

Estudio geomorfométrico fluvial Aplicado a la cuenca hidrográfica del río Guayubín, en República Dominicana Sirviéndose de SIGs de código abierto.

Darihana Linares Laureano *Estudiante de Lic. en Geografía Mención Recursos Naturales y Ecoturismo, en la Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD)*

Resumen del manuscrito

Keywords: Geomorfología fluvial, Morfometría de cuencas

1 Introducción

Desde hace siglos atrás el hombre ha buscado la manera de explicar y entender las distintas formas que el paisaje terrestre (relieve) posee. Autores numerosos han investigado la génesis de estas nociones geomorfológicas, remontándose a tres siglos atrás. Autores como Hutton, Playfair y Lyell, sirvieron de antecesores o bases para la ciencia geomorfológica. Tras su consolidación como ciencia en Francia numerosos autores fueron demostrando la importancia de esta ciencia, incluso ramificándola (climática, eólica, litoral, glacial, estructural, tectónica, kárstica y fluvial; siendo la última de interés para esta investigación), para mayor eficacia en sus estudios.

Los estudios en la geomorfología fluvial a nivel mundial son numerosos y han servido para explicar cómo los drenajes de los ríos y sus redes hidrográficas son importantes para la geomorfología, ya que estas redes fluviales son parte de los procesos de modelado más activos en la formación del relieve y que permiten mensurar la configuración del mismo. Para los estudios en geomorfología fluvial, se hace uso del análisis morfométrico de cuencas hidrográficas. La morfometría de cuenca se ha convertido en la técnica cuantitativa para el estudio de las cuencas de manera detallada y ordenada. Actualmente en la República Dominicana el uso del análisis morfométrico para estudiar cuencas hidrográficas es poco e insuficiente, a pesar de que la República Dominicana goza de una diversa y extensa red de cuencas hidrográficas, ricas y aprovechables para la aplicación de diversas técnicas con el fin de explicar y entender las propiedades del relieve y su relación con las cuencas fluviales. Por lo que, este estudio es un aporte para dar a conocer la configuración y modelado de la cuenca hidrográfica del río Guayubín, con el fin de fijar parámetros que permitan evaluar esta cuenca fluvial; identificando el aspecto general de la cuenca y de la red, el orden de red y análisis hortoniano, los perfiles longitudinales e índice de concavidad de cursos más largos, y la morfometría de cuenca. En ese mismo orden es imprescindible conocer el concepto de cuenca fluvial o de drenaje, que no es más que el conjunto de cuerpos de agua con un área determinada que fluyen por distintos canales y escurren en un mismo desagüe. Según los autores Gregory y Walling, 1973; y Chorley, 1969 (como citó Gutiérrez Elorza (2008)), una cuenca fluvial compone el espacio determinado en el que se suministran las aguas que discurren por la superficie, el mismo está delimitado tanto por su relieve y su hidrología. También considerada como una unidad imprescindible en geomorfológica.

1.1 Revisión bibliográfica

El aspecto general de la cuenca y de la red se refiere a los parámetros hidrográficos que posee la cuenca (la acumulación de flujos y cálculo de su umbral, elevación, depresión, y otros). Según Castillo (2015), la acumulación de flujos señala a todas las celdas que desaguan en una en particular, la misma se adquiere partiendo de la dirección de la corriente o flujo. Venkatachalam et al. (2001) dicen que la acumulación de flujo de una celda se instituye de acuerdo con la sumatoria de los valores de la acumulación de flujo de las celdas próximas que drenan en ella. En cuanto al umbral, según ESRI (2012), se es necesario un ráster de acumulación de flujo y la ‘porción mínima de celdas que componen una corriente de agua. También se refiere a la forma que adquiere la cuenca y a la forma de su red de drenaje, según la conformación de sus ríos y el material rocoso que la compone (patrones de drenaje). Varios autores expresan que existe una conexión entre la estructura que posee la red de drenaje con el material rocoso (Pedraza Gilsanz (1996), Gutiérrez Elorza (2008), Howard (1967), Gregory & Walling (1973)).

El orden de red hace referencia al orden en el que se clasifican los cursos de agua, todo en base a su ramificación. Según Wikipedia (2020), el orden de un curso de agua es siempre un número entero positivo que se usa tanto en Geomorfología como en Hidrología para denotar la magnitud de ramificación que posee una red fluvial. Para Bowden & Wallis (1964), el orden de red sostiene una relación entre las rocas con la configuración de la red fluvial y con los procesos tanto hidrológicos como erosivos. La clasificación de la red se hace de manera jerárquica. Hoy día existen múltiples normas para determinar la jerarquía de una red: Strahler (1952), Horton (1945), Shreve (1967), Scheidegger (1970), Leopold et al. (1964) Hack (1957) y Topological.

Dice Pinilla (1993) que para los años 40 el análisis hortoniano había sentado las bases de lo que hoy es la morfometría fluvial; por lo que la aplicación del análisis hortoniano al estudio de cuencas hidrográficas son imprescindibles. Para Horton (1945), la razón de bifurcación resulta ser la conexión entre el número de redes fluviales de una jerarquía asignada entre el número de redes de jerarquía mayor próxima, y se;ala que esta casi siempre es constante para los ordenes de red de una cuenca.

El perfil longitudinal de un curso de agua es una línea adquirida al representar las diversas alturas que se presentan desde el nacimiento de este hasta donde desagua (Gutiérrez Elorza (2008)). Según Pedraza Gilsanz (1996), por medio de los perfiles longitudinales es posible fundamentar definiciones en segmentos con geometría heterogénea (cóncavo, convexo y rectilíneo), o pendiente; las acomodaciones para cada parte a una función matemática; e incluso análisis geométricos basados en elementos físicos o evolutivos. Gutiérrez Elorza (2008), dice que el perfil longitudinal es generalmente cóncavo, aunque esta concavidad no está clara para muchos cursos fluviales. En cuanto al índice de concavidad, este no es más que un indicador que hace posible la evaluación del nivel de torcedura o curvatura del perfil longitudinal (Garzón Heydt, Ortega, Garrote, & others (n.d.)). Se calcula así, la superficie debajo del perfil longitudinal es extraída del total del área debajo del segmento que conecta los dos límites del perfil (Goldrick & Bishop (2007)).

El análisis morfométrico abarca un conjunto de índices morfológicos que apuntan a un análisis detallado y cuantitativo de cuencas hidrográficas (Morais & Almeida (2010)). El análisis morfométrico de cuencas hidrográficas se inicia por la ordenación de canales fluviales, con la finalidad de establecer una jerarquía fluvial. Esta, a su vez, consiste en el proceso de establecer la clasificación de determinado curso de agua (o el área drenada que le pertenece) en el conjunto total de la cuenca hidrográfica en la que se encuentra. Aunque, según el autor, esto se logra con la función de facilitar y volver más objetivos los estudios morfométricos sobre las cuencas hidrográficas (Christofoletti (1988)). En cuanto a la curva hipsométrica de una cuenca Strahler (1952) dice que el porcentaje de la curva hipsométrica no es más que la relación entre el área de la sección diagonal horizontal de una red de drenaje con una altitud relativa sobre la boca de la cuenca, e incluso es-

tas curvas pueden ser explicadas y relacionadas a través del uso de parámetros bidimensionales. Y referente a la integral Hipsométrica, Fernandez & Rocha (2016) expresa que el cálculo de este índice mide como está distribuida la altitud en una cuenca fluvial.

Este estudio proporciona nueva información sobre la cuenca del río Guayubín en el campo de Morfometría fluvial, sabiendo que este es el primer estudio morfométrico que se le realiza a la cuenca; y además este posee un script el cual permite su reproducción sin coste alguno.

Preguntas de Investigación: ¿Qué forma posee la cuenca y su red de drenaje? ¿Cómo se organiza la red de drenaje? ¿Existe algún pratrón en la forma de de cuenca y red de drenaje por ordenes? ¿Se produce el fenómeno de constancia en la razón de bifurcación? ¿Se produce la relación de perfiles longitudinales e índice de concavidad con la litología en la cuenca? ¿Hay una relación entre los parámetros morfométricos con las características litológica y estructural de cuenca? ¿Con qué factores se asocian la curva e integral hipsométricas de la cuenca?

2 Área de estudio

La cuenca del río Guayubín se encuentra entre las morforegiones Cordillera Central y Valle del Cibao Occidental, en la República Dominicana (latitud 19.46°N, longitud -71.41°W), entre las provincias Santiago Rodríguez, Monte Cristi y Dajabón. En la provincia Dajabón engloba de forma completa el municipio El Pino, y de manera parcial los municipios Loma de Cabrera y Partido; en la provincia Monte Cristi contiene parcialmente los municipios Las Matas de Santa Cruz y Guayubín; y en la provincia Santiago Rodríguez comprende los municipios Villa Los Almácigos y San Ignacio de Sabaneta. Los municipios más poblados en el interior de la cuenca son Guayubín (35,923 hab.), San Ignacio de Sabaneta (34,540 hab), y Loma de Cabrera (15,624 hab). (Ver figura 1).

La cuenca del río Guayubín, según Medio Ambiente y Recurso Naturales (2015), abarca una área de 770.35 km². De acuerdo con el mapa de Medio Ambiente y Recurso Naturales (2015), la cabecera del río Guayubín se ubica en la vertiente noroeste de el Cerro La Pelada, en un paraje denominado Palo Amarillo; mientras que sus aguas se vierten en el río Yaque del Norte, en la localidad Guayubín.

3 Materiales y Metodología

Para el estudio morfométrico de la cuenca Guayubín se usó softwares de código abierto como medio para procesar datos estadísticos y modelos digitales con la finalidad de generar las informaciones a analizar e interpretar.

Tabla 1. Materiales utilizados.

Materiales	Uso
RStudio	se redactó el manuscrito, se procesaron los datos que extraídos del DEM de la cuenca a través de un script.
library rgrass7	se creó una interfaz que permitió establecer una conexión entre la version 7 del sistema de infromacion geográfica GRASS, y R, que crea un entorno GRASS desecharable dentro de R.
library sp	este paquete se utilizó para la importación, manipulación y exportación de datos espaciales en R, y para imprimir / mostrar de los mismos.

Materiales	Uso
library sf	con esto se crearon características simples (simple features), que amplían los objetos tipo data.frame con una columna de lista de características simples.
library raster	este paquete se usó para manipular datos geográficos (espaciales) en formato ‘ráster’.
library leaflet	esta función se utilizó para representar los vectores y rásters
library leafem	se usó para proveer una extensión para leaflet usados para paquetes mapview, permite mostrar las coordenadas de la posición del puntero del mouse, consultar valores de imagen a través de puntero del mouse y botones de zoom a capa.
library mapview	el paquete permitió ver los objetos espaciales de forma interactiva.
library readr	se utilizó para leer datos rectangulares (como ‘csv’, ‘tsv’ y ‘fwf’).
QGIS with GRASS	se usó para la visualización de vectores y rasters generados con RStudio en una región de GRASS, y la visualización de los mapas Topológicos y Geológicos de la República Dominicana, tambien, para la creación de algunos mapas de localización.
Google Earth	para observar datos en formato kml generados y exportados de RStudio y asi como la representacion del relieve del lugar de estudio.
Mapa Topológico de RD	se utilizó para hacer comparaciones y obtener referencias sobre el relieve.
Mapa Geológico Nacional de RD	se usó para hacer comparaciones y obtener referencias sobre la composición rocosa y los años que datan estas.

3.1 Metodología

Para el desarrollo del estudio lo primero a realizar fue crear una región de GRASS en R, importar fuentes y definir la extensión y resolución (DEM). Luego, explorar básicos entre GRASS y R.

3.1.1 Aspecto de la cuenca y de la red de drenaje.

Los parámetros de la cuenca fueron calculados por medio del addon de GRASS GIS `r.watershed` (Charles Ehlschlaeger (2003–2021b)), utilizando un Dem. Los parámetros calculados fueron acumulación, elevación, depresión, drenaje, flujo, cuenca y media cuenca, con un umbral de acumulación de flujo de 80 celdas necesarias para que exista una red de agua. Luego, las capas generadas fueron ingresadas a R con la librería `sp` y manejadas con la librería `raster`. Se usó el addon `r.water.outlet` (Charles Ehlschlaeger (2003–2021a)) para la extracción de la cuenca se usaron los parámetros siguientes: de entrada un mapa de dirección de drenajes (creado con el add-on `r.watershed`), de coordenadas de desembocadura de la cuenca (obtenidas con la librería `Mapview`), y de salida el nombre de la cuenca. Así mismo, se usó el addon `r.to.vect` (Team

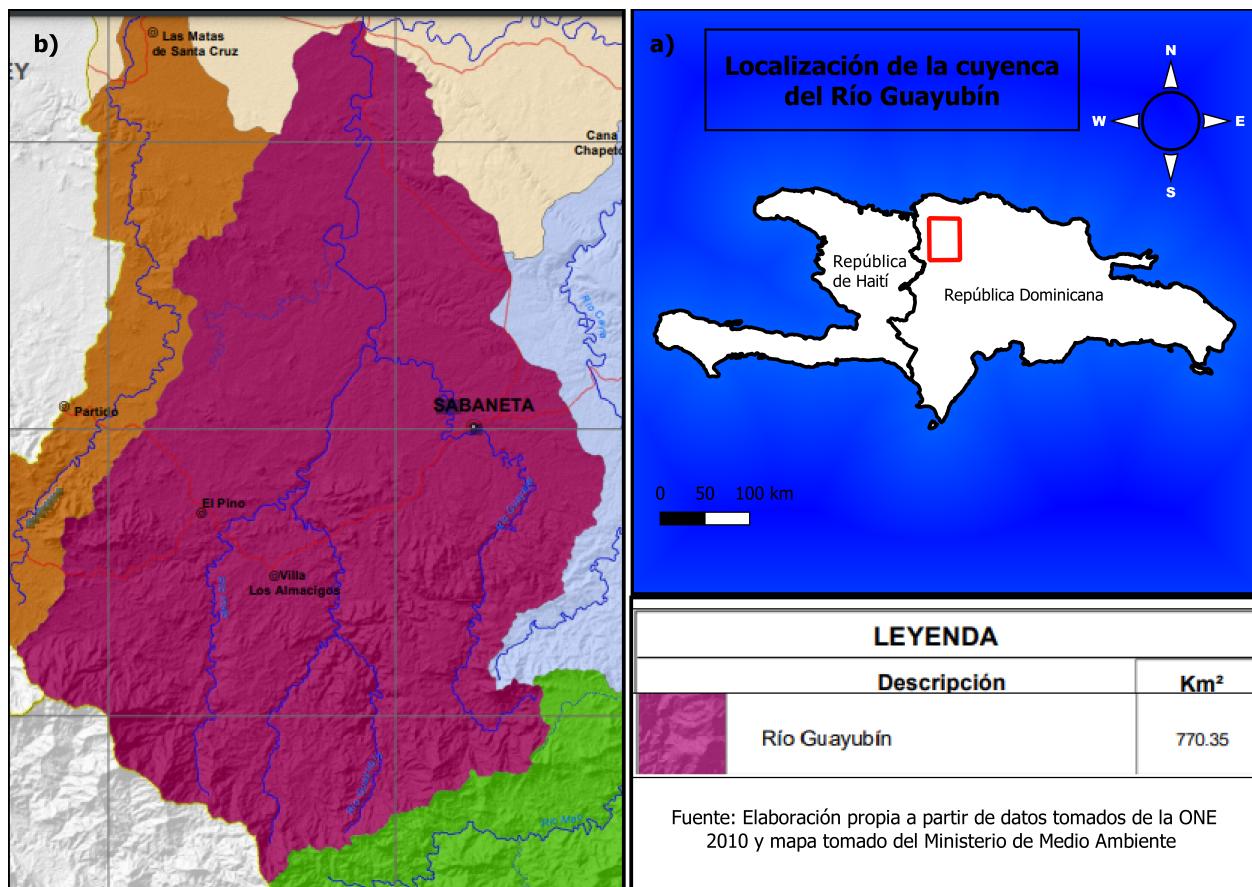


Figure 1: Cuenca del río Guayubín

(2003–2021)), para convertir el ráster resultante en vectorial, con los parámetros a continuación: de entrada el mapa ráster de la cuenca, de salida el nombre del vectorial y para la característica de salida se usó el área. Al final de la operación los resultados fueron llevados a R. Para extraer la red de drenaje se aplicó el addon `r.stream.extract` (Metz (2003–2021)), usando los parámetros: elevación, umbral de acumulación, mapa ráster de flujos y mapa vectorial de flujos. Luego los resultados de este procedimiento fueron llevados a R.

3.1.2 *Orden de red y análisis hortoniano.*

En cuanto al orden de red y el análisis hortoniano, se usó el addon `r.stream.extract` (Metz (2003–2021)), para producir un mapa de dirección de flujo con los parámetros: de entrada un modelo de elevación, un umbral de acumulación y de salida el nombre del mapa. Para la creación de mapas de ordenes de redes generados con `r.stream.order` (Jasiewicz (2003–2021)) se usaron los parámetros: de entrada un mapa ráster de red de arroyos, un modelo de elevación, un mapa de dirección de flujos, un mapa de acumulación, de salida un vector con todos los atributos de los flujos, y a salida de los vectores con los órdenes de redes según Strahler, Horton, Shreve, Hack y Topo. Para analizar el orden de red de la cuenca se utilizó la clasificación de Strahler. Mientras que se usaron los addons `r.info` (Michael O’Shea (2003–2021)), para obtener los valores mínimos y máximos del orden de red según Strahler a partir de un ráster; para delimitar la cuenca a través de la red de drenaje se utilizó `r.stream.basins` (Jarek Jasiewicz & Institute (2003–2021a)), los parámetros usados son: de entrada un mapa de dirección de flujos, un mapa mascara de flujos, rango de valores de categorías, y de salida el nombre del mapa. En cuanto a las estadísticas según orden de red de Horton para las redes de Strahler y Horton se usó el addon `r.stream.stats` (Jarek Jasiewicz & Institute (2003–2021b)), para resumir las estadísticas; los parámetros a usados fueron: de entrada un ráster de red de arroyos, un ráster de dirección de flujos, un modelo de elevación y de salida el nombre del archivo.

3.1.3 *Índices de concavidad y perfiles longitudinales.*

Para calcular los índices de concavidad y los perfiles longitudinales, primero, se obtuvieron los cursos más largos de la cuenca a través de la función `LfpNetwork` (José Ramón Martínez Batlle (2018b)), usando coordenadas de desembocadura de la cuenca obtenidas con la librería `Mapview`, vectores de ordenes de red, mapa de flujo de dirección y un sufijo de salida para los resultados que se generen. Segundo, para producir los perfiles longitudinales e índices de concavidad se empleó la función `LfpProfilesConcavity` (José Ramón Martínez Batlle (2018c)), utilizando como parámetro la red de cursos de agua más largos, coordenadas de desembocadura, un dem, un mapa de flujos de drenaje, un prefijo, un sistema de referencia de coordenadas, un parámetro de suavizado y un número de filas de los perfiles.

3.1.4 *Morfometría de cuenca.*

Tras crear una nueva región de GRASS en R, se continuó con convertir a números enteros la extensión y la resolución del DEM con las funciones `integerextent` (José Ramón Martínez Batlle (2020a)), y `xyvector` (José Ramón Martínez Batlle (2018d)). También, se usó la herramienta `gdalwarp` (Frank Warmerdam & others (1998–2021)), para reproyectar y deformar ráster. Se utilizaron los addons `g.proj` (Kelly (2003–2021)), y `r.in.gdal` (Warmerdam (2003–2021)), para im-

portar a la sesión de GRASS. Se usó el addon `r.stream.extract` (Metz (2003–2021)), para generar una red de drenaje y obtener coordenadas a continuación, y que serían, luego, transformadas a EPSG (MappingGis (2016)), como número entero con la función `My_Trans` (José Ramón Martínez Batlle (2020b)). En cuanto a la obtención de los parámetros morfométricos de la cuenca se usa el addon `r.basin` (Margherita Di Leo (2003–2021)), con los parámetros siguientes: un modelo de elevación, un prefijo de salida, coordenadas de la salida de la cuenca, umbral de acumulación, y un directorio donde se ubicará el archivo de salida. Los vectores obtenidos son transformados a EPGS (MappingGis (2016)), y así visualizar con la librería Leaflet. Y para poder explorar los parámetros de la cuenca se usó la librería Readr. Finalmente, para el cálculo de la curva y la integral hipsométrica, lo primero fue representar las cuencas con las librerías Sp y Mapview; y segundo, calcular la integral y curva hipsométrica utilizando la función `HypsoIntCurve` (José Ramón Martínez Batlle (2018a)), usando de parámetros los vectores de arroyos de cuenca de orden 2 y 3, un modelo de elevación, un asignador de campos, el número de filas y una etiqueta de tamaño.

4 Resultados

El fruto del estudio realizado a la cuenca del río Guayubín aplicando la metodología anterior, produce información que facilita el análisis y comprensión de la cuenca fluvial, tanto de manera agrupada, como de forma desagregada.

4.1 Aspecto general de la cuenca y de la red de drenaje.

Los resultados arrojados por el estudio muestran que la cuenca del río Guayubín tiene una área de 773.56 km², y un perímetro de 156.12 km. La cuenca tiene forma de pera (Terrain Works (2014)) y la forma de su red de drenaje es dendrítica (Gutiérrez Elorza (2008)). La forma de la red de drenaje no depende de un control estructural y litológico, la cuenca está asentuada en rocas de tipo igneas o magmáticas y sedimentarias (Mollat (2004)). Howard (1967) dice que los patrones dendríticos de una red de drenaje se caracteriza por sus sedimentos horizontales y resistencia uniforme. (ver figura2 y figura3).

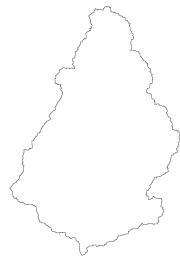


Figure 2: Cuenca del río Guayubín

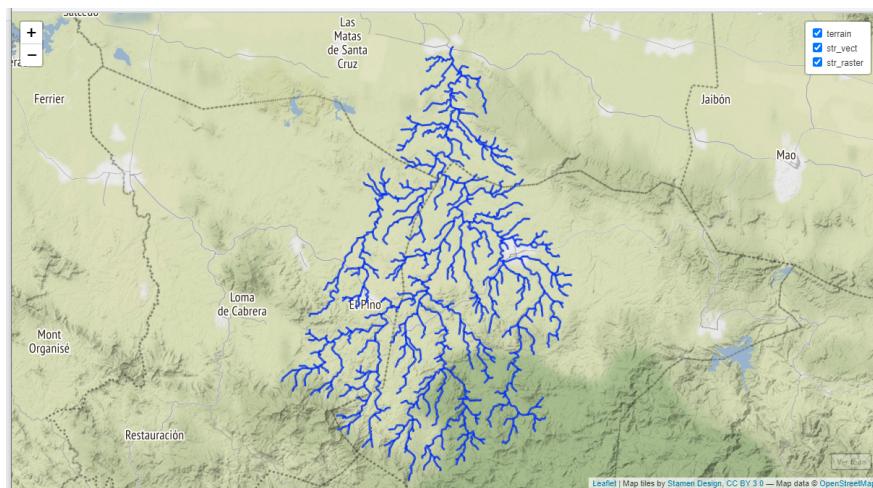


Figure 3: Red de drenaje del río Guayubín

4.2 Orden de red análisis hortoniano

El orden de red de cada tramo fluvial de la cuenca según Strahler, indicó que el orden de red máximo (5) y el mínimo (1). (ver figura4, y figura6). La red de drenaje de la cuenca presenta signos de haber sufrido el fenómeno de reorganización captura fluvial, según Pastor (2013) este fenómeno se puede identificar al observar la red de drenaje, donde se producen cambios abruptos en el recorrido del cauce que ha sido captura. Se ha observado que este fenómeno se produce en todas las redes desde orden uno a orden 5, en especial en las redes de orden mas bajo, 1 y 2, (ver figura5).

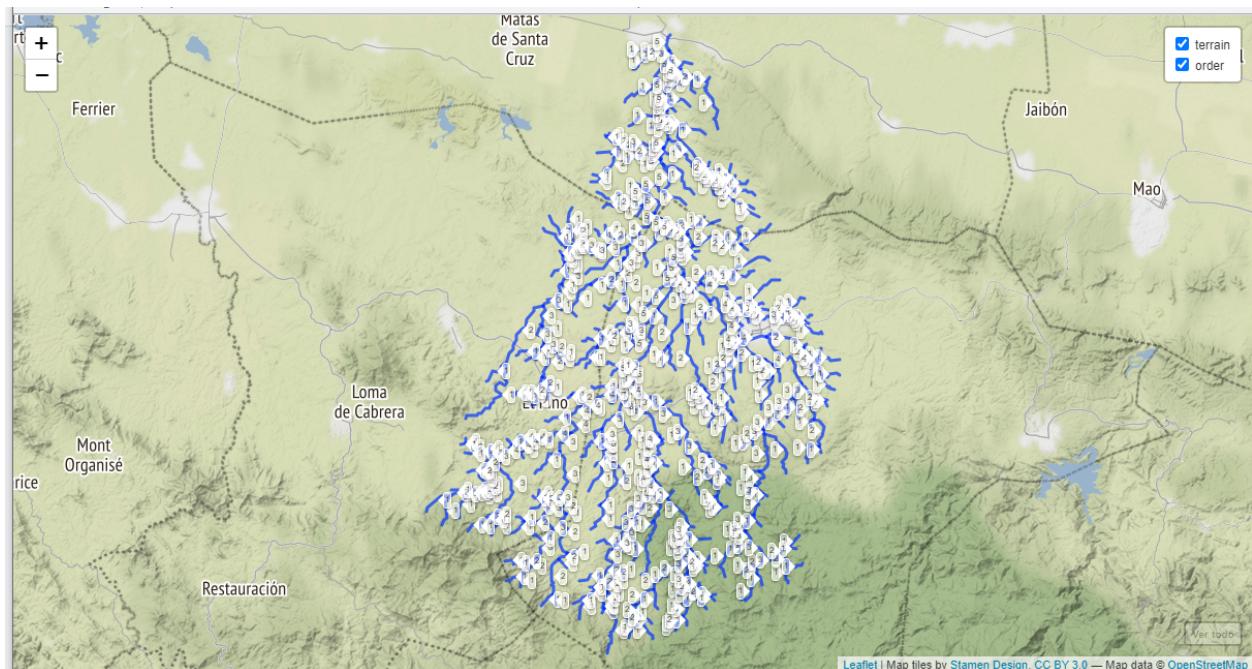


Figure 4: Ordenes de red del río Guayubín con simbología única

Las estadísticas por orden de red según la clasificación de Strahler, obtenidas con `r.stream.stats`

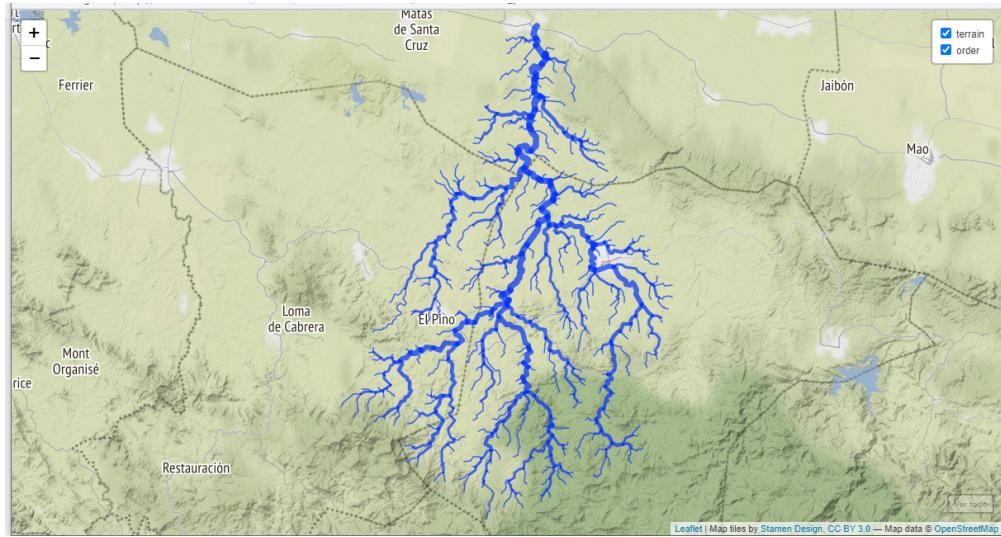


Figure 5: Ordenes de red del río Guayubín con simbología aplicando grosor según su orden

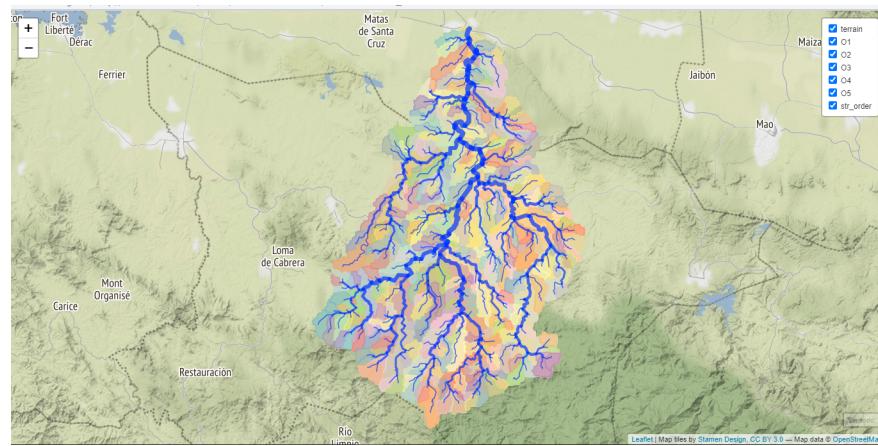


Figure 6: Subcuencas y ordenes de red del río Guayubín

indican que el numero total de redes en la cuenca es de 367, tambien se obtuvieron el total longitud por ordenes de red resultando en 693.61 km (ver tabla 2). De la misma manera se genero el dato de la razon de bifurcacion para la red basada en el coeficiente de regresion es de 4.1, tambien se obtuvieron resultados de razon de bifurcacion para cada orden de red, para los de orden 4 (4), y para los de orden 5 (0), las otras estadisticas estan detalladas en la Tabla 2 y sus derivadas en esta figura (ver figura 7).

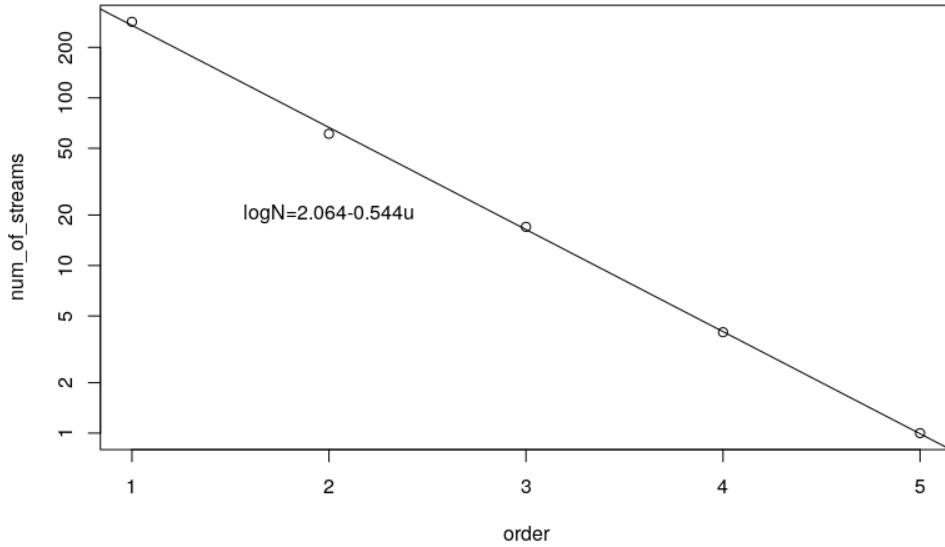


Figure 7: Número de redes según su orden y Razón de bifurcación

Tablas 2. Estadísticas de los ordenes de red

Max order	Tot.N.str.	Tot.str.len.	Tot.area.	Dr.dens.	Str.freq.
(num)	(num)	(km)	(km ²)	(km/km ²)	(num/km ²)
5	367	693.6069	773.2235	0.8970	0.4746

Tabla 2_1. Stream ratios based on regression coefficient:

Bif.rt.	Len.rt.	Area.rt.	Slo.rt.	Grd.rt.
4.0643	2.2928	4.5845	1.4798	1.8338

Tabla 2_2. Averaged stream ratios with standard deviations:

Bif.rt.	Len.rt.	Area.rt.	Slo.rt.	Grd.rt.
4.1235	2.3822	3.3126	1.4938	1.9010
0.4476	0.6025	2.2153	0.0960	0.5050

Como se observa en las tablas 2_1 y 2_2 las razones de bifurcacion obtenidas se corresponden. Ambos valores coinciden con la razon de bifurcacion calculada con codigo en R, podemos concluir que mantienen una constancia.

Tabla 2_3.

Order num	Avg.len (km)	Avg.ar (km^2)	Avg.sl (m/m)	Avg.grad. (m/m)	Avg.el.dif (m)
1	1.2435	1.7188	0.0367	0.0296	37.4437
2	2.4743	7.2904	0.0246	0.0201	49.0820
3	6.2881	31.7328	0.0165	0.0113	85.1765
4	11.5356	147.7492	0.0120	0.0066	80.0000
5	36.4888	773.2235	0.0074	0.0025	91.0000

Tabla 2_4.

Order num	Std.len (km)	Std.ar (km^2)	Std.sl (m/m)	Std.grad. (m/m)	Std.el.dif (m)
1	1.0274	1.0955	0.0379	0.0324	52.7742
2	1.9695	4.4097	0.0215	0.0194	52.5830
3	5.0992	19.0637	0.0092	0.0077	93.4085
4	5.8247	44.3177	0.0041	0.0032	57.0789
5	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Tabla 2_5.

Order	N.streams	Tot.len (km)	Tot.area (km^2)
1	284	353.1463	488.1383
2	61	150.9325	444.7173
3	17	106.8969	539.4576
4	4	46.1425	590.9969
5	1	36.4888	773.2235

Tabla 2_6.

Order	Bif.rt.	Len.rt.	Area.rt.	Slo.rt.	Grd.rt.	d.dens.	str.freq.
1	4.6557	1.9898	0.0000	1.4930	1.4748	0.7235	0.5818
2	3.5882	2.5413	4.2416	1.4930	1.7757	0.3394	0.1372
3	4.2500	1.8345	4.3527	1.3771	1.7207	0.1982	0.0315
4	4.0000	3.1631	4.6560	1.6122	2.6327	0.0781	0.0068
5	0.0000	0.0000	5.2334	0.0000	0.0000	0.0472	0.0013

En esta tabla es visible como los valores para el ratio de bifurcacion en los ordenes de red difieren, los mas parecidos son los de los ordenes 1, 3 y 4.

4.3 Índices de concavidad y perfiles longitudinales

Los cursos mas largos de la red de drenaje que presentaron los mas altos indices de concavidad fueron los cursos 30, 48, 52, 55 y 56 (0.59; 0.51; 0.51; 0.54; y 0.47, respectivamente), lo que indica que hubo un cambio en el trayecto que recorren esos cursos de agua que este relacionado a la aparicion de una roca dura, tras haber comparado los resultados de los cursos mas largo en el mapa geologico nacional (Mollat (2004)), se comprueba que existe un cambio en la litologia presente en los cursos de agua, en el caso del curso 30 con un indice de 0.59 de concavidad, al pasar de estar sobre rocas tonalitas a estar sobre rocas sedimentarias y de originadas en arcos de islas. Tambien se vio afectado de los cursos de agua mas largos el 19, quien presenta un indice concavidad de 0.46 producto de que este flujo de agua se encuentra en una parte de su trayecto con una falla tectonica, provocando el cambio en su curso. Y los cursos mas rectilineos son los cursos de agua numero 15, 16, 23 y 38, con valores menores a 0.03 (ver figura8, 9 y 10).

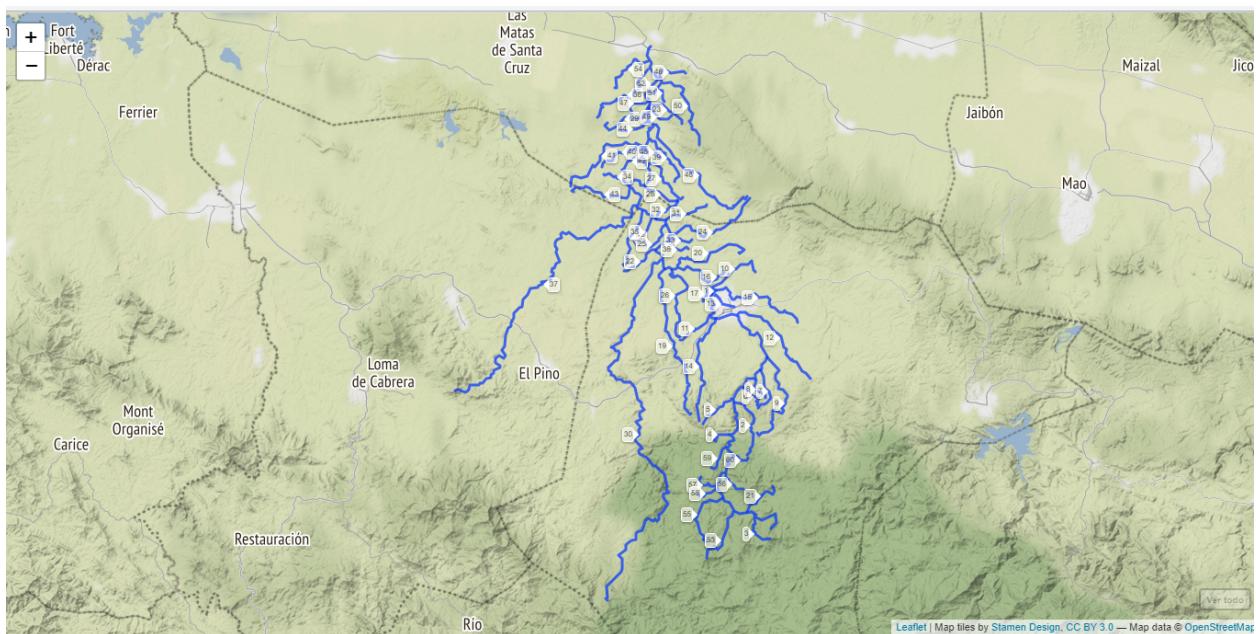


Figure 8: Cursos fluviales mas largos de la cuenca del río Guayubín

4.4 Morfometría de cuenca

Los parametros morfometricos obtenidos con `r.basin` (ver tabla 3) indican que la elevacion minima en la cuenca del rio Guayubin es 30.97 mslm y la maxima es 1396.73 mslm, por lo que existe una diferencia de elevacion en la cuenca de 1365.76 m; mientras que su elevacion media fue de 276.70. El parametro coeficiente de compacidad es 4.9 lo que indica que la forma de la superficie de la cuenca de acuerdo a su delimitacion, y su predominio en su escorrentia, es muy alargada (López Cadenas de Llano & Mintegui Aguirre (1986)); pero, el parametro forma de la cuenca genero un indice de 12.48 lo que indica que la cuenca ademas de ser muy alargada, esta bastante ensanchada en las zonas de cuenca alta y cuenca media (Córdova (2016), y Pérez (1979)). El curso mas largo de la red de drenaje o curso principal en la cuenca producido por `r.basin` tiene una longitud 61.96 km; segun una comparacion realizada entre el el vectorial de cursos mas largo (ver figura8), y el curso que se obtuvo con `r.basin` (ver figura11), es el curso

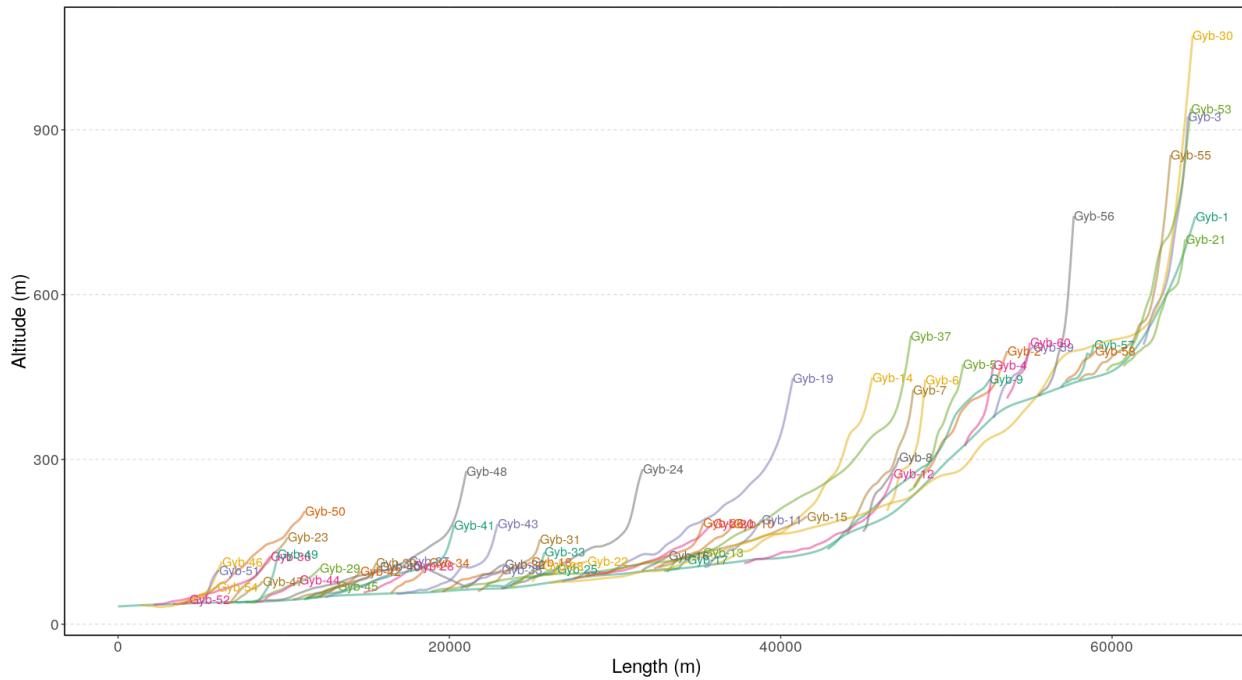


Figure 9: Perfiles longitudinales de los cursos más largos en la cuenca del río Guayubín

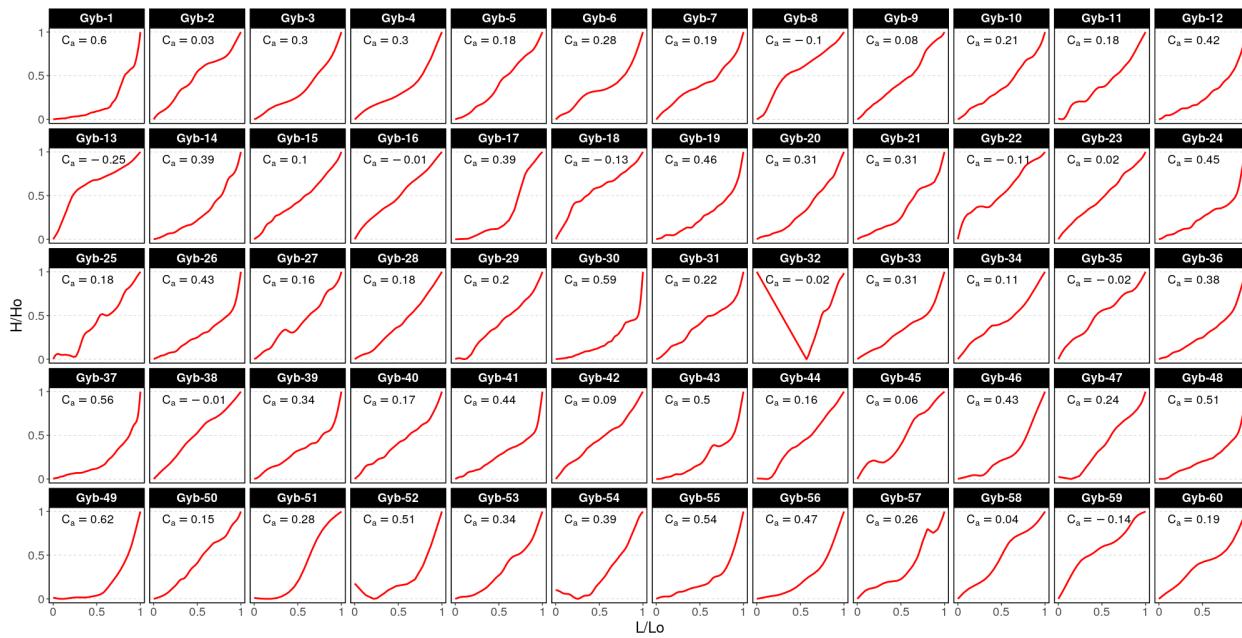


Figure 10: Perfiles longitudinales e índices de concavidad de los cursos más largos en la cuenca del río Guayubín

numero 30 obtenido con la función LfpNetwork.

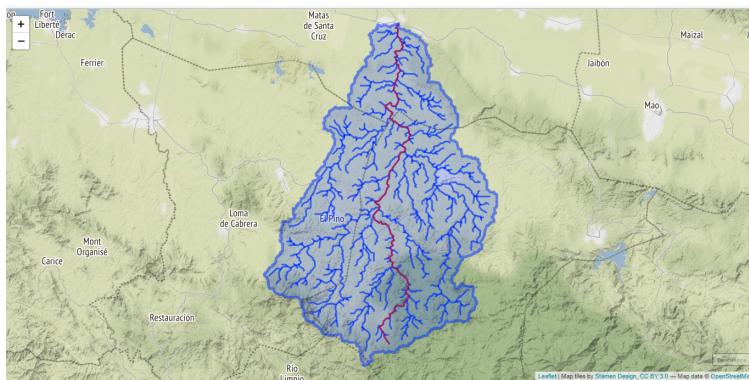


Figure 11: Cuenca del río Guayubín con su red de drenaje y su curso más largo

Tabla 3. Parámetros morfométricos de la cuenca del río Guayubín

Parámetros	Valores
Easting Centroid of basin	246465.00
Northing Centroid of basin	2151675.00
Rectangle containing basin N-W	('230220', '2175930')
Rectangle containing basin S-E	('261000', '2131290')
Area of basin [km ²]	773.5631625
Perimeter of basin [km]	156.122652506552
Max Elevation [m s.l.m.]	1396.72540740785
Min Elevation [m s.l.m.]	30.9651954818271
Elevation Difference [m]	1365.760211926023
Mean Elevation	276.7019
Mean Slope	5.17
Length of Directing Vector [km]	24.460893544594807
Prevalent Orientation [degree from north, counterclockwise]	1.4935760627096282
Compactness Coefficient	4.974655054098116
Circularity Ratio	0.3988171279899944
Topological Diameter	84.0
Elongation Ratio	0.5064682945330589
Shape Factor	12.483750895456415
Concentration Time (Giandotti, 1934) [hr]	6.906840311938352
Length of Mainchannel [km]	61.965603846
Mean slope of mainchannel [percent]	1.9669190473941982
Mean hillslope length [m]	250.4986
Magnitudo	223.0
Max order (Strahler)	5
Number of streams	343
Total Stream Length [km]	662.2185
First order stream frequency	0.2882763952710843
Drainage Density [km/km ²]	0.8560626101427108
Bifurcation Ratio (Horton)	3.8876

Parámetros	Valores
Length Ratio (Horton)	2.2966
Area ratio (Horton)	4.3704
Slope ratio (Horton)	1.4689

los datos generados sobre la curva y la integral hipsométrica muestran la reparticion de elevaciones en la cuenca (Jose Ramon Martinez Batlle (2019)). Para los cursos de agua pertenecientes a la cuenca de orden 2, los cursos con indices de concavidad e integral hipsometrica moderadamente alta fueron el 49, 42 y 14 (ver Tabla 3); mientras que los cursos con minimos valores de concavidad fueron 2, 10 y 16 (ver Tabla 3). Ver figuras 12 y 15.

En cuanto a las cursos de agua de las cuencas de orden 3, los valores maximos presentados fueron 8,11 y 13 para los valores de curva e integral hipsomeytrica; y los mas bajos fueron los de los cursos 4 y 16 (ver Tabla 4). Ver figura?? y figura??.

Tabla 3. Integral hipsométrica en las cuencas de orden 2.

Categoría	Integral hipsométrica
1	1 0.23784092
2	2 0.29691935
3	3 0.31478851
4	4 0.25845620
5	5 0.18914104
6	6 0.38449116
7	7 0.25087104
8	9 0.26943542
9	10 0.19779399
10	11 0.19287436
11	12 0.17808813
12	13 0.22437828
13	14 0.40595651
14	15 0.25477715
15	16 0.19777159
16	17 0.25313336
17	18 0.22679929
18	19 0.30597060
19	20 0.30564285
20	21 0.24773997
21	22 0.21800099
22	23 0.33229314
23	24 0.40758028
24	25 0.27096759
25	26 0.17485732
26	28 0.25721054
27	29 0.27907973
28	30 0.23545394
29	32 0.24544610
30	33 0.18990261

Categoría	Integral hipsométrica
31	34 0.22303577
32	35 0.14436574
33	36 0.30229714
34	37 0.30742281
35	38 0.34876647
36	39 0.39371293
37	40 0.14419677
38	41 0.36397062
39	42 0.45795809
40	43 0.07642614
41	45 0.48672629
42	46 0.29182502
43	47 0.47300056
44	48 0.22892086
45	49 0.50910119
46	50 0.16011357
47	51 0.14325914
48	52 0.30243670
49	53 0.22622911
50	54 0.27985062
51	55 0.16980308
52	57 0.38363564
53	58 0.29000326
54	59 0.23691203
55	60 0.30564446
56	61 0.30401039
57	62 0.25939942
58	63 0.16711030
59	64 0.14693431
60	65 0.19359746
61	66 0.17854689

Tabla 4. Integral hipsométrica en las cuencas de orden 3.

Categoría	Integral hipsométrica
1	1 0.28106607
2	2 0.24855493
3	4 0.12697883
4	5 0.21021494
5	6 0.18586633
6	8 0.40849637
7	9 0.33264116
8	10 0.15880640
9	11 0.34507681
10	12 0.32371339
11	13 0.33707592

Categoría	Integral hipsométrica
12	15 0.32319904
13	16 0.06673204
14	17 0.15091492
15	18 0.14111015
16	19 0.29051932
17	20 0.15859746
19	20 0.30564285
20	21 0.24773997
21	22 0.21800099
22	23 0.33229314
23	24 0.40758028
24	25 0.27096759
25	26 0.17485732
26	28 0.25721054
27	29 0.27907973
28	30 0.23545394
29	32 0.24544610
30	33 0.18990261
31	34 0.22303577
32	35 0.14436574
33	36 0.30229714
34	37 0.30742281
35	38 0.34876647
36	39 0.39371293
37	40 0.14419677
38	41 0.36397062
39	42 0.45795809
40	43 0.07642614
41	45 0.48672629
42	46 0.29182502
43	47 0.47300056
44	48 0.22892086
45	49 0.50910119
46	50 0.16011357
47	51 0.14325914
48	52 0.30243670
49	53 0.22622911
50	54 0.27985062
51	55 0.16980308
52	57 0.38363564
53	58 0.29000326
54	59 0.23691203
55	60 0.30564446
56	61 0.30401039
57	62 0.25939942
58	63 0.16711030

Categoría	Integral hipsométrica
59	64 0.14693431
60	65 0.19359746
61	66 0.17854689

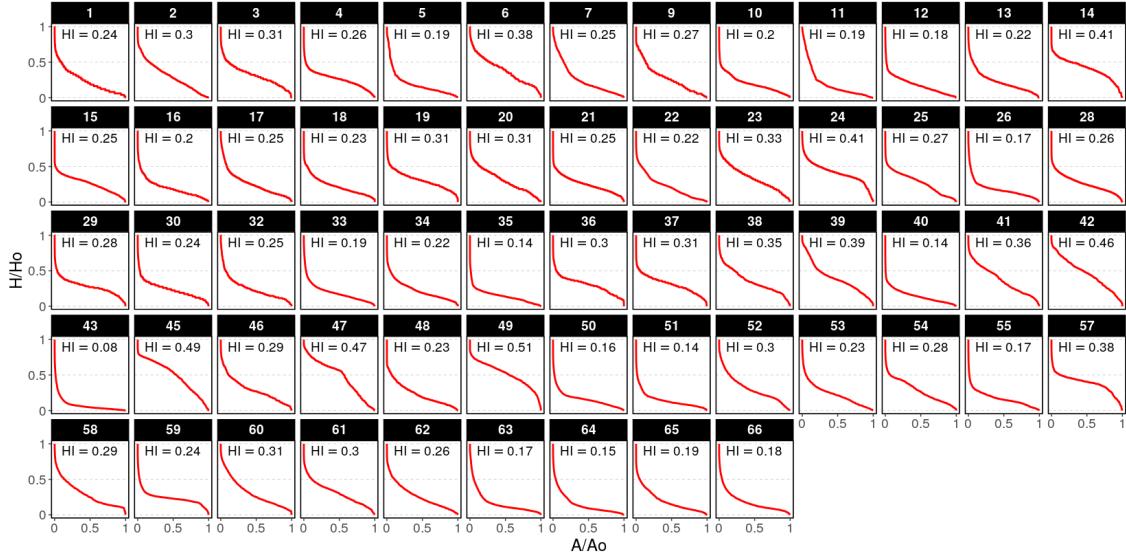


Figure 12: Curva e integral hipsométrica para las cuencas de orden 2

5 Discusión

Con los hallazgos producidos sobre la cuenca del río Guayubin, es posible responder a las preguntas planteadas al inicio sobre la forma de la cuenca y de su red de drenaje, a que se deben sus patrones, la organización de la red de drenaje, la presencia de el fenómeno de constancia, la relación de los perfiles longitudinales y su índice de concavidad con la litología en la cuenca, la relación de los parámetros de cuenca con la litología, al igual que la relación de la curva hipsométrica y la integral con la litología. Ademas es posible hacer comparaciones de eficacia del método empleado para extraer las redes de drenaje.

En los parámetros de cuenca y las estadísticas de ordenes de, el área mostró mantener la

6 Agradecimientos

A Dios por la fuerza y la salud que me ha dado durante todo este tiempo, sin dejarme caer.

A mi maestro José Martínez Battle por el apoyo incondicional, tanto emocional como técnico, por ser guía durante todo el trayecto, por ser paciente, y sobre todo por su disponibilidad para colaborar.

A mi compañero de carrera y amigo Welifer Lebron por su asesoramiento.

A mis compañeros Saderis Carmona, Franklin Gomez, Randy Mueses, Frank de la Cruz y Cinthia Vanderpool quienes estuvieron presente en este nuevo reto en el que nos embarcamos

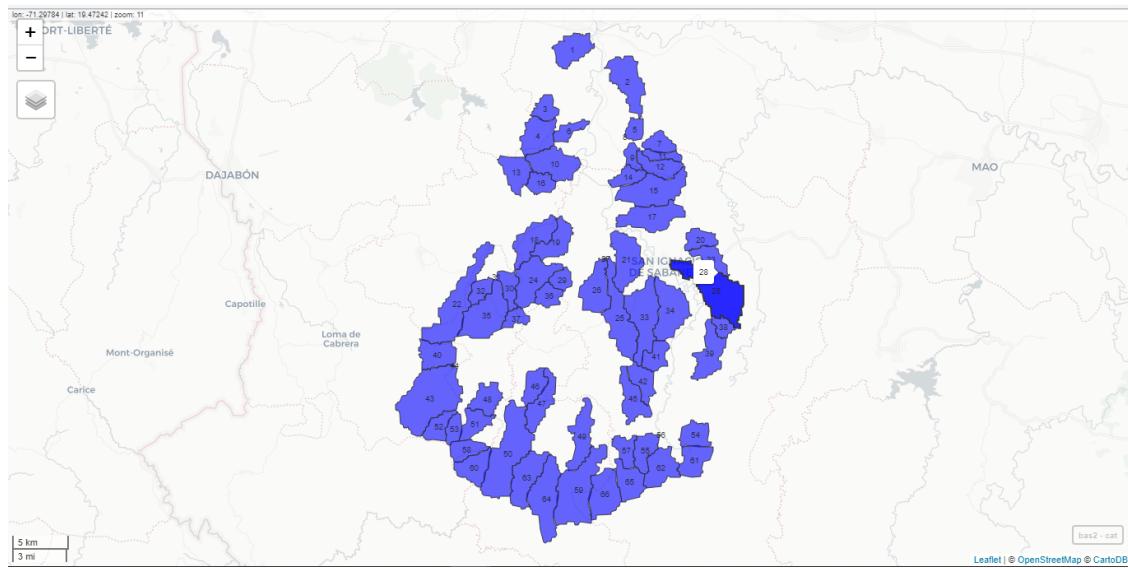


Figure 13: Cuencas de red de drenaje orden 2

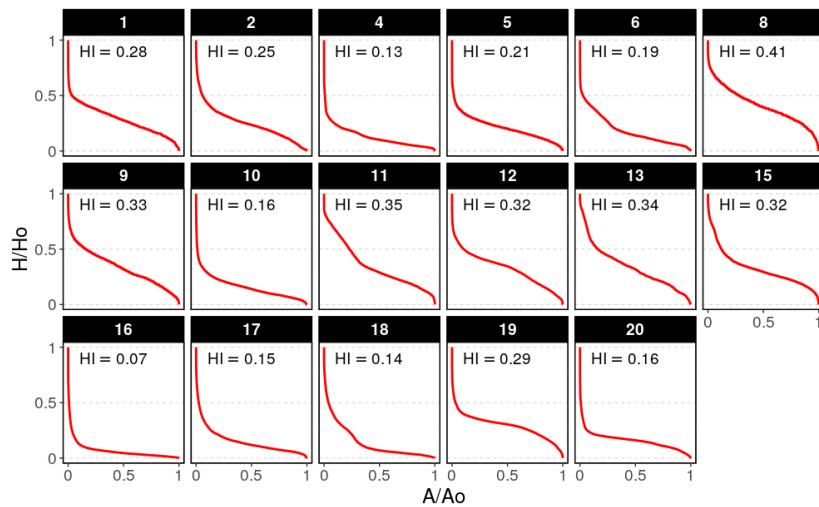


Figure 14: Curva e integral hipsométrica para las cuencas de orden 3

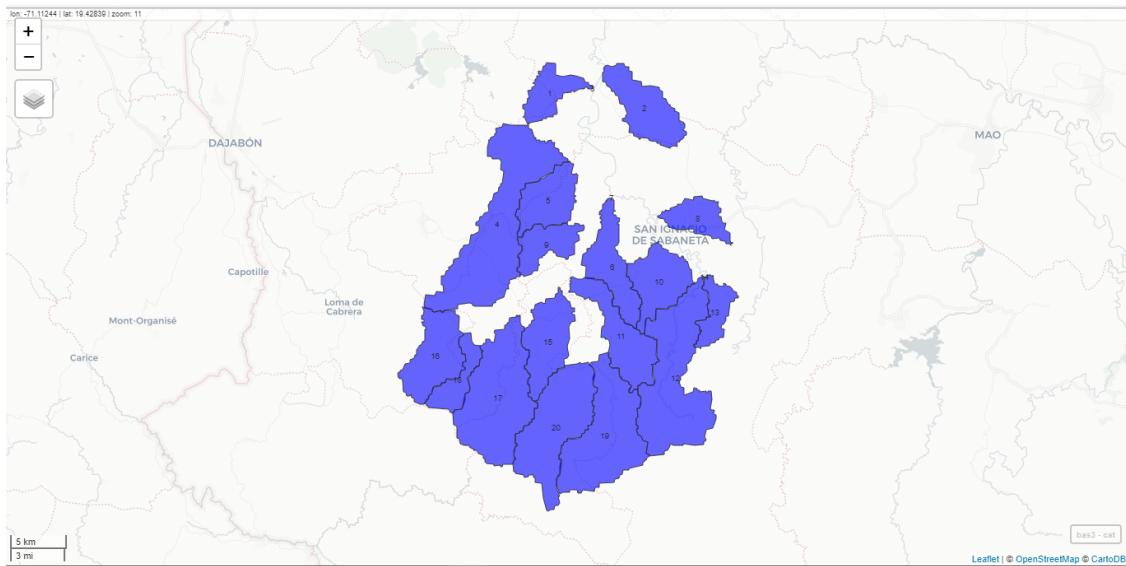


Figure 15: Cuencas de red de drenaje orden 3

tres meses atras, y de los cuales he recibido apoyo emocional y tecnico, tambien por sus maneras de ayudarnos entre si a liberar estres.

A mi madre Denny Laureano, mis hermanos Darleny Linares, Dihana Carolina Linares y Jose Daniel Linares por la comprension y el apoyo tanto moral como emocional durante este tiempo.

A mis amistades por el apoyo, comprension y motivacion para que continue mis proyectos.

7 Información de soporte

8 Script reproducible

Referencia

- Batlle, J. R. M. (2018a). *Función hypointcurve*. Retrieved from https://github.com/geofis/rgrass/blob/master/integral_hypsometric_curve.R
- Batlle, J. R. M. (2018b). *Función lfpnetwork*. Retrieved from https://github.com/geofis/rgrass/blob/master/lfp_network.R
- Batlle, J. R. M. (2018c). *Función lfpprofilesconcavity*. Retrieved from https://github.com/geofis/rgrass/blob/master/lfp_profiles_concavity.R
- Batlle, J. R. M. (2018d). *Función xyvector*. Retrieved from <https://raw.githubusercontent.com/geofis/rgrass/master/xyvector.R>
- Batlle, J. R. M. (2019). *Drainage rearrangement as a driver of geomorphological evolution during the upper pleistocene in a small tropical basin*.
- Batlle, J. R. M. (2020a). *Función integerextent*. Retrieved from <https://raw.githubusercontent.com/geofis/rgrass/master/integerextent.R>
- Batlle, J. R. M. (2020b). *Función my-trans*. Retrieved from <https://github.com/geomorfologia-master/unidad-4-asignacion-1-procesos-fluviales/blob/master/my-trans.R>
- Bowden, K. L., & Wallis, J. R. (1964). Effect of stream-ordering technique on horton's laws of drainage composition. *Geological Society of America Bulletin*, 75(8), 767–774.
- Castillo, F. A. J. (2015). Delimitación automática de microcuencas utilizando datos srtm de la

- nasa. *Enfoque UTE*, 6(4), 81–97.
- Charles Ehlschlaeger, U. A. C. E. R. L. (2003–2021a). *Addon r.water.outlet*. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/r.water.outlet.html>
- Charles Ehlschlaeger, U. A. C. E. R. L. (2003–2021b). *Addon r.watershed*. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/grass79/manuals/r.watershed.html>
- Christofoletti, A. (1988). *Geomorfología*. Editora Blucher.
- Córdova, M. (2016). *Parámetros geomorfológicos de cuencas hidrográficas*. Obtenido de Pron-tubeam: <http://www.prontubeam.com/articulos/articulos.php>.
- ESRI, E. S. R. I. (2012). ArcGIS resources: Definir cuencas hidrográficas. Retrieved from <https://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/009z0000006800000>
- Fernandez, O. V. Q., & Rocha, A. S. da. (2016). Análise preliminar da aplicação da integral hipsométrica à caracterização das unidades de paisagem na bacia do paraná iii, oeste do paraná. *Anais VIII SIMPGEO-as Fronteiras Da Ciência Geográfica: Avanços E Possibilidades*. Marechal Cândido Rondon, N. November, 497–506.
- Frank Warmerdam, Even Rouault, & others. (1998–2021). *Utility gdalwarp*. Retrieved from <https://gdal.org/programs/gdalwarp.html>
- Garzón Heydt, G., Ortega, J., Garrote, J., & others. (n.d.). *Morfología de perfiles de ríos en roca. control tectónico y significado evolutivo en el bajo guadiana*.
- Goldrick, G., & Bishop, P. (2007). Regional analysis of bedrock stream long profiles: Evaluation of hack's sl form, and formulation and assessment of an alternative (the ds form). *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(5), 649–671.
- Gregory, K. J., & Walling, D. E. (1973). *Drainage basin form and process*.
- Gutiérrez Elorza, M. (2008). *Geomorfología*.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275–370.
- Howard, A. D. (1967). Drainage analysis in geologic interpretation: A summation. *AAPG Bulletin*, 51(11), 2246–2259.
- Jarek Jasiewicz, G., Adam Mickiewicz University, & Institute, G. (2003–2021a). *Addon r.stream.basins*. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/addons/r.stream.basins.html>
- Jarek Jasiewicz, G., Adam Mickiewicz University, & Institute, G. (2003–2021b). *Addon r.stream.stats*. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/addons/r.stream.stats.html>
- Jasiewicz, J. (2003–2021). *Addon r.stream.order*. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/addons/r.stream.order.html>
- Kelly, P. (2003–2021). *Addon g.proj*. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/grass79/manuals/g.proj.html>
- López Cadenas de Llano, F., & Mintegui Aguirre, J. (1986). *Hidrología de la superficie-ti*.
- MappingGis, D. A. (2016). Qué son los códigos epsg / srid y su vinculación con postgis. Retrieved from <https://mappinggis.com/2016/04/los-codigos-epsg-srid-vinculacion-postgis/>
- Margherita Di Leo, M. D. S. (2003–2021). *Addon r.basin*. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/addons/r.basin.html#morphometric-parameters-of-basin>
- Medio Ambiente y Recurso Naturales, M. de. (2015). *Cuenca río yaque del norte y su zona costera*. url.
- Metz, M. (2003–2021). *Addon r.stream.extract*. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/r.stream.extract.html>
- Michael O'Shea, U. A. C. E. R. L. (2003–2021). *Addon r.info*. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/r.info.html>
- Mollat, W., H. (2004). *Mapa geológico nacional de la república dpminiciana: Escala 1:250,000*. url-

- https://geofis.xyz/lm/index.php/view/map/?repository=geo250krd&project=geologico_gpkg.
- Morais, F., & Almeida, L. M. (2010). Geomorfologia fluvial da bacia hidrográfica do ribeirão jaú-palmelas-to. *Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities Research Medium*, 1(2).
- Pastor, A. (2013). Las capturas fluviales: Contextos, causas y consecuencias. una explicación de los procesos de captura fluvial en distintos contextos geológicos. *Revista de Geografía Espacios*, 3(5), 27–41.
- Pedraza Gilsanz, J. de. (1996). *Geomorfología: Principios, métodos y aplicaciones*.
- Pérez, J. (1979). Fundamentos del ciclo hidrológico. *Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Departamento de Meteorología E Hidrología*. Caracas. Venezuela, 01–38.
- Pinilla, A. (1993). *Symposium sobre la raña en españa y portugal* (Vol. 2). Editorial CSIC-CSIC Press.
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117–1142.
- Team, G. D. (2003–2021). *Addon r.to.vect*. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/grass76/manuals/r.to.vect.html>
- Terrain Works, T. (2014). Tributary confluence effects. Retrieved from http://www.netmaptools.org/Pages/NetMapHelp/tributary_confluence_effects.htm
- Venkatachalam, P., Mohan, B., Kotwal, A., Mishra, V., Muthuramakrishnan, V., & Pandya, M. (2001). Automatic delineation of watersheds for hydrological applications proc. ACRS 2001-22nd asian conference on remote sensing, 5-9 november 2001, singapore. vol, 2, 1096–1101.
- Warmerdam, F. (2003–2021). *Addon r.in.gdal*. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/grass79/manuals/r.in.gdal.html>
- Wikipedia, C. (2020). Stream order. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Stream_order