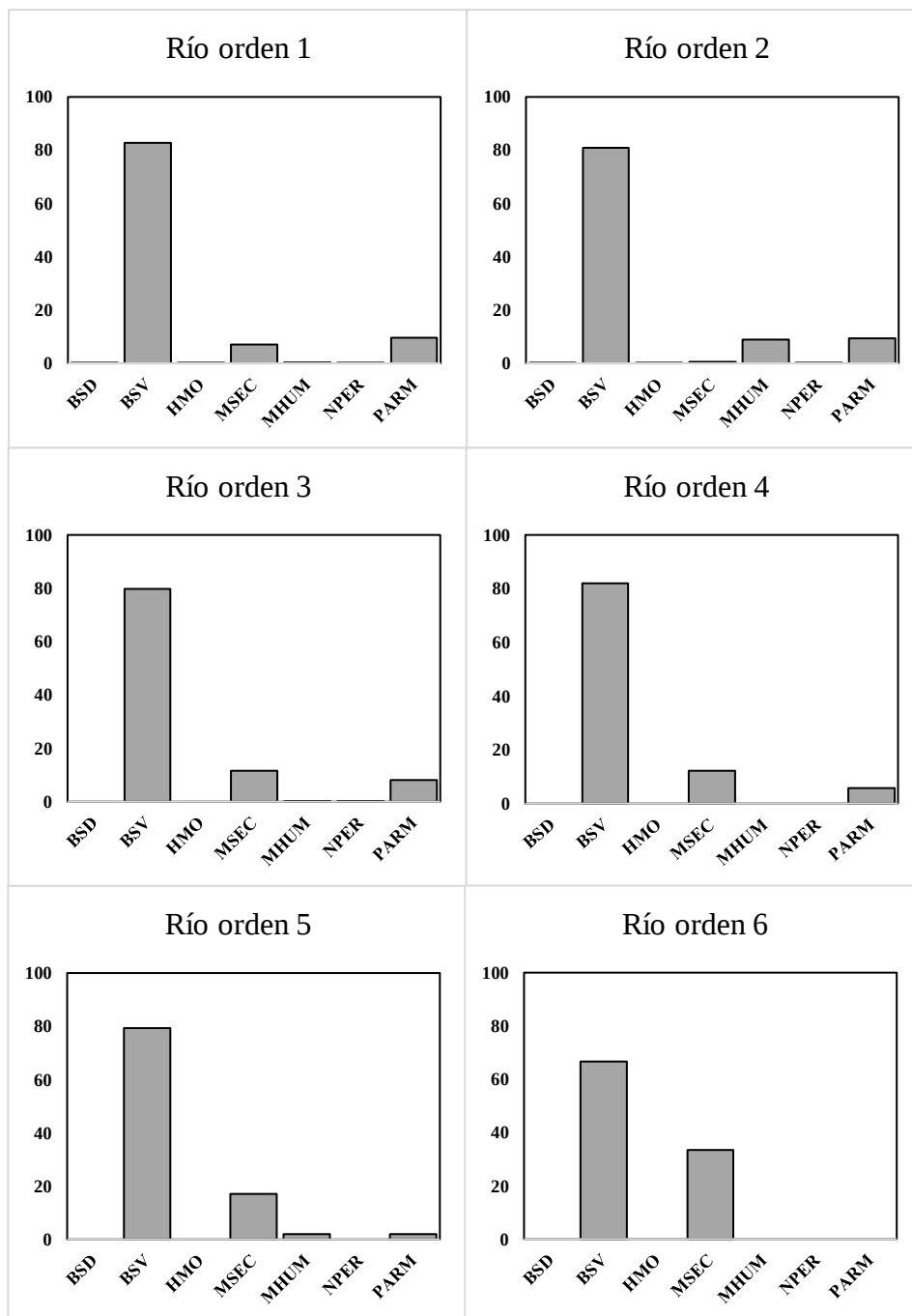


Figura 7. Mapa de vegetación de la cuenca del río Esmeraldas a escala 1:1.500.000

Los ríos que fluyen a través de bosque siempreverde (BSV) son los más abundantes y representan más del 50% del total. Los ríos que fluyen a través de matorral seco son el siguiente grupo más importante, aunque situados muy por debajo del 50%. Otros tipos de vegetación muestran una presencia marginal en los cauces de la cuenca como lo podemos ver en la figura 8.



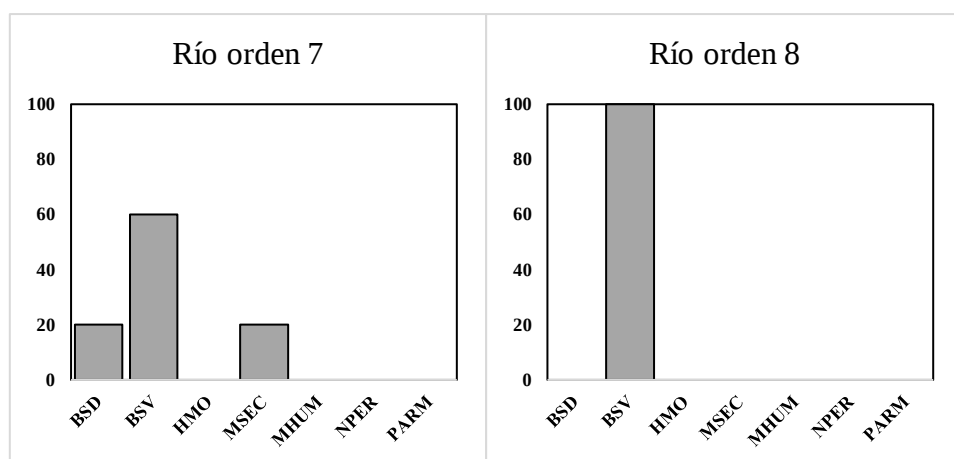


Figura 8. Frecuencia relativa porcentual de la geología según el orden de río

Elevación media

La elevación del Ecuador está establecida por la cordillera de los Andes, atravesando de norte a sur generando tres unidades de relieve: Costa, Sierra y Oriente; la cuenca del Río Esmeraldas abarca las regiones de Costa y Sierra. Los ríos con mayor elevación se encuentran en la parte alta de la cuenca y esto se debe a que en esta zona existen volcanes como el Cayambe, Imbabura y el Antisana representados por el color más oscuro (Figura 9) mientras que los ríos con menor altura están situados en la parte media y baja de la cuenca que atraviesa valles, situados en la Sierra, como el valle de Cayambe y el valle de los Chillos y de llanuras en la Costa, representados con los colores más claros (Figura 9).

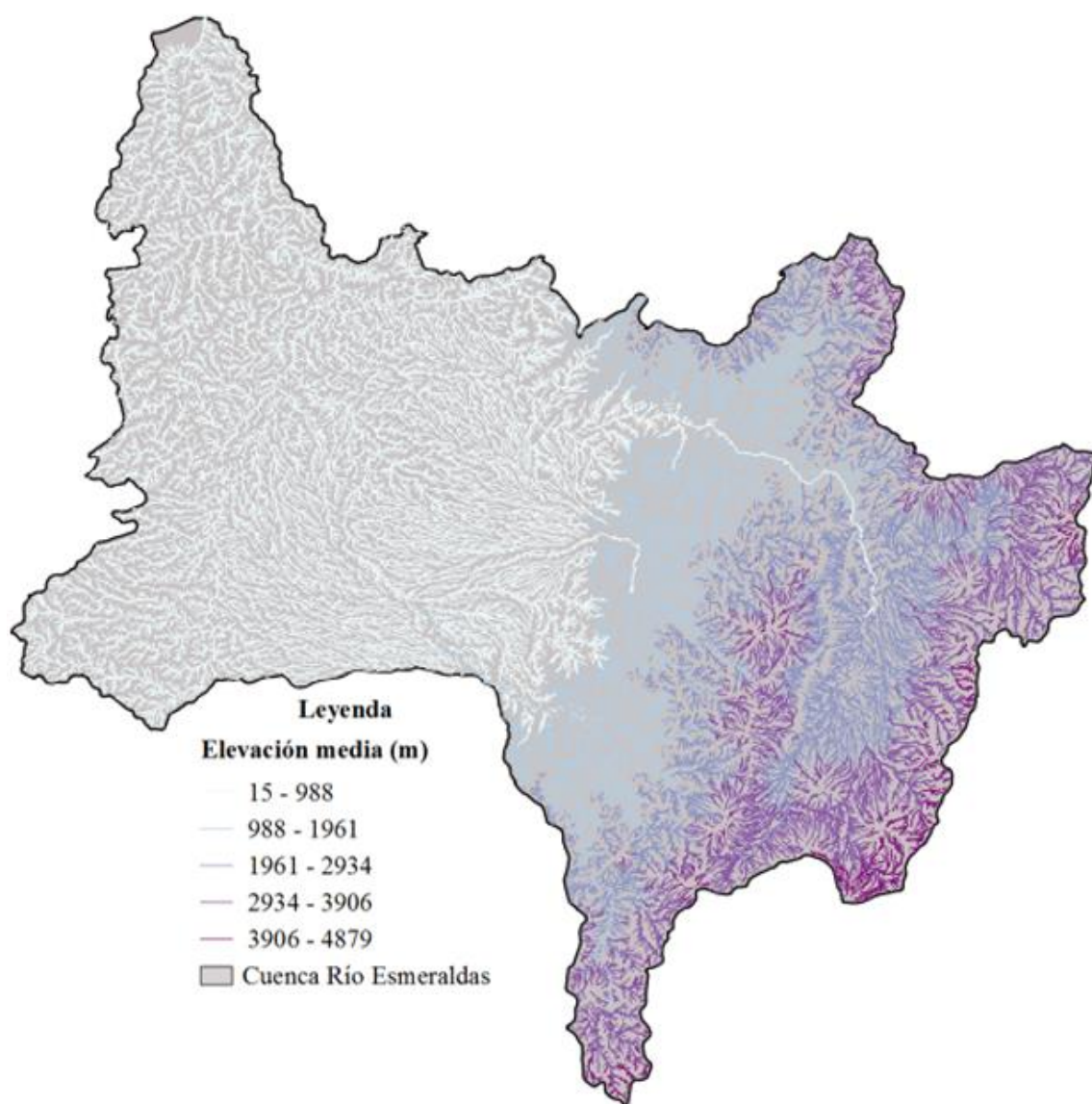
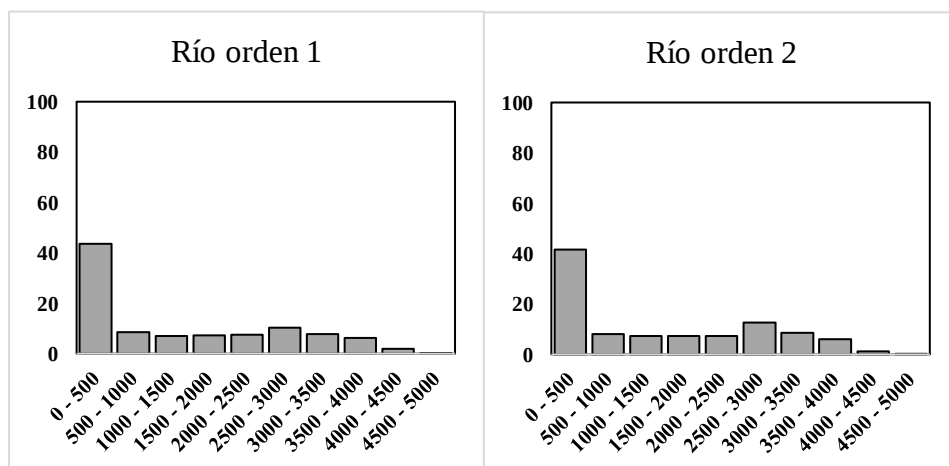


Figura 9. Mapa de elevación media de los cauces de la cuenca del río Esmeraldas



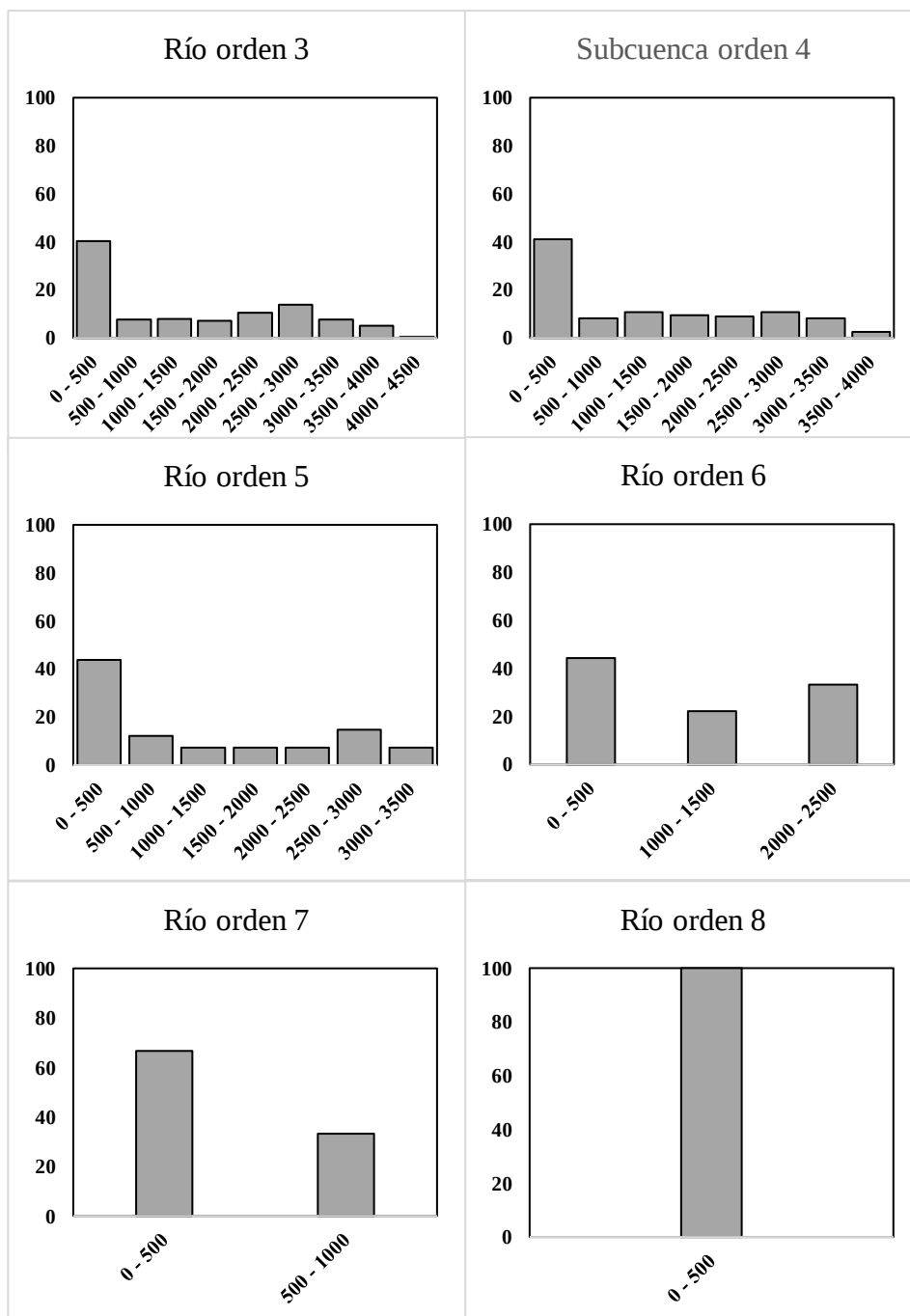


Figura 10. Frecuencia relativa porcentual de la elevación según el orden de río

Pendiente media

La cuenca del río Esmeraldas posee ríos con una pendiente media muy baja como lo podemos ver en la figura 11, existen ríos que alcanzan los 0.9 m/m y se encontraron en la parte alta de la cuenca cerca del río Guayllabamba, en las zonas volcánicas y de los valles, mientras que los colores más claros son lo que predominaron la cuenca dando como resultado una cuenca con poca gradiente.

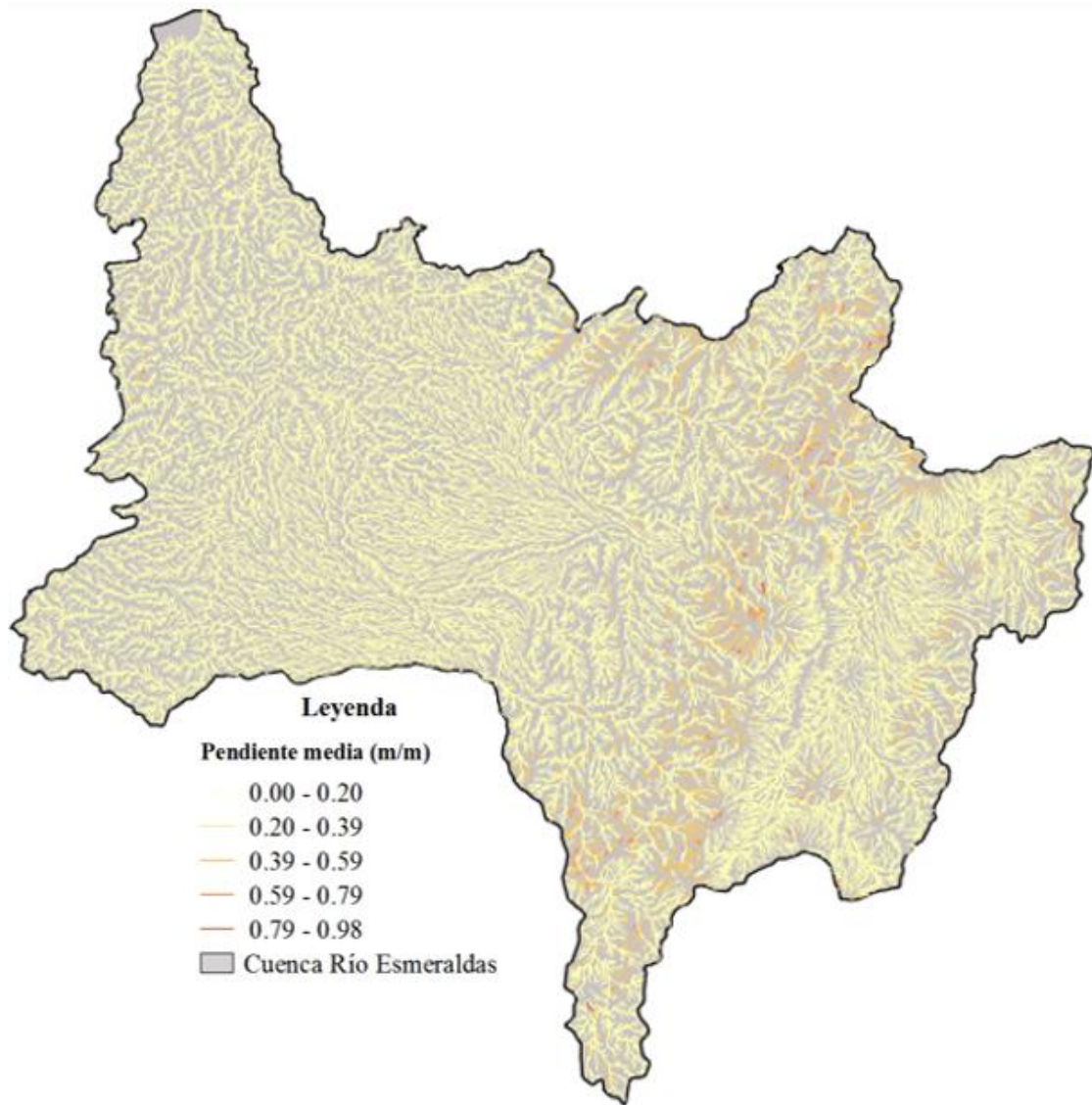
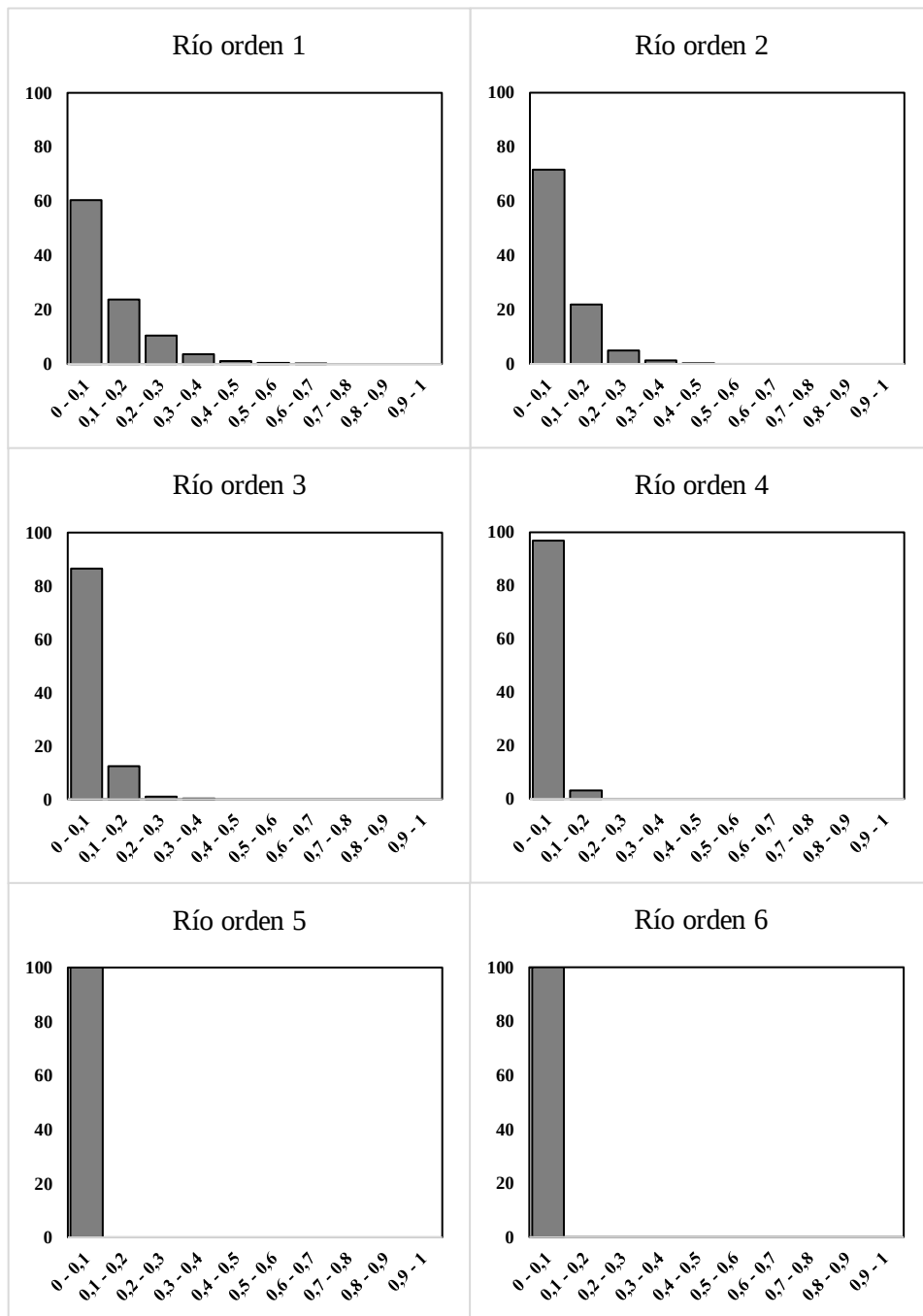


Figura11. Mapa de pendiente media de la cuenca del Río Esmeraldas a escala 1:1.500.000

El río de orden 1 posee pendientes $> 0,1$ y $< 0,7$ m/m lo que indica que estos ríos poseen diversidad de ríos planos y ríos con elevaciones medianas. En los ríos de orden 2 y 3 podemos notar que disminuye el porcentaje de cauces con una pendiente moderada hasta llegar a los ríos de orden 4, 5, 6, 7 y 8 que notablemente presentan ríos con pendientes menores a $0,2$ m/m, lo que representa que la cuenca del río Esmeraldas poseen en mayor cantidad ríos de poco gradiente.



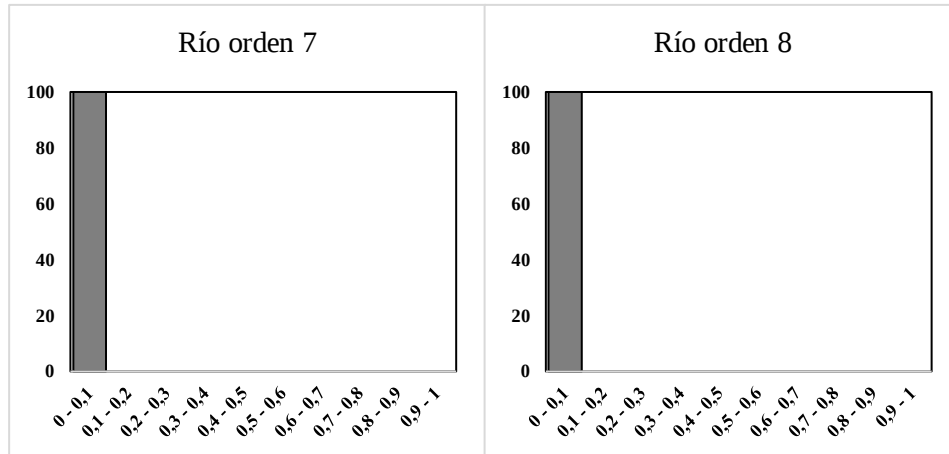


Figura 12. Frecuencia de pendiente media según el orden de río

Precipitación anual

Las zonas más secas de la cuenca del Río Esmeraldas se sitúan en la parte alta de la cuenca, ubicado en el valle de Cumbayá en Quito y en la parte baja, muy cerca del estuario del río Esmeraldas y están representados con el color más claro (Figura 13) en la zona media de la cuencas atraviesan los ríos Guayllabamba y Esmeraldas y notamos que existe una mayor incidencia de precipitaciones en esa zona (Figura 13).

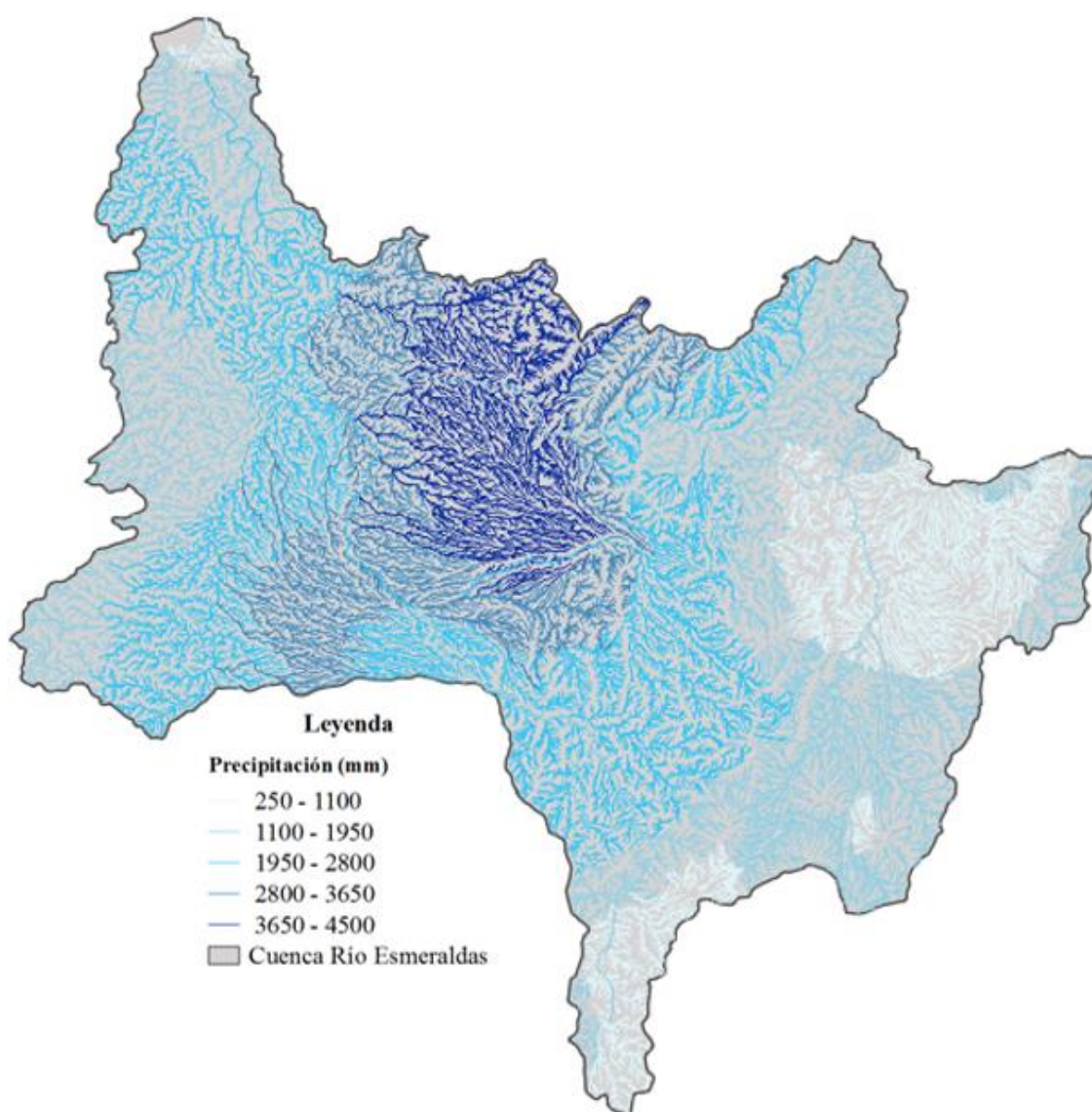
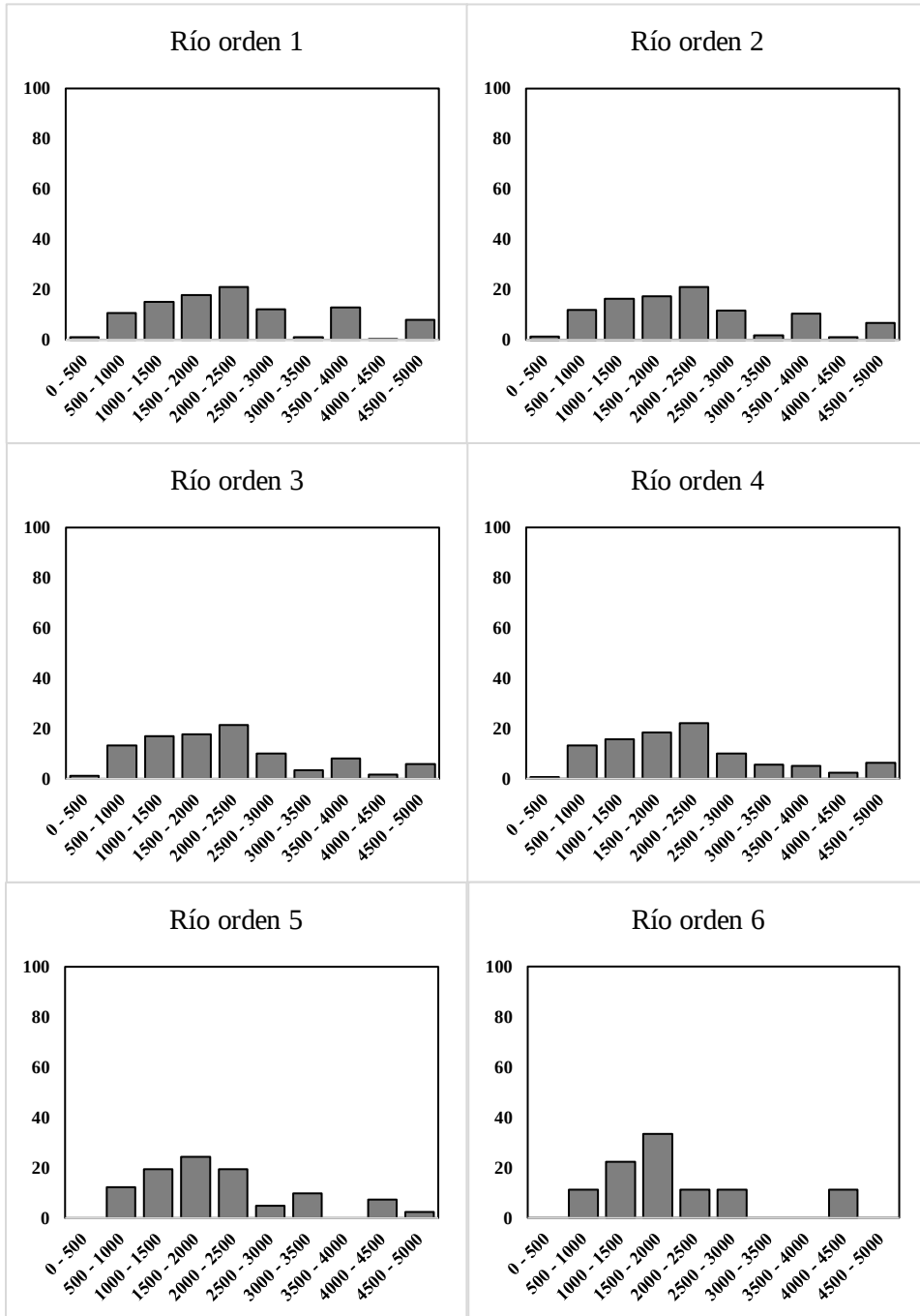


Figura 13. Mapa de Isoyetas de la cuenca del Río Esmeraldas a escala 1:1.500.000

La distribución de la precipitación media anual en las subcuencas de orden 1, 2, 3 y 4 oscilaron entre 500 y 5000 mm anuales, aunque la mayor parte de las subcuencas recibieron entre 500 y 2500 mm. Las cuencas de mayor orden presentaron un rango de variación de la precipitación media anual menor, pero la mayor parte se situaban también entre 500 y 2500 mm anuales.



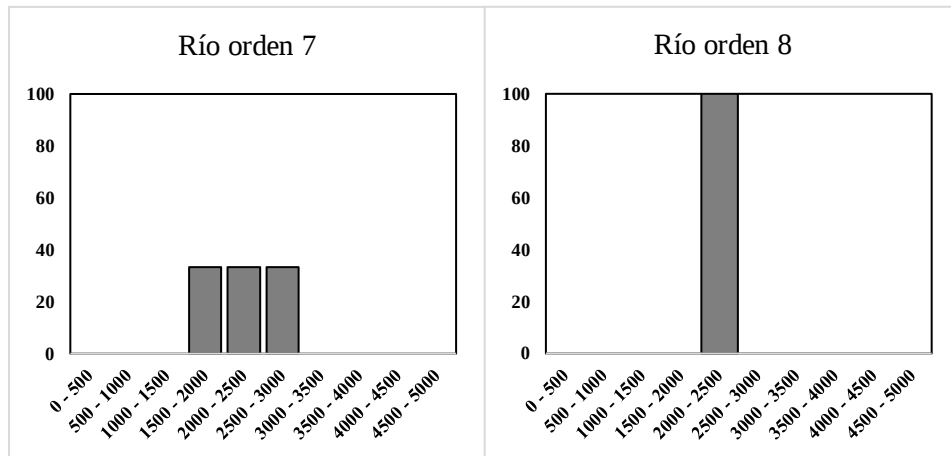


Figura 14. Frecuencia de la temperatura clasificada según el orden de río.

Sustrato geológico

El sustrato geológico en la cuenca del río Esmeraldas se concentra en su mayoría en los sustratos volcánico y mixto.

El sustrato volcánico se encuentra presente en la región Sierra debido a que existe una gran cantidad de volcanes en las provincias de Pichincha e Imbabura como el Cayambe, Antisana y el Imbabura. El sustrato mixto se halla especialmente en la parte baja de la cuenca mientras que el sustrato silíceo en la parte media alta de la cuenca. (Figura 15).

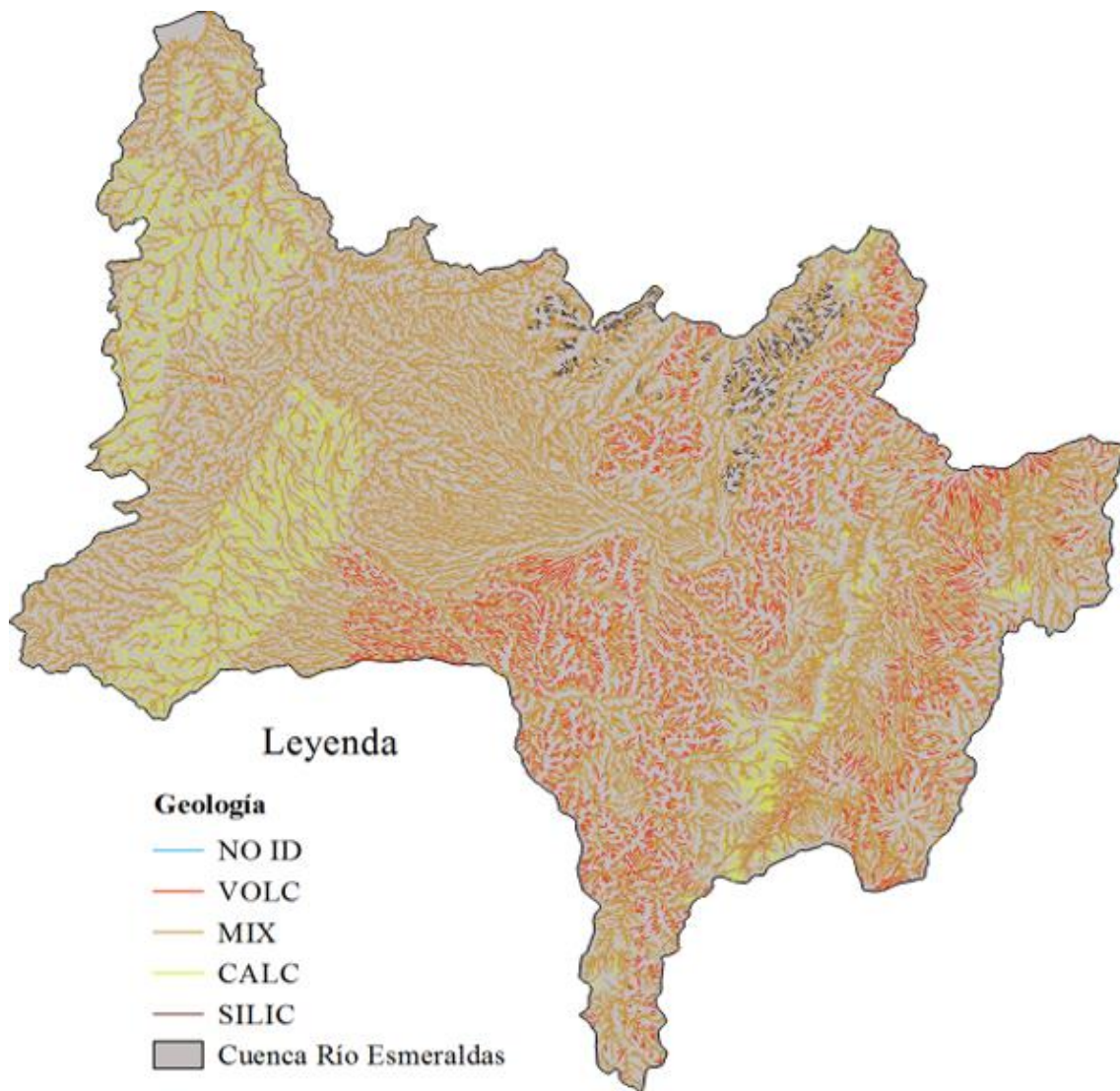
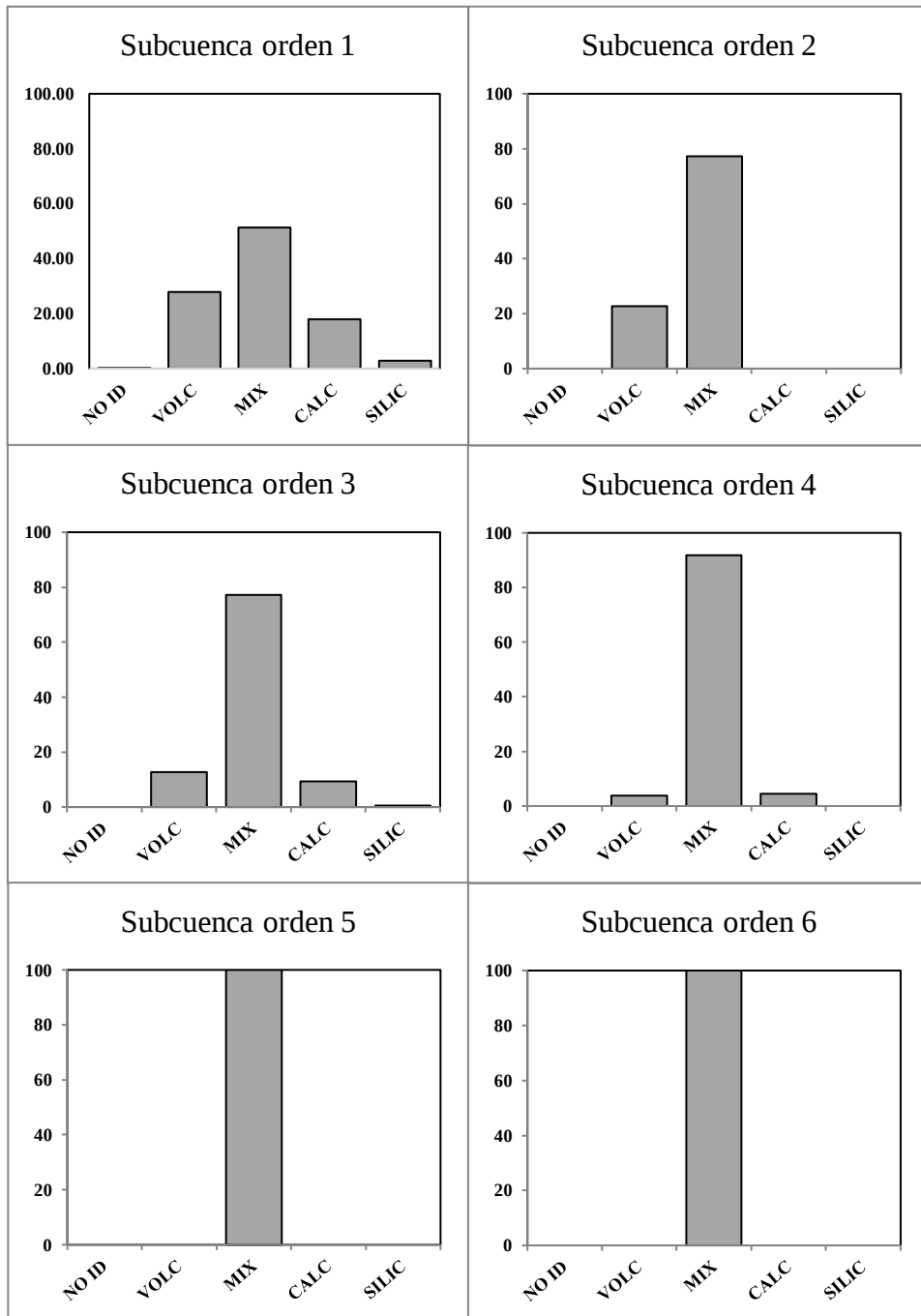


Figura 15. Mapa del sustrato geológico de la cuenca del Río Esmeraldas a escala 1:1.500.000

Los ríos que fluyen a través de geología tipo mixta (MIX) son los más abundantes y representan más del 50% del total. Los ríos que fluyen a través de geología de tipo volcánico (VOLC) son el siguiente grupo más importante, aunque situados muy por debajo del 50%. Otros tipos de geología muestran una presencia marginal en las subcuencas.



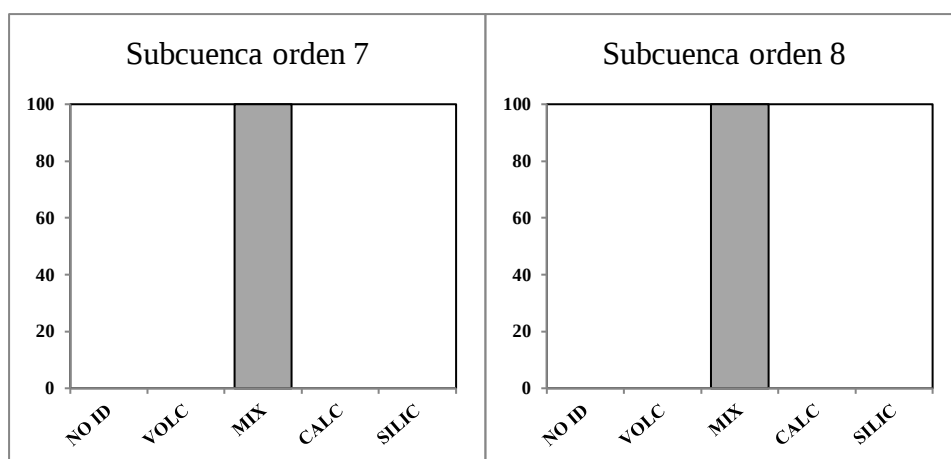


Figura 16. Frecuencia de la geología según el orden de río

Análisis de componentes principales (ACP)

En el ACP, se obtuvieron seis componentes principales (Tabla 3). Los seis componentes explicaron el 77 % de variabilidad total entre ríos.

El componente 1 describió que las variables de elevación y sustrato volcánico son los valores más altos, están correlacionados positivamente y se encuentran representados con los colores más oscuros en la parte alta de la cuenca, esto se debe a que estos ríos fluyen desde de zonas volcánicas y que por ello existe sustrato volcánico en el valle de Cumbayá en Quito. Los valores negativos fueron los más bajos y se encontraron en la parte baja de la cuenca con colores más claros y blancos, poseen ríos de temperatura alta, precipitaciones elevadas y mayor cantidad de bosque siempreverde (Figura 17).

El componente 2 se correlacionó positivamente con el matorral seco y con sustrato geológico calcáreo, se encontró en la zona alta de la cuenca con colores oscuros mientras que los colores claros son los valores más bajos e indicaron que son ríos que poseen pendiente bajas en el que predominó el bosque siempreverde y sustrato silíceo en sus cuencas (Figura 18).

El componente 3 indicó la alta correlación entre el matorral seco y el sustrato mixto y se halló en la parte alta de la cuenca, en el valle de Cumbayá en Quito, en el que también se encontró sustratos volcánico y calcáreo con colores más claros ya que su correlación fue negativa (Figura 19).

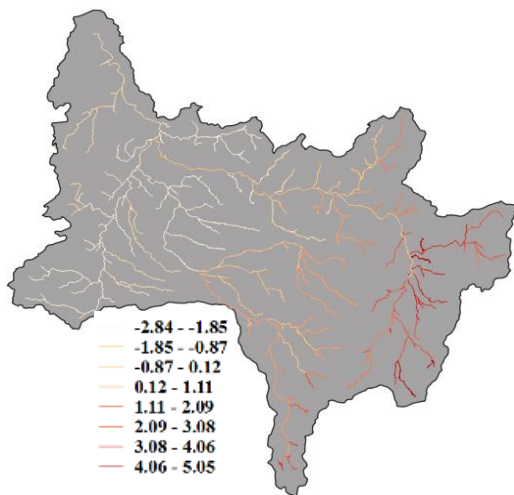
El componente 4 indicó correlación positiva entre páramo y sustrato mixto en la parte alta de la cuenca representado con el color más oscuro mientras los valores negativos se ubicaron en la parte baja de la cuenca, en el Río Guayllabamba, en donde se halló una mayor porción de bosque siempreverde y sustrato calcáreo (Figura 20).

El componente 5 indicó que el Río Guayllabamba tuvo una correlación positiva con bosque semideciduo, además estuvo asociado al matorral húmedo y tuvo sustrato volcánico en su cuenca debido a que el río parte desde la zona alta de la cuenca en donde hay zonas volcánicas (Figura 21).

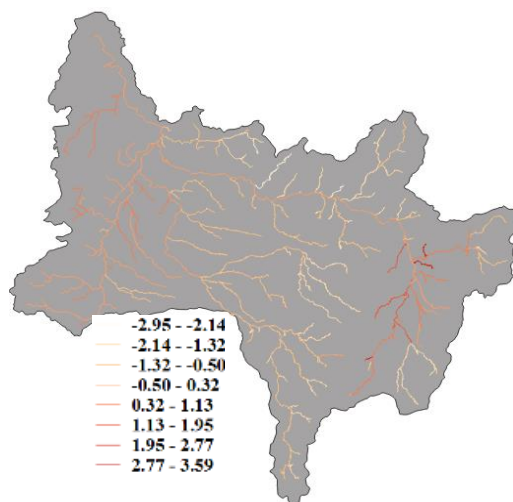
El componente 6 estuvo correlacionado de forma negativa con el matorral húmedo y bosque semideciduo, fueron los valores más bajos del componente, se identificaron con color blanco y se ubicaron en el Río Guayllabamba mientras que los colores oscuros fueron valores altos en el componente, pero no existió un valor positivo significativo (Figura 22).

Tabla 2. Análisis de componentes principales de las variables de estudio para la tipología de ríos de la cuenca Esmeraldas

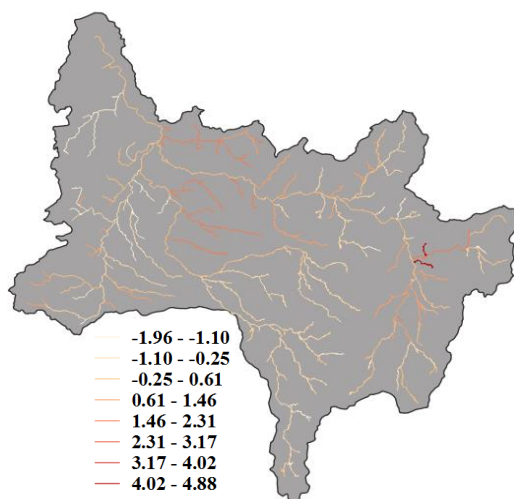
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
% varianza	0,328	0,122	0,095	0,084	0,073	0,071
% acumulado	0,328	0,449	0,544	0,629	0,702	0,773
TEMP	-0,421	0,141		-0,135		
PREC	-0,333	-209	0,257			
ELEV	0,433			0,120		
PEND	0,279	-0,336		-0,295	-0,155	
BSD				-0,137	0,678	-0,488
BSV	-0,334	-0,346	-0,356	-0,102	0,107	
MSEC	0,278	0,414	0,376	-0,206		0,177
MHUM		0,136			-0,171	-0,777
PARM	0,177	-0,113		0,692	-0,101	-0,176
NO ID	0,114	0,199	0,341	-0,281	0,132	-0,102
VOLC	0,345	-0,225	-0,159		0,331	0,107
MIX	-0,272		0,524	0,312		
CALC	-0,124	0,526	-0,463		-0,242	
SILIC		-0,343	0-179	-0,372	-0,510	0,284



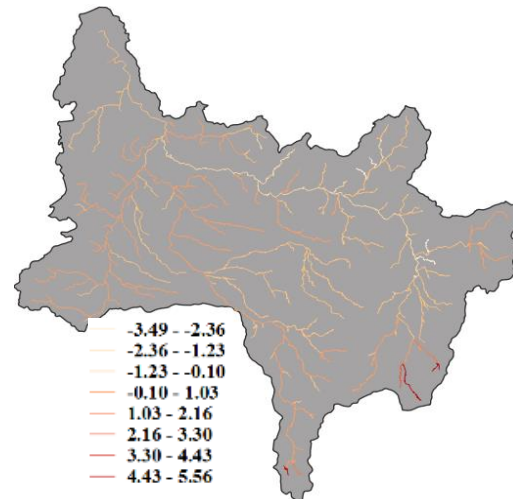
Componente 1



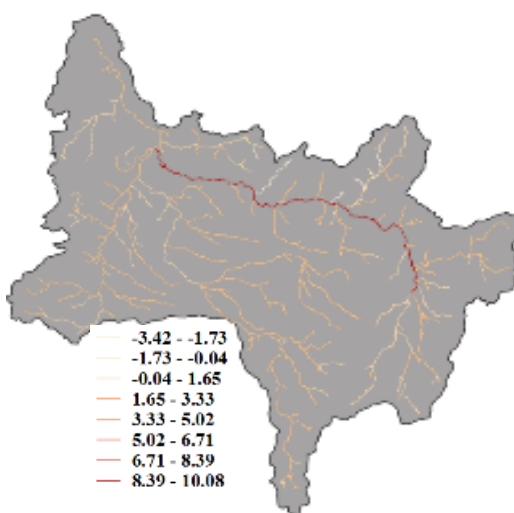
Componente 2



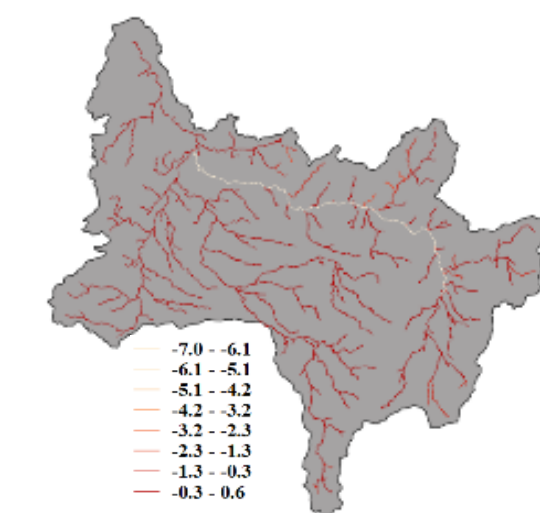
Componente 3



Componente 4



Componente 5



Componente 6

Clasificación por el método k-medias

La figura 23 indica la variabilidad entre el porcentaje y el número de clústeres asignados por el investigador; se determinó 6 clases como el número más apropiado para la clasificación de los ríos de la cuenca como resultado del valor residual entre las clasificaciones con números crecientes.

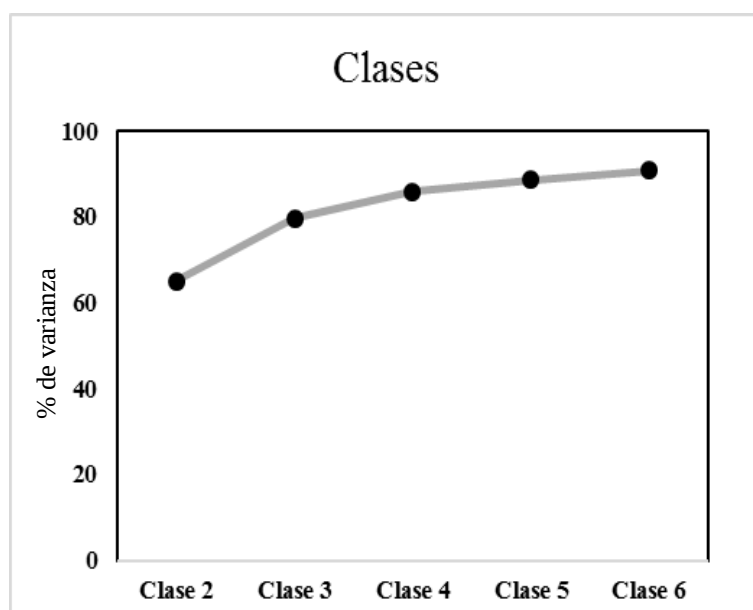


Figura 17. Porcentaje de la variabilidad total explicado por la variabilidad entre clases para un número creciente de clases

Se determinó el rango de variación de todas las variables que se utilizaron en la distribución para cada tipología y se presentó esta información en forma de boxplots (Figura 17, 18 y 19) que se utilizaron para crear las definiciones de cada clase (Tabla 4). El mapa de tipología de la cuenca del río Esmeraldas que se obtuvo en este estudio con el número de tipos ya establecidos muestra de forma clara su distribución por toda la cuenca (Figura 20). El tipo 1 denominado ríos montanos y altomontanos asociados a matorrales húmedos representa el 15% de la distribución en la cuenca, este tipo de ríos lo encontramos en la región Interandina y en la Costa se encuentra presente muy cerca del estuario del río Esmeraldas. El tipo 2 denominado ríos supramontanos de cuencas volcánicas con nieves perpetuas representa el 8% de la distribución en la cuenca y los encontramos únicamente en la región Interandina muy cerca de los Páramos del Ecuador situado en cuencas con sustratos geológicos de origen volcánico. El tipo 3 denominado ríos piemontanos y montanos asociados al bosque siempreverde que representa el 20% de la distribución en la cuenca y es el segundo más predominante de la cuenca; se

encuentra en la región Interandina. El tipo 4 denominado ríos montanos asociados al matorral seco representa el 14% de distribución en la cuenca, son ríos que se encuentran entre los tipos 1 y 6. El tipo 5 denominado ríos supramontanos asociados a los páramos representa el 16% de la distribución en cuencas de sustratos mixtos o calizos. Y que únicamente los encontramos en los páramos de la cuenca del río Esmeraldas; finalmente el tipo 6 denominado ríos de tierras bajas y piemontanos asociados al bosque siempreverde representa el 24% de toda la distribución siendo la tipología con mayor predominancia, abarcando toda la región Costa o Litoral y parte de la región Interandina del Ecuador en cuencas muy lluviosas con sustrato geológico mixtos o calizos.

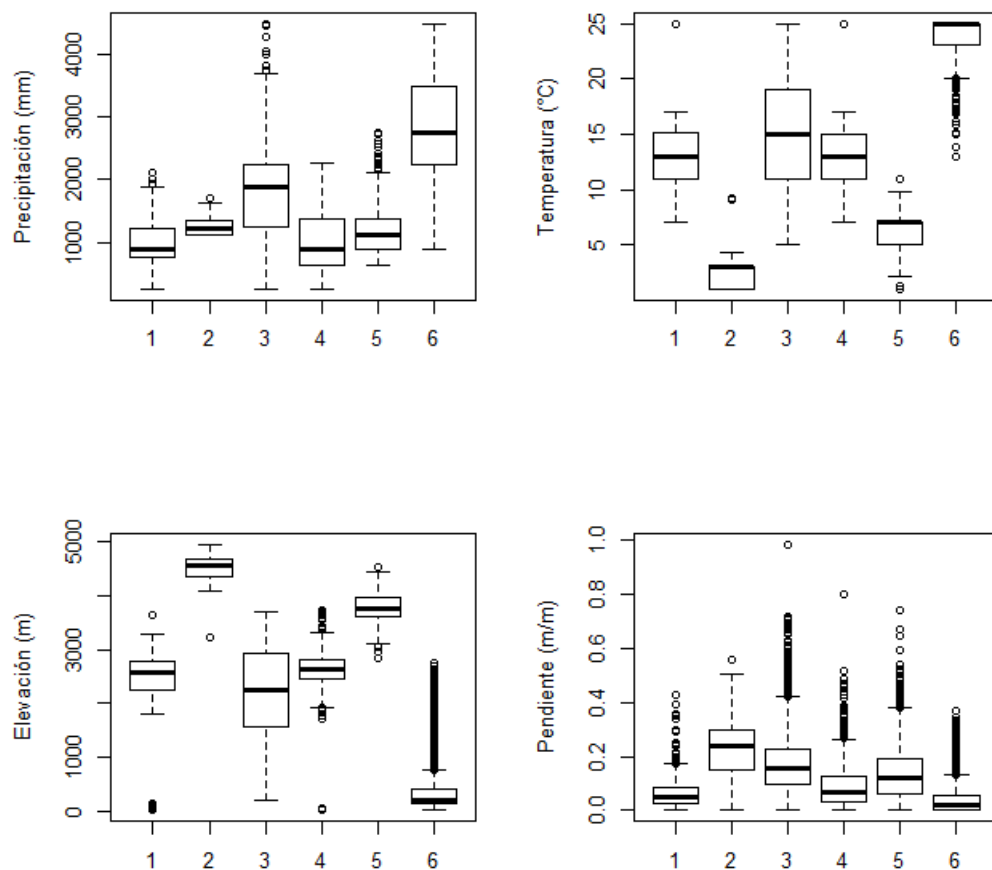


Figura 18. Diagrama de caja de las variables ambientales de la cuenca del Río Esmeraldas

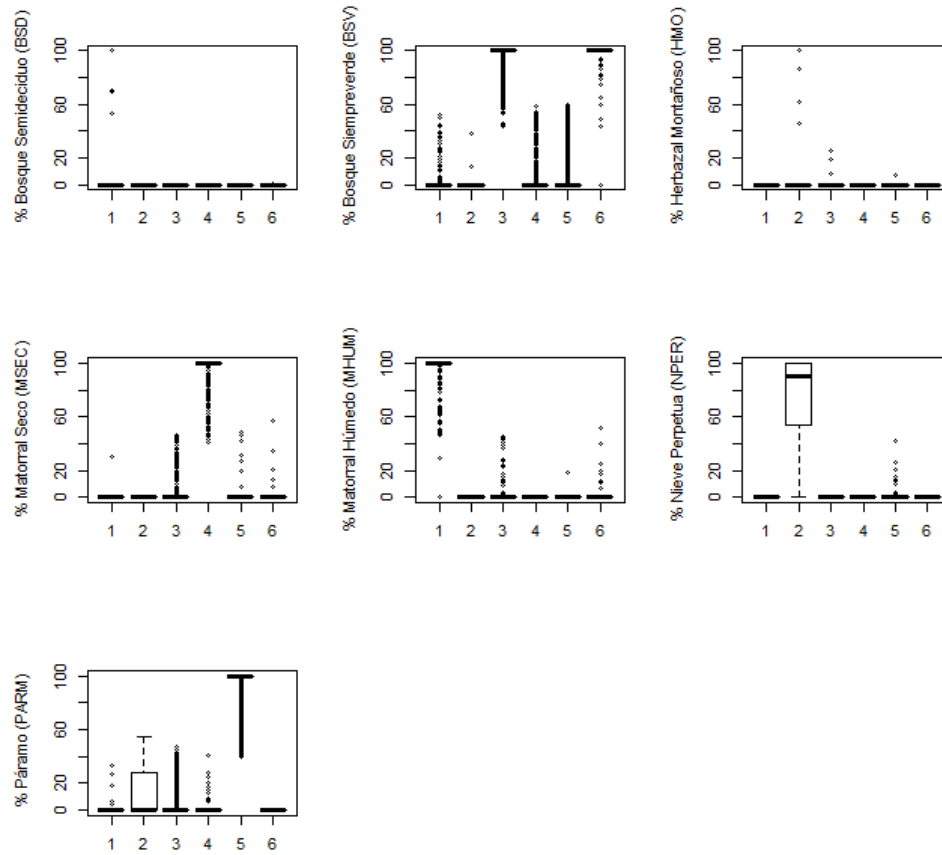


Figura 19. Diagrama de caja de la vegetación de la cuenca del Río Esmeraldas

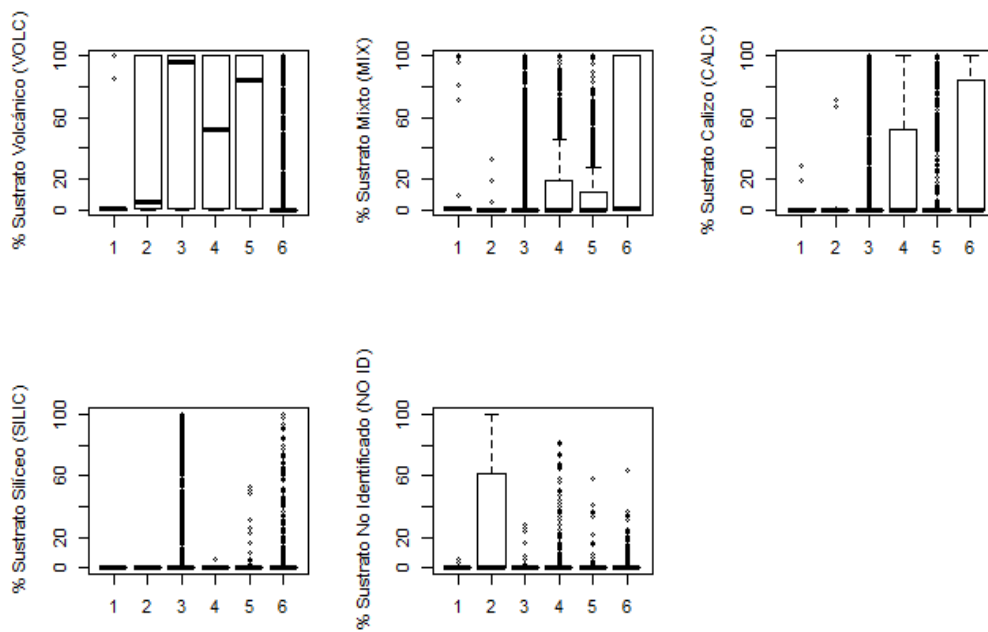


Figura 20. Diagrama de caja de la geología de la cuenca del Río Esmeraldas

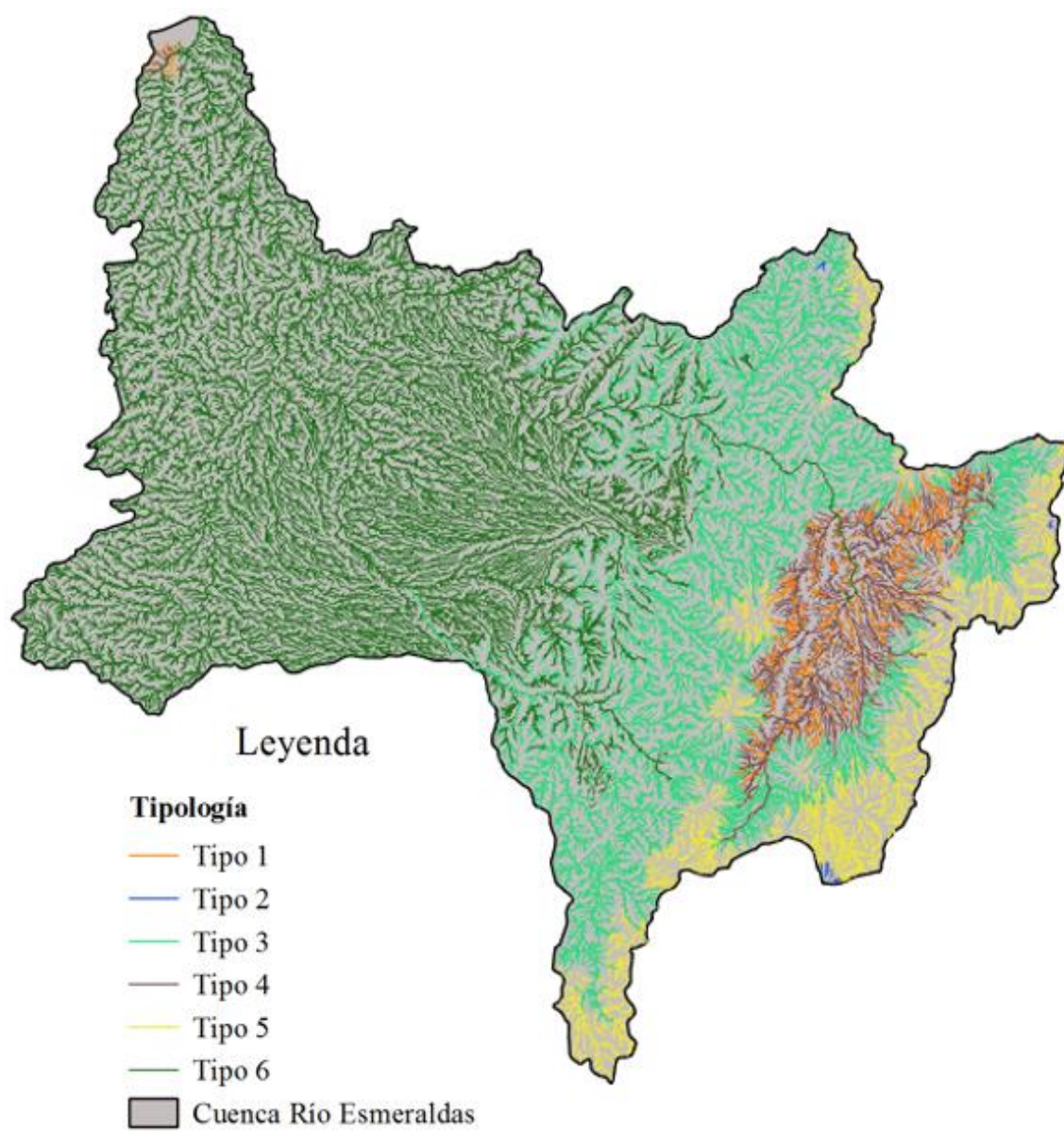


Figura 21. Mapa de tipología de la cuenca del Río Esmeraldas

Tabla 3. Clasificación tipológica de los ríos de la cuenca del Río Esmeraldas

COD	Nº	Nombre	Tipología
Tipo 1	2847	Ríos montanos y altomontanos asociados a matorrales húmedos	Río situados entre 1900 y 3400 m, con temperatura media anual entre 10 y 15 °C, que reciben hasta 2000 mm anuales de precipitación asociados a matorrales húmedos en cuencas de sustrato geológico variable
Tipo 2	1500	Ríos supramontanos de cuencas volcánicas con nieves perpetuas	Ríos por encima de 4000 m, con temperatura media anual entre 0 y 5 °C, que reciben precipitaciones anuales entre 1000 y 1500 mm asociados a páramos y nieve perpetua, situados en cuencas con sustratos geológicos de origen volcánico
Tipo 3	3736	Ríos piemontanos y montanos asociados al bosque siempreverde	Ríos con alturas entre 1000 y 3000m, con temperatura media anual entre 10 y 20 °C, con precipitaciones anuales variables pero normalmente entre 1000 y 2000 mm, asociados al bosque siempreverde en cuencas de sustratos mixtos, silíceos y calizos
Tipo 4	2606	Ríos montanos asociados al matorral seco	Ríos situados entre 2500 y 3000m, con temperatura media anual entre 10 y 15 °C, con precipitaciones anuales por debajo de 1200 mm asociados a matorrales secos en cuencas de sustratos mixtos, calizos y volcánicos.
Tipo 5	2915	Ríos supramontanos asociados a los páramos	Ríos situados entre 3000 y 4000 m, con temperatura media anual entre 5 y 10 °C, con precipitaciones anuales por debajo de 1500 mm asociados a los páramos en cuencas de geología variable
Tipo 6	4419	Ríos de tierras bajas y piemontanos asociados al bosque siempreverde	Ríos situados por debajo de los 1000 m, con temperatura media anual que oscila entre 20 y 25 °C, que reciben precipitaciones anuales entre 1000 y 4000 mm, asociados al bosque siempreverde, en cuencas de sustratos mixtos o calizos.

CAPITULO IV: DISCUSIÓN

El ACP tiene la ventaja de explorar la correlación espacial de las variables de clasificación e identificar aquellas variables que explican una mayor variabilidad entre los tramos fluviales, pero sólo permite identificar las tipologías de una forma subjetiva a partir de los puntajes que reciben las observaciones y tampoco define de manera exacta el número de clases o tipologías necesarias para describir la variabilidad de los tramos fluviales que se quieren clasificar (Ministerio del Ambiente, 2005). Por otro lado, el método K-medias o análisis de conglomerados permite que el investigador seleccione el número de clases o tipologías en función de la variabilidad residual o fracción de la variabilidad entre tramos fluviales que no es explicada por la clasificación, así el número de clases se aumenta progresivamente hasta que la variabilidad residual es suficientemente pequeña a juicio del investigador. Sin embargo, este método no proporciona información sobre las variables que son importantes para la clasificación y sus correlaciones (Ministerio del Ambiente, 2005). En nuestro estudio, ambos métodos fueron empleados y se logró conseguir la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre los grupos obteniendo finalmente 6 tipos de ríos en la cuenca del río Esmeraldas.

A pesar de que la cuenca del río Esmeraldas se encuentra en la región del Chocó, una zona considerada de alta biodiversidad, los cauces fluviales pueden ser clasificados correctamente con seis tipologías. Aparentemente, el número de tipologías no depende de la biodiversidad local o la extensión que ocupan los sistemas a clasificar. Así, CEDEX (2004) clasifica todos los ríos españoles en 19 tipologías, siendo la superficie estudiada (505.990 km²) 20 veces mayor que la cuenca del río Esmeraldas (21.699 km²). Por otro lado, Fuster et al. (2010) presentan 35 tipologías diferentes para ríos de Chile, con una superficie un poco mayor (706.102 km²) que España. Chile es el país más largo del mundo con 4.329 km de longitud con una orientación norte-sur resultando en una gran variabilidad climática y una mayor variación tipológica de los sistemas fluviales. En el caso de la cuenca del río Esmeraldas, los factores principales que determinan la clasificación tipológica de los ríos serían el fuerte gradiente altitudinal, con los cambios asociados de temperatura, vegetación y sustrato geológico, y el efecto de sombra de lluvia que se observa en la zona intra-andina (valles de Quito y Cayambe).

Una clasificación tipológica de los sistemas fluviales basada sólo en indicadores geográficos será útil si las características de los ríos y de las comunidades biológicas varían según las tipologías definidas. Este proceso de validación puede realizarse con

datos fisicoquímicos (Ministerio del Ambiente, 2005) o biológicos (Bonada et al., 2002). Aunque existe información sobre la cuenca del Esmeraldas, en el río Teaone, sobre caracterización con diatomeas para la calidad del agua (Ortiz, 2015) o también información de una guía de peces (Jiménez, 2015) que determina la riqueza ictiológica de la cuenca del Río Esmeraldas, esta información no es suficiente para realizar una validación de esta clasificación. La clasificación tipológica puede ser entonces una herramienta para detectar zonas geográficas donde la información sobre los sistemas fluviales es limitada, mientras que el aporte de datos fisicoquímicos y biológicos de campo puede resultar en la necesidad de sustituir las variables de clasificación utilizadas, añadir variables nuevas o incluso aumentar o disminuir el número de tipologías definidas. De esta forma, se pueden identificar lagunas en el conocimiento de la ecología fluvial y optimizar el esfuerzo de los programas de monitoreo o investigación.

Finalmente, este trabajo sólo utiliza una fracción de las variables sugeridas por la DMA en sus dos sistemas de clasificación (Ley 62, 2003). Se necesita dedicar más esfuerzo para poder incluir en la clasificación otras variables de las cuales no existe información disponible como: factores físicos y químicos que determinan las características del río o parte del río y, por ende, la estructura y composición de la comunidad biológica, cloruros y transportes de sólidos y así lograr obtener una clasificación más representativa de la variabilidad de los cuerpos de agua. Este trabajo también ha servido para demostrar el esfuerzo que supone realizar este tipo de clasificaciones en una región de extensión moderada. Su aplicación a nivel nacional en todo el Ecuador requiere una gran capacidad de procesamiento de información digital y, probablemente, esta tarea debería abordarse por regiones vertientes (vertientes pacífica y atlántica). Igualmente, sólo se han explorado dos métodos de clasificación, el ACP y el K-medias, pero existe una gran variedad de métodos de análisis de clusters que podrían ser comparados, aunque la elección final dependerá de las experiencias previas del investigador y de la información disponible sobre las variables consideradas en su estudio.

CAPITULO V: CONCLUSIONES

En la cuenca del río Esmeraldas se pueden identificar 18.023 cuerpos de agua o tramos fluviales, el río Esmeraldas es el eje principal de la cuenca, alcanzando el orden 8.

De los dos métodos de clasificación utilizados, el K-medias ha resultado más útil que el ACP para seleccionar el número de tipologías necesarias y determinar sus características.

A partir de las 14 variables de clasificación utilizadas, los tramos fluviales de la cuenca del río Esmeraldas pueden clasificarse en seis tipologías diferentes: ríos montanos y altomontanos asociados a matorrales húmedos, ríos supramontanos de cuencas volcánicas con nieves perpetuas, ríos piemontanos y montanos asociados al bosque siempreverde, ríos montanos asociados al matorral seco, ríos supramontanos asociados a los páramos y ríos de tierras bajas y piemontanos asociados al bosque siempreverde. La clase más abundante es el tipo 6, ríos de tierras bajas y piemontanos asociados al bosque siempreverde, que incluye el 25% de los tramos fluviales de la cuenca y la clase menos abundante es el tipo 2, ríos supramontanos de cuencas volcánicas con nieves perpetuas, que incluye el 8% de los tramos fluviales de la cuenca.

CAPITULO VI: RECOMENDACIONES

La tipología no solo debe estar basada en descriptores de carácter geográfico, geológico e hidrológico; la DMA recomienda la importancia de emplear descriptores biológicos o ecológicos ya que éstos subrayan la importancia de diferenciar tipos de masas de agua con relevancia ecológica.

Es necesario realizar estudios de muestreo sobre la riqueza, abundancia y composición biológica que existe en las cuencas hidrográficas del Ecuador para complementar futuras clasificaciones tipológicas.

Es necesario emplear métodos estadísticos y técnicas multivariantes para obtener un claro y acertado resultado sobre las clasificaciones; estos métodos y técnicas serán adoptados previamente por el investigador.

Bibliografía

- Agencia Vasca del Agua . (2017). Caracterización de la Demarcación Hidrográfica. Euskadi, 48.
- Aguirre, N. (2007). Manual para el Manejo Sustentable de Cuencas Hidrográficas. Loja: Universidad de Loja.
- Ávila, H., & García, S. (2015). Análisis de Componentes Principales, como herramienta para interrelaciones entre variables fisicoquímicas y biológicas en un ecosistema léntico de Guerrero, México. Revista Iberoamericana de Ciencias, 47.
- Bonada, N., Munné, A., & Rieradevall, M. (2002). Ensayo de una tipología de las cuencas mediterráneas del proyecto GUADALMED siguiendo las directrices de la directiva del agua. Limnología (págs. 77- 87). Madrid : ISSN: 0213-8409.
- CAMAREN. (2005). Guía Metodológica de Inventarios de los Recursos Hídricos . Quito.
- Campos, C. (2012). Análisis de Precipitación en Cuencas. Chimbote-Perú: Universidad Nacional del Santa.
- De la Fuente, A., & Sabando, M. (31 de 05 de 2010). Clasificación de Cuerpos de agua . Chile.
- DMA. (2005). Caracterización de los tipos de río y lagos . Madrid .
- Elosegui, A. (2009). Conceptos y Técnicas en Ecología Fluvial. España: Fundación BBVA.
- Encalada, A. (2013). Universidad San Fransisco de Quito. Obtenido de http://www.usfq.edu.ec/publicaciones/polemika/Documents/polemika005/polemika005_007_articulo004.pdf
- Felícísimo, A. (2016). Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones.
- Férrandez, A. (2012). Caracterización Morfométrica de la Cuenca Hidrografica.
- Gaspari, F. S., Delgado, M., Rodríguez, A., & Besteiro, S. (2010). Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. La Plata - Argentina: Grupo de Manejo de Cuencas.
- González, A. (2004). Análisis Morfométrico de la Cuenca y de la Red de Drenaje del Río Zadorra y sus Afluentes Aplicado a la Peligrosidad de Crecidas. España: Universidad del País Vasco.

- Ibañez, & Moreno. (2016). Morfología de las cuencas hidrográficas. Obtenido de Universidad Técnica de Valencia.
- Jiménez P, Aguirre W, Laaz E, Navarrete R, Nugra F, Rebolledo E, Zárate E, Torres A, Valdiviezo J. (2015). Guía de peces para aguas continentales en la vertiente occidental del Ecuador. Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Esmeraldas (PUCESE); Universidad del Azuay (UDA) y Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales (MECN) del Instituto Nacional de Biodiversidad. Esmeraldas, Ecuador. 416 pp.
- Ley N° 62. Normas Comunitarias sobre Protección del Agua. Directiva 2000/60/CE. España, 30 de diciembre de 2003.
- MAE, & SNI. (s.f.). Ministerio del Ambiente del Ecuador . Obtenido de Ministerio del Ambiente del Ecuador : <http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PDOT/NIVEL%20NACIONAL/MAE/ECOSISTEMAS/DOCUMENTOS/Geoformas.pdf>
- Ortiz, M. (2015). Caracterización de Diatomeas como Herramienta para el Estudio de la Calidad del Agua del Río Teatone. (Trabajo de grado). Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Esmeraldas, Ecuador.
- Ministerio de Ambiente de España. (2005). Análisis de las Características de las Demarcaciones. Madrid, España.
- Monsalve, G. (2002). Ingeniería Civil. Obtenido de <http://ingenieriacyvil.tutorialesaldia.com/como-calculer-la-pendiente-media-de-una-cuenca-hidrografica/>
- QGIS. (2016). Documentación para QGIS 2.8. Obtenido de https://docs.qgis.org/2.8/es/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html
- Ramírez, J. (2015). Alternativas de Manejo Sustentable de la Subcuenca del Río Pitura, Provincia de Imbabura, Ecuador. Imbabura, Ecuador : Universidad de la Plata
- Rosas, L. (2009). Obtenido de SENAGUA: http://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/07/Manual_de_procedimientos.pdf

Rosas, L. (2012). Propuesta de Codificación y Delimitación de las Unidades Hidrográficas de la Cuenca del Río Esmeraldas. Quito: Escuela Politécnica del Ejército-ESPE.

Rubén, L. (Agosto de 2010). LABSIG Y PR . Obtenido de <https://langleruben.wordpress.com/about/>

Universidad de Chile. (2010). Clasificación de cuerpos de agua. Chile : Departamento de Ciencias Ambientales. Obtenido de Clasifica.

Universidad de Murcia. (2016). El Modelo Digital de Terreno. Geograf, 132-133.