

Estudio morfométrico fluvial de la cuenca Guayubín, República Dominicana, en base a un modelo digital de elevación y algoritmos.

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

El estudio morfométrico de cuencas fluviales son sumamente importantes para comprender la configuración de la misma. A pesar de esto los estudios de esta categoría realizados en el país son muy escasos, aun teniendo una hidrografía rica, esperando a ser explorada y analizada. El estudio morfométrico de la cuenca Guayubín (773.56 km^2), señala la existencia de una relación entre la red de drenaje con la litología del área de cuenca, que explica la forma peculiar de la primera. De la misma manera como a través de índices es posible explicar los fenómenos descubiertos que se producen en la cuenca, en el caso de captura fluvial. Esta investigación evidencia la eficacia de la tecnología geoespacial para el estudio cuantitativo de una cuenca hidrográfica, independientemente del tamaño de la misma, así como, que esta técnica es posible aplicarla en el país a bajo costo y produciendo información de alta calidad.

Keywords: Geomorfología fluvial, Morfometría de cuencas, Análisis hortoniano, Índice de concavidad, Perfil longitudinal, Patrones de drenaje

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 geomorfología.

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 señala 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 (cónvavo, 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 cónvavo, 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 estas 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 la 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.

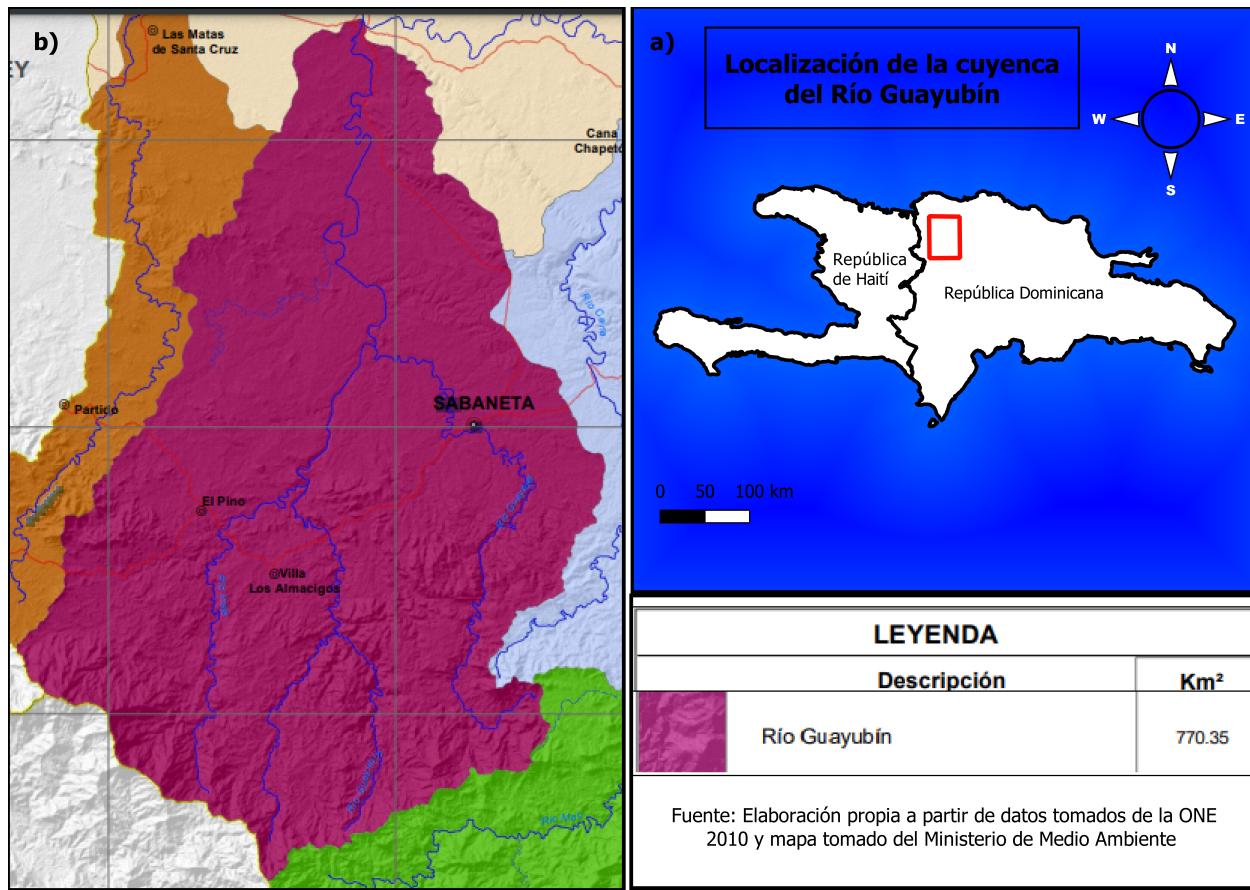


Figure 1: Cuenca del río Guayubín

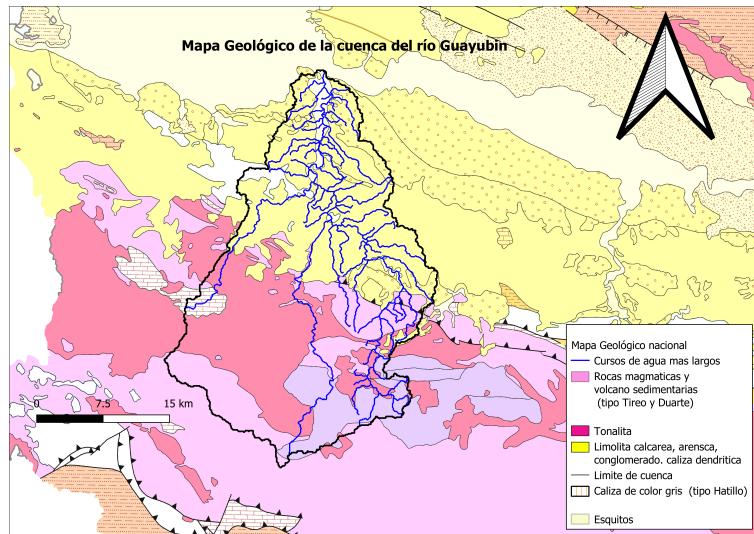


Figure 2: Mapa Geológico de la cuenca

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. Ver materiales en tabla1.

Table 1: Materiales utilizados en la investigacion.

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.
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 pata 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 (ver figura2).

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

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 addon `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 (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 órdenes 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 órdenes de red, mapa de flujo de dirección y un sufijo de salida para los re-

sultados 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 importar 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 (Ver tablas 2 y 9). La cuenca tiene forma de pera y su red drenaje presenta patrones dendíticos (ver figura3 y figura4).

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 figura5, y figura7). Las estadísticas por orden de red según la clasificación de Strahler, obtenidas con `r.stream.stats` 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

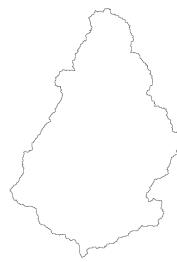


Figure 3: Cuenca del río Guayubín

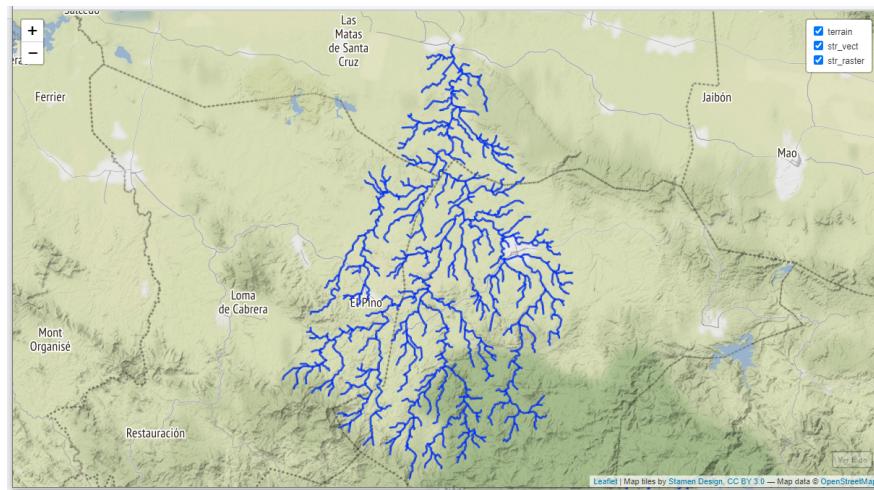


Figure 4: Red de drenaje del río Guayubín

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 el redes de orden 1 (4.7), de orden 2 (3.6), orden 3 (4.3), 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 8). Como se observa en las tablas 3 y ref{tab:estandard}, las razones de bifurcacion se obtuvieron razones de bifurcacion con criterios distintos. Otras estadisticas como la longitud promedio y area promedio para cada orden de red estas detalladas en la tabla 5. Tambien, se obtuvieron las estadisticas de la desviacion estandar de areas y longitudes por orden de red, ver tabla 6. De igual manera se generaron las estadisticas de los parametros hidrgograficos (numero de orden, longitud y areas), segun el orden de red (ver tabla 7). En tabla 8, se presentan los valores resultantes para la razon de bifurcacion.

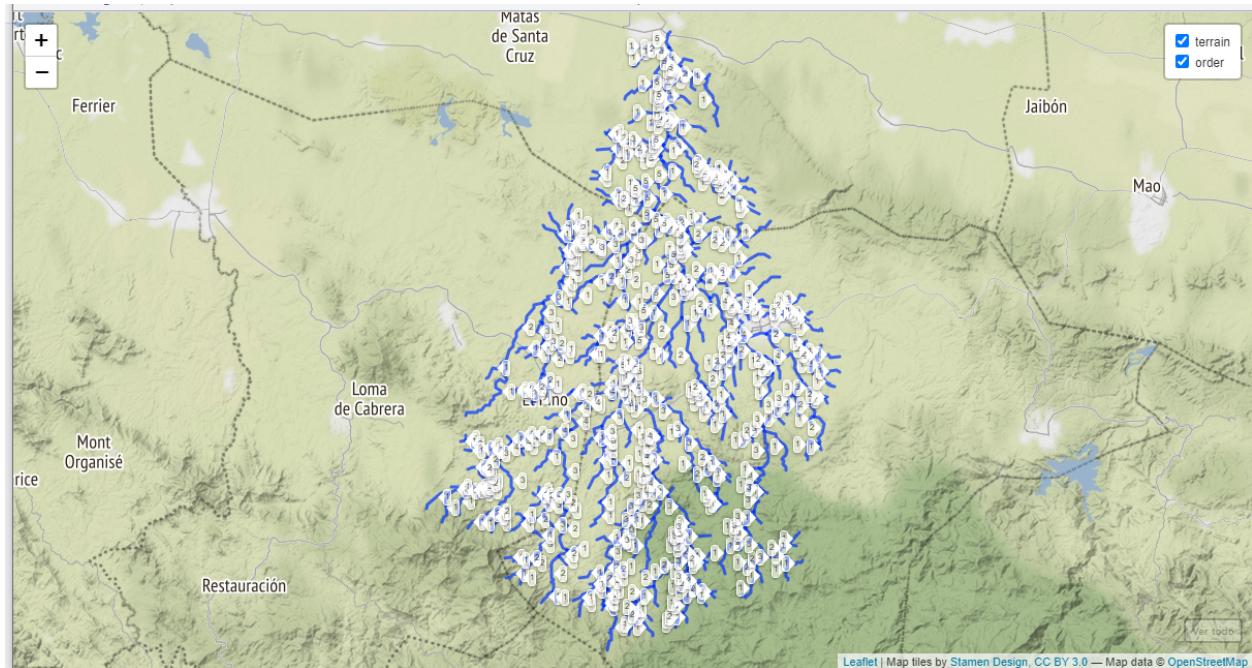


Figure 5: Ordenes de red del río Guayubín con simbología única

Table 2: Estadisticas de los ordenes de red del rio Guayubin

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

Table 3: Razones de cursos basados en el coeficiente de regresion

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

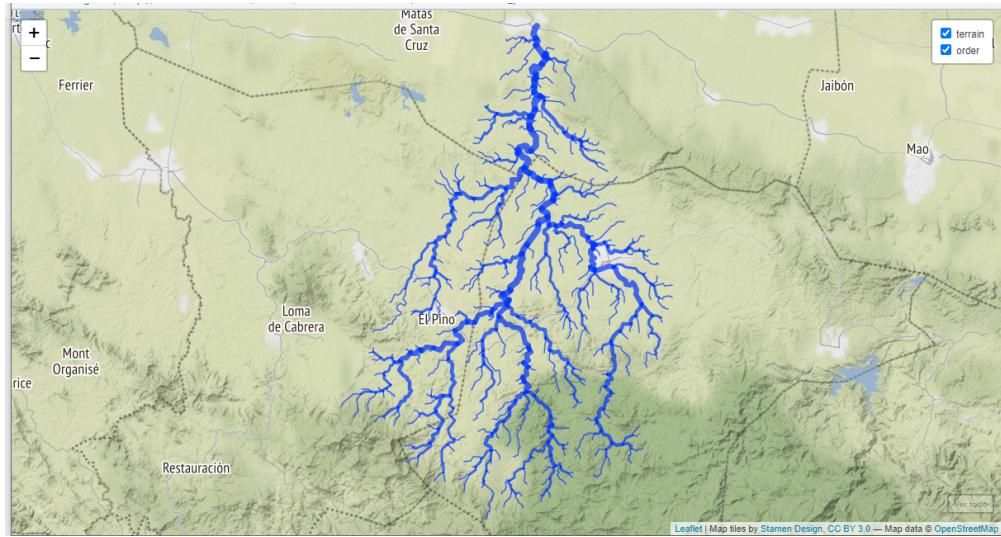


Figure 6: Ordenes de red del río Guayubín con simbología aplicando grosor según su orden

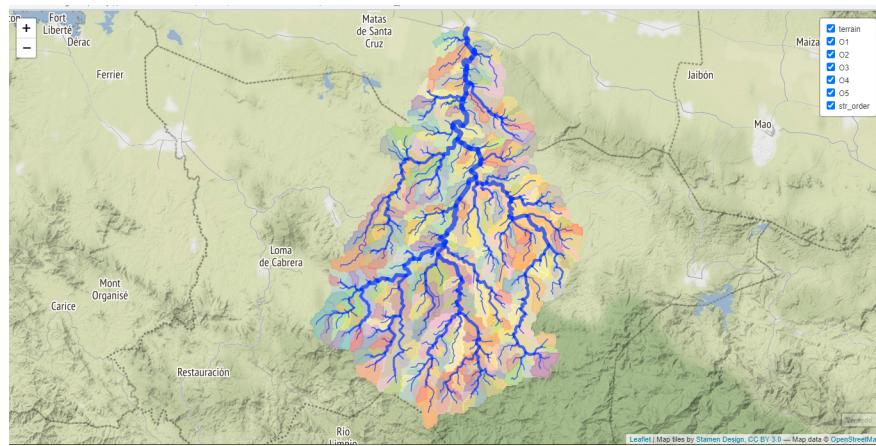


Figure 7: Subcuencas y ordenes de red del río Guayubín

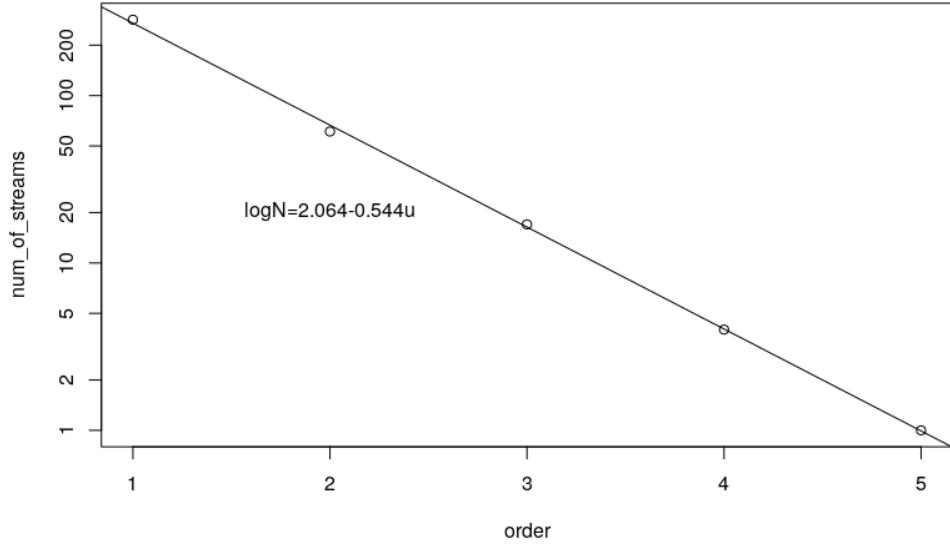


Figure 8: Número de redes según su orden y Razón de bifurcación

Table 4: Relaciones de flujo promediadas con desviaciones estándar

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

Table 5: Variables promediadas para cada orden de red

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

Table 6: Desviacion estandar para las estadisticas segun orden de red

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

Table 8: Razones de los parametros hidrograficos segun su orden de red

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

4.3 Índices de concavidad y perfiles longitudinales

Con la función LfpNetwork se obtuvieron los cursos más largos de la red de drenaje, siendo un total de 60 cursos. De los cuales los cursos 30, 48, 52, 55 y 56 (0.59; 0.51; 0.51; 0.54; y 0.47, respectivamente), presentaron los mas altos indices de concavidad; siendo el curso 30 el poseedor del indice de concavidad mas alto de todos los cursos. Mientras que los cursos de agua 15, 16, 23 y 38 presentaron valores menores a 0.03, poseyendo los valores as bajos de todos los cursos (ver figura 9, 10 y 11).

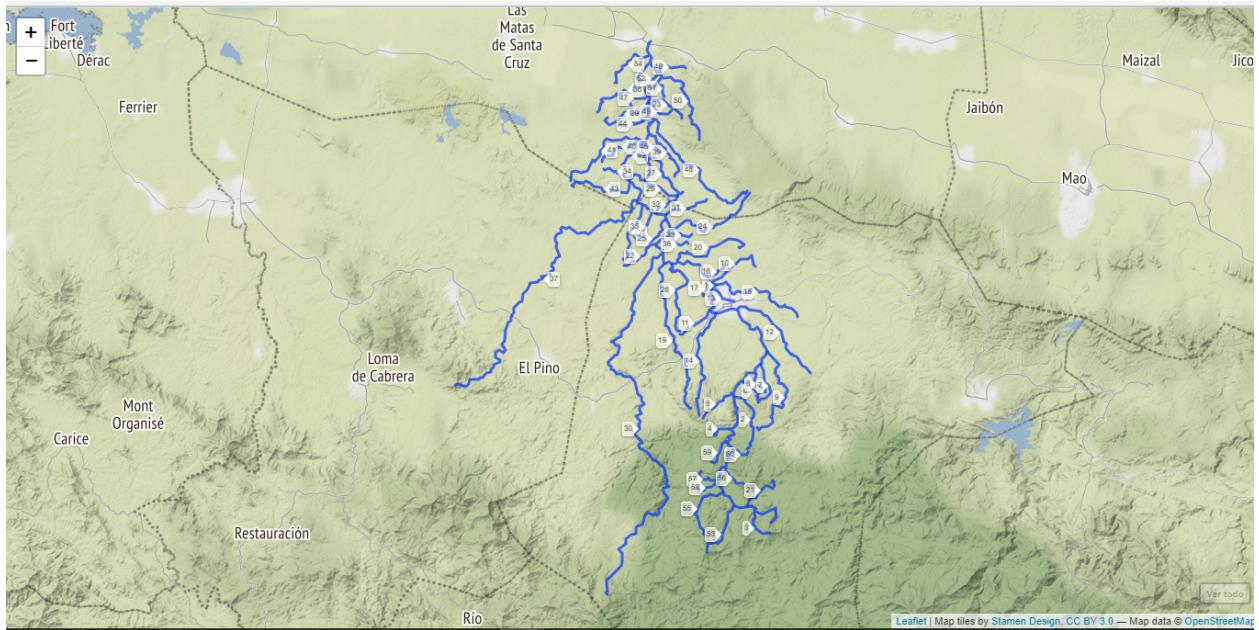


Figure 9: Cursos fluviales mas largos de la cuenca del río Guayubín

4.4 Morfometría de cuenca

Los parametros morfometricos obtenidos con r.basin, indicaron que la elevacion minima en la cuenca del rio Guayubin fue 30.97 mslm y la maxima fue 1396.73 mslm, mientras la diferencia de elevacion obtenida de los claculos fue de 1365.76 m. Asi mismo, se produjo el parametro de elevacion media (276.70). El parametro de coeficiente de compacidad obtenido fue de 4.9. El curso

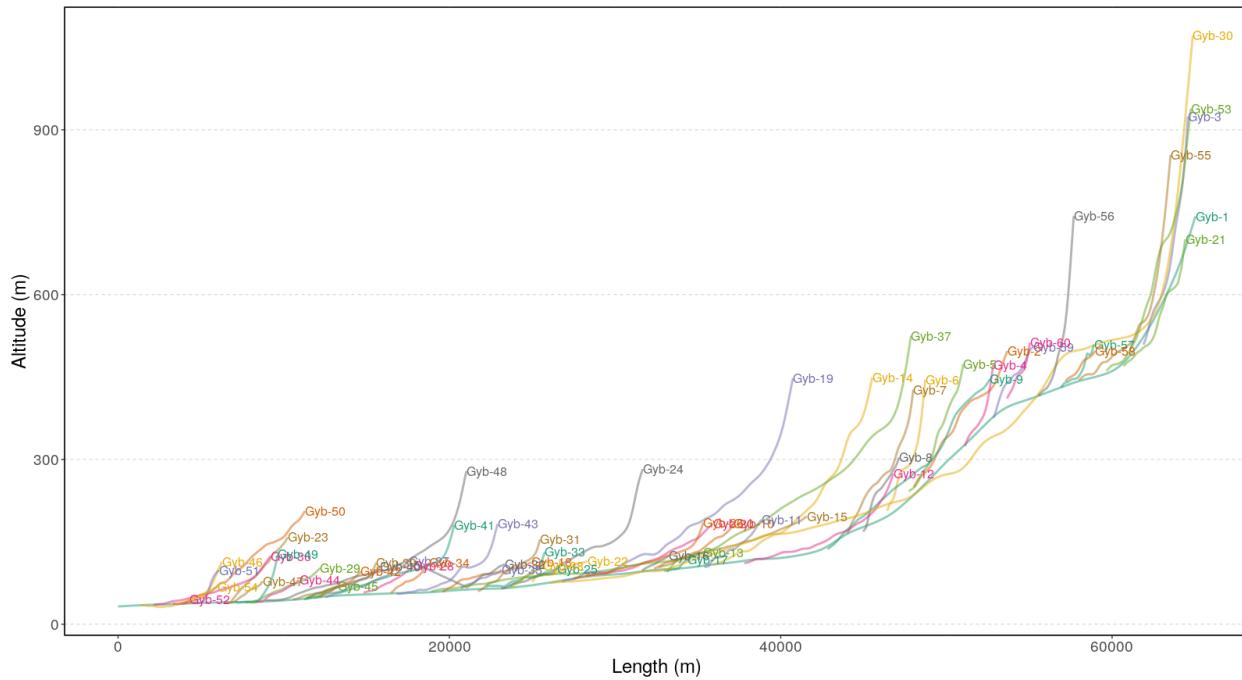


Figure 10: Perfiles longitudinales de los cursos más largos en la cuenca del río Guayubín

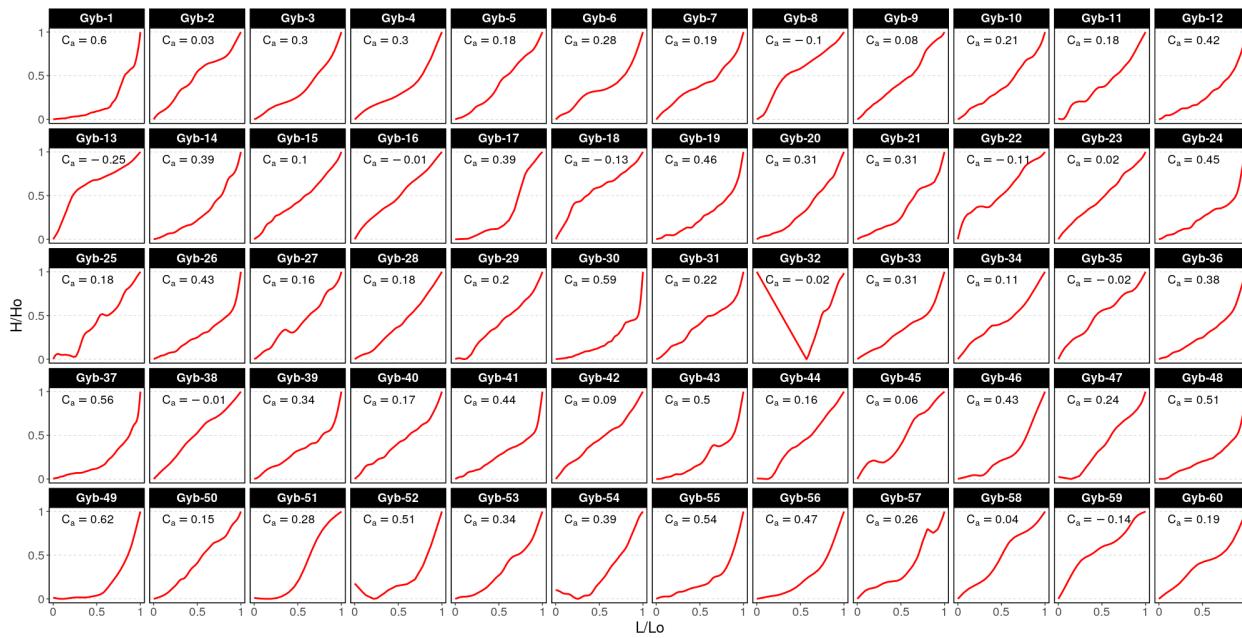


Figura 11: Perfiles longitudinales e índices de concavidad de los cursos más largos en la cuenca del río Guayubín

mas largo de la red de drenaje o curso principal en la cuenca producido por `r.basin` presento una longitud de 61.96 km. El resto de los parametros obtenidos estan resumidos en la tabla 9.

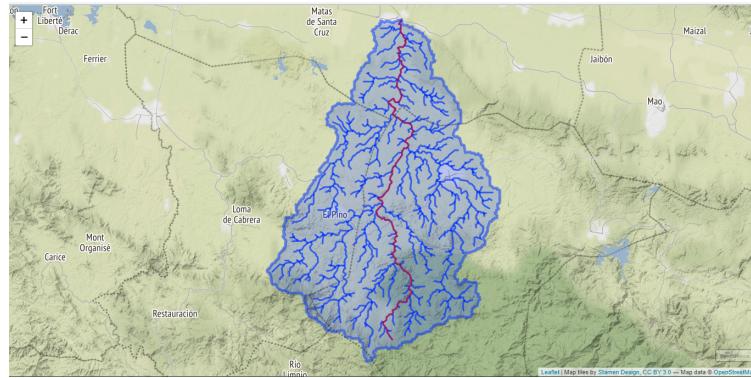


Figure 12: Cuenca del río Guayubín con su red de drenaje y su curso más largo

Table 9: 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

Parámetros	Valores
Drainage Density [km/km ²]	0.8560626101427108
Bifurcation Ratio (Horton)	3.8876
Length Ratio (Horton)	2.2966
Area ratio (Horton)	4.3704
Slope ratio (Horton)	1.4689

Los estadisticas que se generaron sobre la curva y la integral hipsométrica se obtuvieron 60 resultados para los cursos de agua pertenecientes a la cuenca de orden 2. El valor minimo generado para la integral hipsometrica fue 0.08 en el curso 43. En tanto, el valor maximo para la integra fue de 0.48 en el curso 45 (ver tabla 10). los curso mas curvos fueron 37, 18 y 15. Ver figuras 13 y 14.

En cuanto a las cursos de agua de las cuencas de orden 3, se produjeron 17 resultados, donde los cursos 8 (0.40), 11 (0.34), y 13 (0.33), presentaron los valores de integral hipsometrica mas altos. Y los cursos con los valores mas bajos de la integral hipsometrica fueron 4 (0.12), y 16 (0.06). Ver tabla 11. y los cursos mas curvos obtenidos fueron 5, 10, 17, y 18. Ver figuras 15 y 16.

Table 10: Integral hipsométrica en las cuencas de orden 2

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

Categoría	Integral hipsométrica
32	0.24544610
33	0.18990261
34	0.22303577
35	0.14436574
36	0.30229714
37	0.30742281
38	0.34876647
39	0.39371293
40	0.14419677
41	0.36397062
42	0.45795809
43	0.07642614
45	0.48672629
46	0.29182502
47	0.47300056
48	0.22892086
49	0.50910119
50	0.16011357
51	0.14325914
52	0.30243670
53	0.22622911
54	0.27985062
55	0.16980308
57	0.38363564
58	0.29000326
59	0.23691203
60	0.30564446
61	0.30401039
62	0.25939942
63	0.16711030
64	0.14693431
65	0.19359746
66	0.17854689

Table 11: 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

Categoría	Integral hipsométrica
9	11 0.34507681
10	12 0.32371339
11	13 0.33707592
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

Categoría	Integral hipsométrica
56	61 0.30401039
57	62 0.25939942
58	63 0.16711030
59	64 0.14693431
60	65 0.19359746
61	66 0.17854689

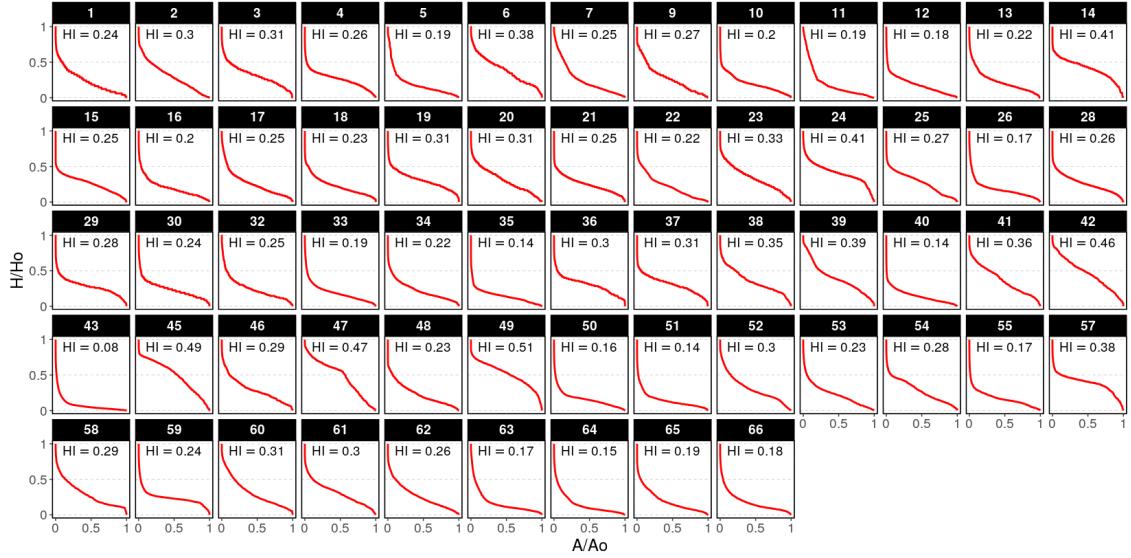


Figure 13: Curva e integral hipsométrica para las cuencas de orden 2

5 Discusión

Con los hallazgos producidos sobre la cuenca del río Guayubín, es posible responder a las preguntas planteadas sobre la forma de la cuenca y su red de drenaje, los patrones en la red de drenaje, la organización de la red de drenaje, 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. Además, es posible hacer comparaciones de eficacia del método empleado para extraer las redes de drenaje con el mapa topográfico de República Dominicana (s.a. (s.f.)).

En los parámetros de cuenca y en las estadísticas de órdenes de red, el valor de área de cuenca se mantuvo sin cambios; pero comparándolos con las informaciones extraídas de Medio Ambiente y Recurso Naturales (2015) los valores que se obtuvieron no concuerdan, puesto que, la cuenca presentada por Medio Ambiente y Recurso Naturales (2015) es más pequeña que la producida por los algoritmos en R (ver tablas 9 y 2).

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 se produce en zonas de relieve heterogéneo como se presenta la parte de cuenca alta; los cursos de agua se desarrollan libremente y no depende de un control estructural (Ingeniero Civil (2018)); la cuenca está asentada

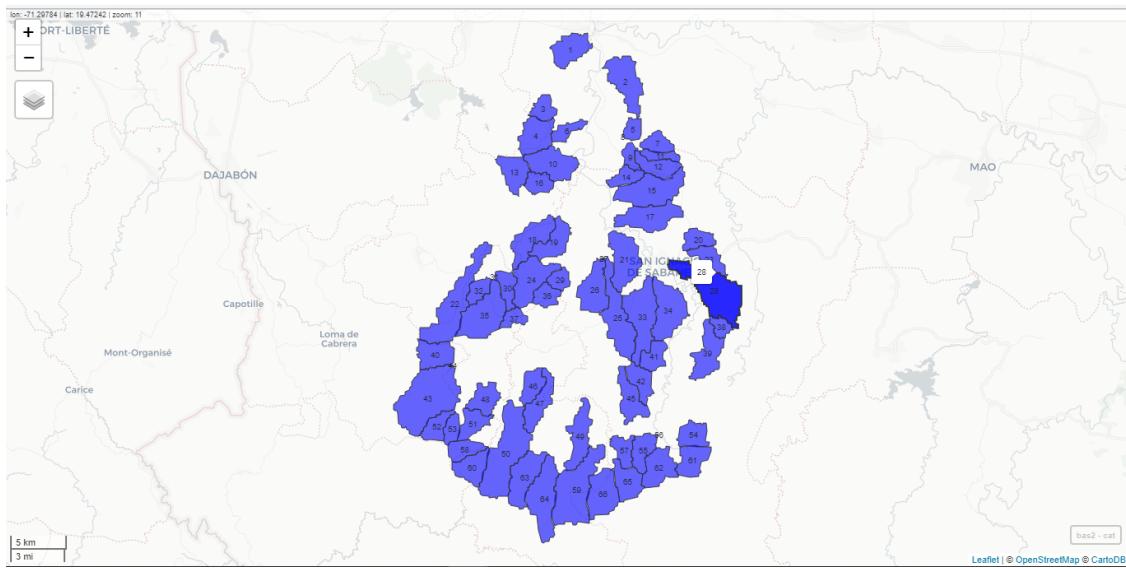


Figure 14: Cuencas de red de drenaje orden 2

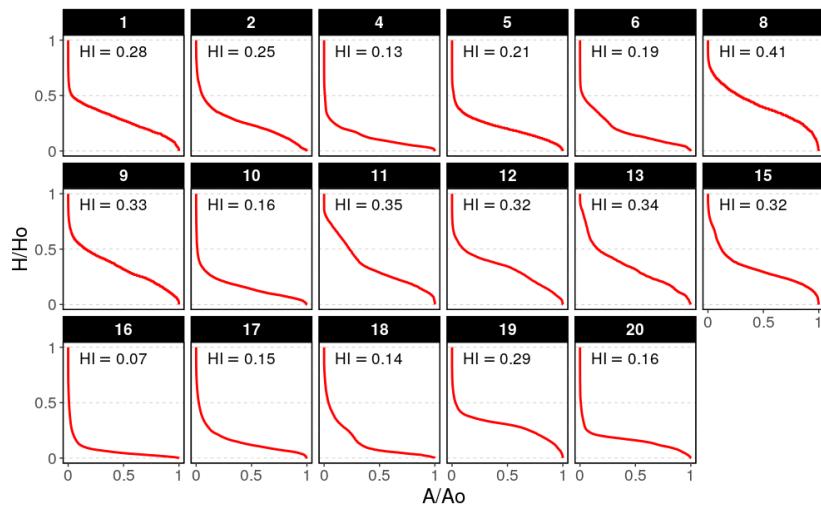


Figure 15: Curva e integral hipsométrica para las cuencas de orden 3

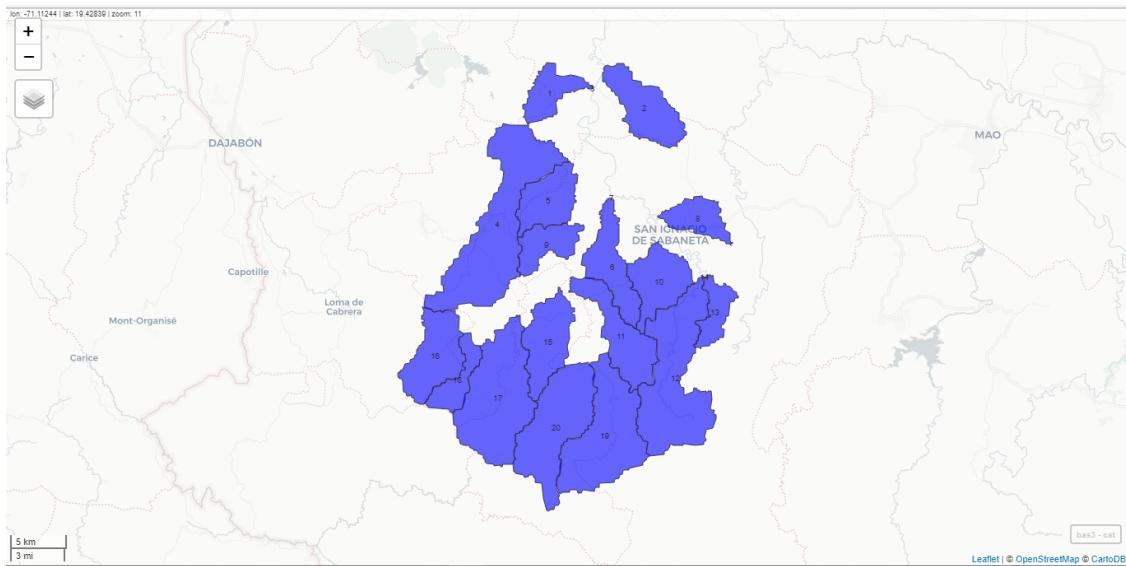


Figure 16: Cuencas de red de drenaje orden 3

en rocas de tipo igneas o magmáticas y sedimentarias (Mollat (2004)). Howard (1967) asegura que los patrones dendíticos los sedimentos tienen una resistencia uniforme.

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 capturado. Se ha observado que este fenómeno se produce en todas las redes desde orden 1 a orden 5, en especial en las redes de orden más bajo, pero puede verse muy marcado en la red de orden cinco, donde se produce cambios del tipo de roca y relieve es más heterogéneo (ver figura 6 y 2).

Según Summerfield (1991), la razón de bifurcación que está entre 3 y 5, indica que la litología del lugar es homogénea. En tabla 8, es visible como los valores para la razón de bifurcación en los ordenes de red difieren el uno del otro, los ordenes 1, 2, 3 y 4 mantienen una homogeneidad en su litología. Como se observa en las tablas 3 y ref{tab:estandard}, las razones de bifurcación obtenidas se corresponden. Ambos valores coinciden con la razón de bifurcación calculada con código en R (4.064346), podemos concluir que mantienen una constancia en el tipo de roca presente.

Los cursos más largos de la red de drenaje que tienen los más altos índices 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 estuvo relacionado a la aparición de una roca dura, tras haber comparado los resultados de los cursos más largo en el mapa geológico nacional (Mollat (2004)), se comprueba que existe un cambio en la litología presente en los cursos de agua, en el caso del curso 30 con un índice de 0.59 de concavidad, al pasar de estar sobre rocas tonalitas a estar sobre rocas sedimentarias y de originadas en arcos de islas se produce un cambio en su trayectoria. También se vio afectado el curso de agua 19, quien presenta un índice concavidad de 0.46 producto de que este flujo en su trayecto se encuentra con una falla tectónica, provocando el cambio en su curso. Y los cursos más rectilíneos con los índices de concavidad más bajos son los cursos de agua número 15, 16, 23 y 38, con valores menores a 0.03, estos cursos de agua realizan su recorrido por un mismo tipo de roca por lo que no experimenta cambios bruscos en su curso (ver figura 9, 10 y 11).

Los parámetros morfométricos obtenidos con r.basin (ver tabla ??), indican que la elevación mínima en la cuenca del río Guayubín es 30.97 msnm y la máxima es 1396.73 msnm, 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 el predominio en su escorrentia, es muy alargada (López Cadenas de Llano & Mintegui Aguirre (1986)); pero, el parametro forma de la cuenca genera 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)). Segun los resultados de la razon de elongacion (0.50), se confirma que la cuenca es alargada (De Matauco (2004)). 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 figura9), y el curso que se obtuvo con $r.basin$ (ver figura12), es el curso numero 30 obtenido con la funcion LfpNetwork. Por lo que la cabecera del rio Guayubin se localiza al sureste de la indicada por Medio Ambiente y Recurso Naturales (2015), bajo el nombre de Dajao.

La curva y la integral hipsométrica muestran la reparticion de elevaciones en la cuenca (Jose Ramon Martinez Battle (2019)). El valor minimo generado para la integral hipsometrica fue 0.08 en el curso 43. En tanto, el valor maximo para la integra fue de 0.48 en el curso 45 (ver tabla 10). Y los curso mas curvos fueron 37 y 18. El primero presenta signos de una evolucion lenta en su elevacion; y el segundo, presenta una evolucion media en su elevacion. Ver figuras13 y 14. Los cursos 41 y 42 son los mas rectilineo y su integral hipsometrica es moderada por lo que estos cursos han experimentado poca evolucion rapida en su elevacion.

Los cursos de agua pertenecientes a la cuencas de orden 3, los valores maximos presentes (8 y 13), tuvieron una evolucion media en la elevacion. Y los cursos 4 y 16, demuestran una lenta y estable evolucion en la elevacion (ver tabla 11). Ver figuras 15 y 16.

Toda la informacion generada sobre la cuenca sirve como perdaño a futuras investigaciones sobre la misma u otras cuencas fluviales en el pais.

El estudio esta limitado a los analisis cuantitativos, puesto que carece de la toma de muestras en campo para una mas precisa comprension de la cuenca.

6 Agradecimientos

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

A mi maestro Jose Martinez Battle por el apoyo incondicional, tanto emocional como tecnico, por ser guia durante todo el trayecto, por ser paciente, y sobre todo por su disponibilidad para colaborar.

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

A mis companeros Saderis Carmona, Franklin Gomez, Randy Muses, Frank de la Cruz y Cinthia Vanderpool quienes estuvieron presente en este nuevo reto en el que nos embarcamos 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 Prontubeam: <http://www.prontubeam.com/articulos/articulos.php>.
- De Matauco, A. I. G. (2004). Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, (38), 311–330.
- 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; hydrophys-

- ical 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.
- Ingeniero Civil, team. (2018). Patrones de drenaje y su significado. Retrieved from <https://www.cuevadelcivil.com/2011/06/diseno-de-drenaje-y-su-significacion.html>
- 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<http://ambiente.gob.do/wp-content/uploads/2016/11/Yaque-del-Norte-Subcuenca-Hidrograficas-1.pdf>.
- 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 dpmínicana: Escala 1:250,000*. urlhttps://geofis.xyz/lm/index.php/view/map/?repository=geo250krd&project=geologico_gpkg.
- Morais, F., & Almeida, L. M. (2010). Geomorfología fluvial da bacia hidrográfica do ribeirão jaú-palmas-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.
- s.a. (s.f.). *Topo map of the dominican republic 1:50k*. url<https://geofis.xyz/lm/index.php/view/map/?repository>
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117–1142.
- Summerfield, M. (1991). Sub-aerial denudation of passive margins: Regional elevation versus local relief models. *Earth and Planetary Science Letters*, 102(3-4), 460–469.
- 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