

Estudio morfométrico fluvial de la cuenca Guayubín, República Dominicana usando MDE de resolución y software de código abierto.

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

La geomorfología ha sido trascendental al momento de entender el comportamiento, origen de los procesos que dan lugar a la forma del relieve, e incluso describirlos. Mientras, la geomorfología fluvial como parte de la geomorfología, provee las bases para entender como las redes hidrográficas forman parte de estos procesos de modelado. Por lo tanto, el estudio morfométrico de cuencas fluviales es importantes para comprender la configuración de la misma, y, como esta aporta al moldeado de la forma que posee la superficie. Sin embargo, la morfometría fluvial está escasamente estudiada en el país. El análisis morfométrico de la cuenca seleccionada, se enfoca en conocer la forma de la cuenca y de su red de drenaje, así como los patrones que describe la última. Del mismo modo, saber la forma en que se organiza la red y si se produce algún fenómeno de reorganización. Además, se indaga sobre la existencia de una relación entre perfiles longitudinales e índice de concavidad con la litología; si existe relación entre los parámetros morfométricos con la litología, así como, una asociación entre factores y curva e integral hipsométrica. El estudio realizado a la cuenca del río Guayubín (773.56 kilómetros cuadrados), localizada al noroeste de la República Dominicana, denotan que esta tiene una forma alargada y ancha, en forma de pera y que su red de drenaje es muy ramificada por lo que su forma es dendrítica y describe patrones dendríticos. Se comprueba la existencia del fenómeno de captura fluvial, que provoca la reorganización de la red de drenaje, desviando cursos de agua. De la misma manera, se verifica la existencia del efecto que tiene la diversidad de la litología en el trayecto que recorren los cursos de agua e indicando que tan cóncavo, convexo o rectilíneo son los perfiles longitudinales. Así también, se indica que existe una relación entre la densidad de drenaje con el tipo de roca en la cuenca. Finalmente se confirma que la curva e integral hipsométrica esta asociada a factores evolutivos de las elevaciones que posee el relieve. 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, la posibilidad de aplicarla en el país a bajo costo y produciendo información de alta calidad. Fernández (2002), afirma que la geomorfología puede servir para entender y tratar problemas ambientales, generados por el clima u otros. Autores como Ruiz (2001) y Chow *et. al* (1994) consideran que la utilidad de la morfometría de cuencas está en que permite la comparación de sus resultados sin importar la escala.

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, glaciar, estructural, tectónica, kárstica y fluvial; siendo la última de interés para esta investigación), para mayor eficacia en sus estudios (Sala, 1984).

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 este país cuenta con 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.

El aspecto general de la cuenca y de la red se refiere a los parámetros hidrográficos que posee la cuenca y su red. La forma de la cuenca y la forma de su red de drenaje está determinada según la conformación de sus ríos y el material rocoso que la compone (patrones de drenaje), lo que indica que existe una conexión entre la estructura que posee la red de drenaje con el material rocoso (Gregory & Walling, 1973; Gutiérrez Elorza, 2008; Howard, 1967; Pedraza Gilsanz, 1996).

El orden de red hace referencia al orden en el que se clasifican los cursos de agua, todo en base a la magnitud de su ramificación, siendo siempre un número entero positivo; esta clasificación se puede hacer por múltiples normas como la de Strahler (1952), Horton (1945), Shreve (1967), Hack (1957) y otros (Wikipedia Contributors, 2020). 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 red de drenaje está expuesta a fenómenos como la captura fluvial, la cual desorienta los flujos de agua desde un lecho a otro; siendo el curso que se desvíe la red capturada y el curso para el que se desvía el captor (Pastor, 2013).

Así mismo, la razón de bifurcación (división), 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 órdenes de red de una cuenca (Horton, 1945).

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, que tiende a ser cóncavo, pero no para todos los cursos (Gutiérrez Elorza, 2008). 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 (Pedraza Gilsanz, 1996). El índice de concavidad indica el 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). Donde se ordenan los canales fluviales para establecer jerarquías y así facilitar el estudio de la cuenca (Christofolletti, 1988).

La curva hipsométrica de una cuenca para Strahler (1952), es un porcentaje que explica 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, el primero en el campo de morfometría fluvial que se aplica a la cuenca del río Guayubín, proporciona nueva información de la misma sobre su configuración y modelado, y además, puede ser reproducida sin coste alguno. Por medio de parámetros morfométricos se busca identificar qué forma tienen la cuenca y su red de drenaje. De igual manera, se trata de comprender como se organiza la red de drenaje; y, tras el estudio de la cuenca y su red de drenaje, se indaga si se producen fenómenos de reorganización en ellas, como captura fluvial. También, se inquire sobre la existencia de una relación entre: los perfiles longitudinales e índice de concavidad con la litología de la cuenca; la relación entre los parámetros morfométricos con las características litológica; y si hay factores que se asocien con 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 del 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 este estudio se utilizaron operaciones de análisis morfométrico de redes de drenaje y cuenca de los paquetes de software de código abierto Grass Gis (Neteler, Beaudette, Cavallini, Lami, & Cepicky, 2008) por medio de entorno de programación R (Allaire, 2012). Todos los análisis de carácter estadísticos y las figuras de los resultados, fueron realizadas en R usando diversos paquetes (ver tabla 1). Se utilizó un modelo digital de elevaciones (en lo adelante, MDE) de la misión radar del transbordador espacial Shuttle (Farr et al., 2007), a 90 metros de resolución, para extraer los datos a analizar e interpretar.

Los parámetros de la cuenca acumulación de flujo, elevación, drenaje, cuenca y otros más, fueron calculados por medio del addon de GRASS GIS r.watershed (Ehlschlaeger & Laboratory, 2003–2021b), con un umbral de acumulación de 80 celdas, utilizando un MDE. Las capas generadas fueron ingresadas a R con la librería sp y manejadas con la librería raster.

Para extraer la cuenca se usó el addon r.water.outlet (Ehlschlaeger & Laboratory, 2003–2021a), también, se usó el addon r.to.vect (GRASS Development Team, 2003–2021) para convertir el ráster resultante en vectorial, que luego se llevó a R. Así mismo, se aplicó el addon r.stream.extract (Metz, 2003–2021) para poder extraer la red de drenaje, donde se llevaron a

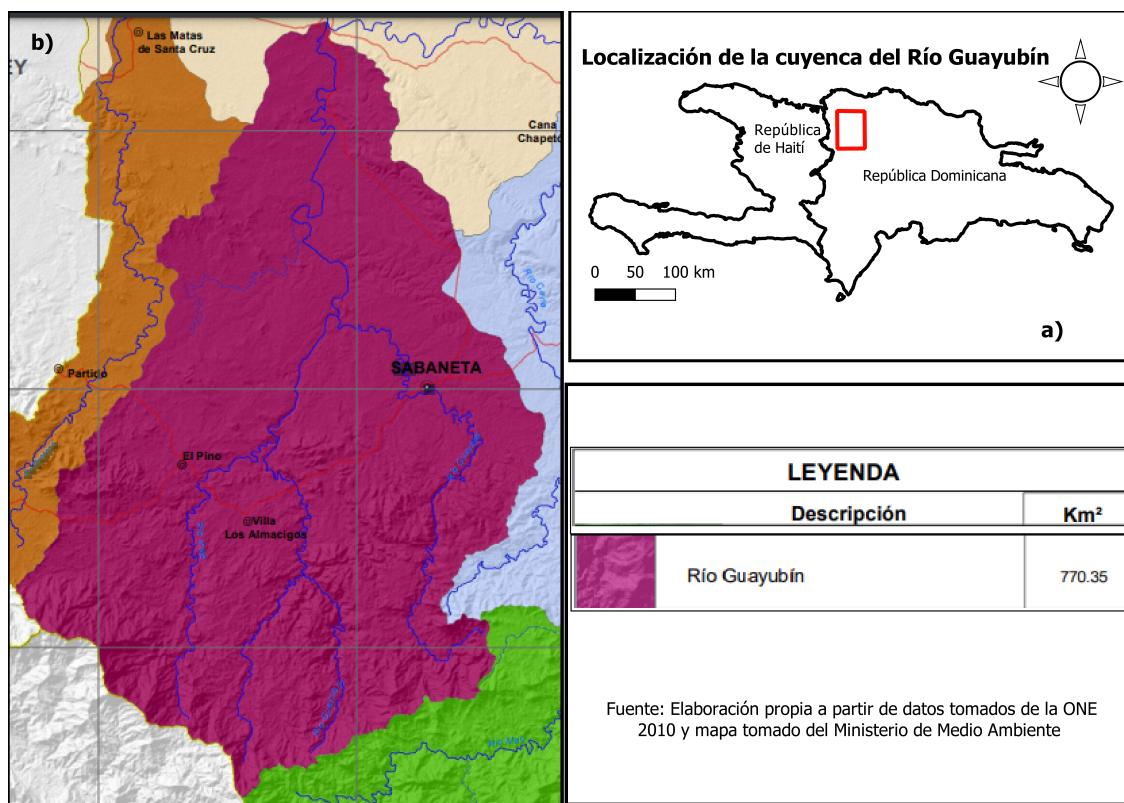


Figure 1: Cuenca del río Guayubín

R los resultados obtenidos.

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. Mientras que, para la creación de mapas de ordenes de red se utilizó el addon `r.stream.order` (J. Jasiewicz, 2003–2021), donde se usó la clasificación de Strahler para analizar el orden de red de la cuenca.

También, se usaron los addons `r.info` (O'Shea & Laboratory, 2003–2021), para obtener los valores mínimos y máximos del orden de red según Strahler a partir de un ráster, y, se delimitó la cuenca a través de la red de drenaje con `r.stream.basins` (J. Jasiewicz, University, Geoecology, & Institute, 2003–2021). 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` (j. Jasiewicz, University, & Geoinformation Institute, 2003–2021) que resume las estadísticas.

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). Y, luego, se empleó la función `LfpProfilesConcavity` (José Ramón Martínez Batlle, 2018c), con la que se obtuvieron los índices de concavidad para los cursos más largos, y, así mismo, sus perfiles longitudinales.

Tras crear una nueva región de GRASS en R, se convirtieron 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` (Warmerdam, Rouault, & 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 que serían transformadas a EPSG: 4326 (Lohmar, 1988), 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` (Di Leo & Di Stefano, 2003–2021). Los vectores obtenidos son transformados a EPGS: 4326 (Lohmar, 1988), y así visualizados con la librería `leaflet`. También, para 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).

4 Resultados

El fruto del estudio realizado a la cuenca del río Guayubín usando el script `reproducible`, produce información que facilita el análisis y comprensión de la cuenca fluvial, tanto de manera agrupada, como de forma desagregada. A continuación, se presentan de manera resumida, las características morfológicas principales de la cuenca y su red de drenaje.

La cuenca del río Guayubín muestra una área de 773.56 km² y un perímetro de 156.12 km, siendo la tercera más grande de la cuenca del Yaque del Norte por su extensión; la misma alcanza una elevación, aproximada, máxima de 1396.73 m, media de 276.70 m y una mínima de 30.97 m, por lo que se puede decir que su relieve es muy heterogéneo (ver tablas 2 y 9).

Al observarse la figura 3 la forma de la cuenca es alargada de sur a norte, además, es ancha, siendo la parte sur más ancha que la norte de la misma, dando lugar a una cuenca en forma de pera. En ese mismo contexto, los parámetros de coeficiente de compacidad, forma de la cuenca y razón de elongación, confirman, de igual manera, que la cuenca es alargada y ancha (ver tabla 9). En cuanto a la red de drenaje de la cuenca, se presentan patrones de drenaje dendríticos, siendo

bastante densa con ramificaciones muy regulares principalmente en la cuenca alta, al sur (ver figura 4); esto se debe a que el relieve es medianamente accidentado, y a que la composición o material rocoso existente como la arenisca, rocas calcáreas, limolita, conglomerado y otros (ver figura 2).

La red de drenaje de la cuenca, según Strahler, presenta un total de 367 redes (ver tabla 2) y se organiza por órdenes de red desde orden uno hasta orden cinco (ver figura 5, y figura 7). Donde las redes de drenaje de orden uno suman un total de 284, siendo los primeros, tributarios de la red y poseen una longitud corta, pues depositan sus aguas y alimentando a otro curso de agua que pasaría a tener una jerarquía mayor (repitiéndose el proceso hasta llegar al curso principal); las redes de orden 2 que se producidas fueron un total de 61, en este clasificación se ve una reducción en el número de redes, presentando un aumento en el orden y un descenso en las redes de drenaje que lo integran; para el orden 3 un total de 17 redes de drenaje; para el orden 4 se produjeron 4 redes; y para el orden 5 se produjo una sola red, siendo este el principal curso de agua de toda la cuenca, que recibe las aguas de las redes de drenaje anteriores (ver figura 8, y tabla 7).

En la red de drenaje se percibe la presencia de un fenómeno de reorganización denominado captura fluvial, presentándose en las redes de orden 1 que drenan en redes de orden 2, 3, 4 e incluso en la de orden 5, esto se produce para cada orden que deposita sus aguas en otro curso (ver figuras 5, 6 y figura 7).

Con la función LfpNetwork se obtuvieron los cursos más largos de la red de drenaje, siendo un total de 60 cursos, de los cuales se generaron los perfiles longitudinales y se obtuvieron los índices de concavidad. Los perfiles de estos cursos mostraron ser positivos para la gran mayoría de estos; otros cursos presentan índices negativos de concavidad (son convexos); y una minoría son rectilíneos (ver figuras 9 y 10).

De los cursos más largos, el que más destaca es el curso número 1 o Gyb-1 (ver figuras 10 y 11), con un índice de concavidad de 0.6, y que también encaja con el curso de nombre río Guayubín en el mapa topográfico de República Dominicana (Lizmap, s.f.), más la cabecera de este curso coincide con el del arroyo La Yaya, que drena sus aguas en el río Yaguajal. El curso tiene una dirección general de sur a norte; presentando dos sobresaliente convexas muy destacadas, la primera se produce donde hay un cambio en su dirección donde entran en contacto el conglomerado: molasa continental con rocas magmáticas y volcano-sedimentarias, normalmente originadas en arcos de islas, tomando dirección suroeste-noreste; y la segunda se genera, donde entran en contacto el conglomerado: molasa continental con limolita calcárea, arenisca, conglomerado y caliza detrítica, produciéndose, nuevamente, un cambio de dirección sudeste-noroeste (Mollat, Wagner, Cepek, & Weiss, 2004). Otro curso de agua que destaca por su alto índice de concavidad (0.56), es el número 37 o Gyb-37 (ver figuras 10 y 11), el cual corresponde al río Aminilla del mapa topográfico de República Dominicana (Lizmap, s.f.). Este curso tiene una dirección suroeste-noreste.

Mientras que los cursos de agua más largos con índices de concavidad negativo, que más destacan son el 18 o Gyb-18, con -0.13, siendo este convexo. Este coincide con el curso Cañada Prieta del mapa topográfico de República Dominicana (Lizmap, s.f.), la cual tiene una dirección sur-norte, presentando pequeños pliegues en su trayecto, no relacionados a la litología, puesto que, corre sobre limolita calcárea, arenisca, conglomerado y caliza detrítica, lo que resulta irregular. Lo mismo ocurre en los cursos 25, 32, que corresponden a Arroyo seco y arroyo El Mamey en el mapa topográfico del país (Lizmap, s.f.), su convexidad no está relacionada con la litología (ver figuras 10, 11 y 2).

A diferencia de los cursos convexos que no se destacan cambios en su litología (18, 25 y 32), el curso de agua 59 o Gyb-59, con un índice de concavidad de -0.14, es un pequeño arroyo o cañada sin nombre que desagua en el río Yaguajal (Lizmap, s.f.). Realiza más de la mitad de su recorrido por tonalita y luego por rocas magmáticas y volcano-sedimentarias; de sus pequeños

pliegues se destaca el que se produce en la zona donde entran en contacto las rocas mencionadas anteriormente, por lo que su convexidad en tal punto puede estar relacionada a la litología (ver figuras 10, 11 y 2).

También, están los cursos que son casi rectilíneos, como el curso 28 o Gyb-28, con un índice de concavidad de 0.18 (bastante bajo), es rectilíneo en un 50%, en su parte central. Este coincide con el arroyo Canario (Lizmap, s.f.), y realiza el 90% de su recorrido por limolita calcárea, arenisca, conglomerado y caliza detrítica, mientras su desembocadura en el río Guayubín asentado sobre rocas metamórficas regionales: facies esquito verde. Aunque su morfología no se debe al cambio en su litología (ver figuras 9, 10 y 11).

Según los parámetros morfométricos de la cuenca el curso más largo de toda la cuenca no coincide con el obtenido con la función LfpNetwork (curso 1), sino, que coincide con el curso 30 obtenido por la función; Este curso coincide con el arroyo Dajao que está en el mapa topográfico del país (Lizmap, s.f.); este posee una longitud de 61.96 km (ver figura 12).

De los parámetros de la cuenca que guardan una relación con la litología, la densidad de drenaje es uno de ellos, el cual para la cuenca fue 0.85 km/km². También, está la de razón de Bifurcación (3.8) para toda la cuenca, considerando que el relieve de la cuenca es accidentado y que gran parte de la misma está en la montaña (ver figura 9). En ese mismo contexto, la razón de bifurcación se mantuvo constante para las redes de drenaje de orden 1, 3 y 4, aunque, la red de orden 2 no difiere por mucho de la razón de bifurcación de la cuenca (ver figura 8).

Las estadísticas 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. Donde los cursos más curvos fueron 37 y 18; el primero presenta signos de una evolución lenta en su elevación; y el segundo, presenta una evolución media en su elevación. Y los cursos 41 y 42 son los más rectilíneos y su integral hipsométrica es moderada por lo que estos cursos han experimentado una evolución lenta en su elevación (ver tabla 10 y figuras 13 y 14).

En cuanto a los cursos de agua de las cuencas de orden 3, se produjeron 17 resultados. Donde los cursos con los valores máximos presentes (8 y 13), tuvieron una evolución media en la elevación. Y los cursos 4 y 16, demuestran una lenta y estable evolución en la elevación (ver tabla 11 y figuras 15 y 16).

5 Discusión

Con los hallazgos producidos sobre la cuenca del río Guayubín, se responden las preguntas planteadas sobre la forma de la cuenca y su red de drenaje, la organización de la red de drenaje, la relación de los perfiles longitudinales y su índice de concavidad con la litología en la cuenca. En cambio, las preguntas sobre 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, no fueron respondidas del todo, por lo que necesitan un análisis más detallado. Estos hallazgos se corresponden con algunas informaciones que se conocen de la cuenca, como su área, que difiere, por muy poco, de los que se conocen de Medio Ambiente y Recurso Naturales (2015).

En los parámetros de cuenca y en las estadísticas de ordenes 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; aunque la diferencia es muy poca (ver tablas 9 y 2).

La cuenca tiene forma de pera (Terrain Works Team, 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 estructurales (Ingeniero Civil Team, 2018). Howard (1967), asegura que en los patrones dendríticos 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 captura. 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 esta 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 órdenes de red difieren el uno del otro, los órdenes 1, 2, 3 y 4 mantienen una homogeneidad en su litología. Como se observa en las tablas 3 y 4, 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; estos sufrieron de cambios en su trayecto y están relacionados con la aparición de una roca dura, tras haber comparado los resultados de los cursos más largo en el mapa geológico nacional (Mollat et al., 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 de 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; 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 (ver tabla 9), como el coeficiente de compacidad que indica que la forma de la superficie de la cuenca de acuerdo con su delimitación, y el predominio en su escorrentía, es muy alargada (López Cadenas de Llano & Mintegui Aguirre, 1986); pero, el parámetro forma de la cuenca generó un índice que indica que la cuenca además de ser muy alargada está bastante ensanchada en las zonas de cuenca alta y cuenca media (Córdova, 2016; Pérez, 1979). Según los resultados de la razón de elongación, se confirma que la cuenca es alargada (De Matauco, 2004).

El curso más largo de la red de drenaje o curso principal en la cuenca, producido por *r.basin* tiene una longitud 61.96 km; según una comparación realizada entre el vectorial de cursos más largo (ver figura 9), y el curso que se obtuvo con *r.basin* (ver figura 12), es el curso numero 30 obtenido con la función *LfpNetwork*. Por lo que la cabecera del río Guayubín 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 repartición de elevaciones en la cuenca (Jose Ramon Martinez Batlle, 2019). El valor mínimo generado para la integral hipsométrica fue 0.08 en el curso 43. En tanto, el valor máximo para la integral fue de 0.48 en el curso 45 (ver tabla 10). Y los cursos más curvos fueron 37 y 18. El primero presenta signos de una evolución lenta en su elevación; y el segundo, presenta una evolución media en su elevación. Ver figuras 13 y 14. Los cursos 41 y 42 son los más rectilíneo y su integral hipsométrica es moderada por lo que estos cursos han experimentado una evolución lenta en su elevación.

Los cursos de agua pertenecientes a la cuenca de orden 3, los valores máximos presentes (8 y 13), tuvieron una evolución media en la elevación. Y los cursos 4 y 16, demuestran una lenta y

estable evolución en la elevación (ver tabla 11 y figuras 15 y 16).

Toda la información generada sobre la cuenca sirve como peldaño a futuras investigaciones sobre la misma u otras cuencas fluviales en el país.

El estudio está limitado a los análisis cuantitativos, puesto que carece de la toma de muestras en campo para una más precisa comprensión de la cuenca.

6 Agradecimientos

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

A mi maestro Jose Martínez Batlle 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 Muses, Frank de la Cruz y Cinthia Vandepool con los que me embarqué en este nuevo reto, tres meses atrás, y de los cuales recibí apoyo emocional y técnico.

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

A mis amistades por el apoyo, comprensión y motivación para que continúe y finalice mis proyectos.

7 Información de soporte

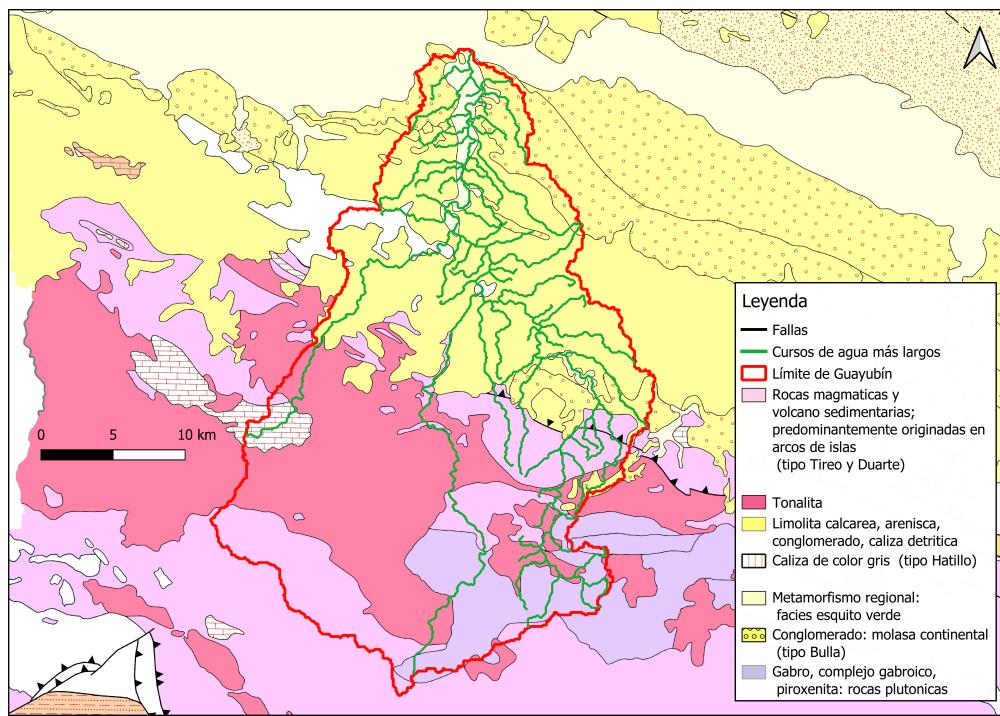


Figure 2: Mapa Geológico de la cuenca

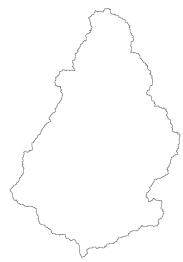


Figure 3: Forma de la cuenca del río Guayubín

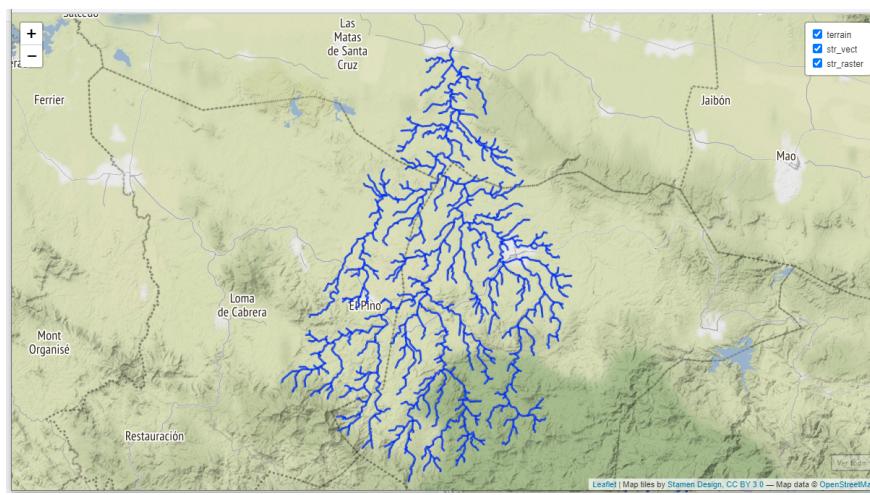


Figure 4: Red de drenaje del río Guayubín

Table 1: Materiales utilizados en la investigación.

Materiales	Uso
RStudio	Redacción del manuscrito, procesamiento de datos extraídos del MDE de la cuenca a través de un script.
library rgrass7	Creación de interfaz que establece conexión entre la versión 7 del sistema de información geográfica GRASS y R, que crea un entorno GRASS desecharable dentro de R.
library sp	Importación, manipulación y exportación de datos espaciales en R, e impresión de los mismos.
library sf	Creación de características simples (simple features), que amplían los objetos tipo data.frame con una columna de lista de características simples. Manipulación de datos geográficos (espaciales) en formato 'ráster'.
library raster	Representación de los vectores y rásters.
library leaflet	
library leafem	Proveedor de extensión para leaflet usados para paquetes mapview, permitió mostrar las coordenadas de la posición del puntero del mouse.

Materiales	Uso
library mapview	Permitió ver los objetos espaciales de forma interactiva.
library readr	Lector de datos rectangulares (como 'csv', 'tsv' y 'fwf').
QGIS with GRASS	Visualizador de vectores y rasters generados con RStudio en una región de GRASS, de los mapas Topográfico y Geológico de la República Dominicana, y también, Creador de mapas de localización.
Google Earth	Utilizado para observar datos en formato kml generados y exportados de RStudio y así como para la representación del relieve del lugar de estudio.
Mapa To- pográfico de RD	Mapa para hacer comparaciones y obtener referencias sobre el relieve.
Mapa Geológico Nacional de RD	Mapa para hacer comparaciones y obtener referencias sobre la composición rocosa y los años que datan estas (ver figura2).

Table 2: Estadísticas de los ordenes de red del río Guayubín

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 re-gresión

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

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

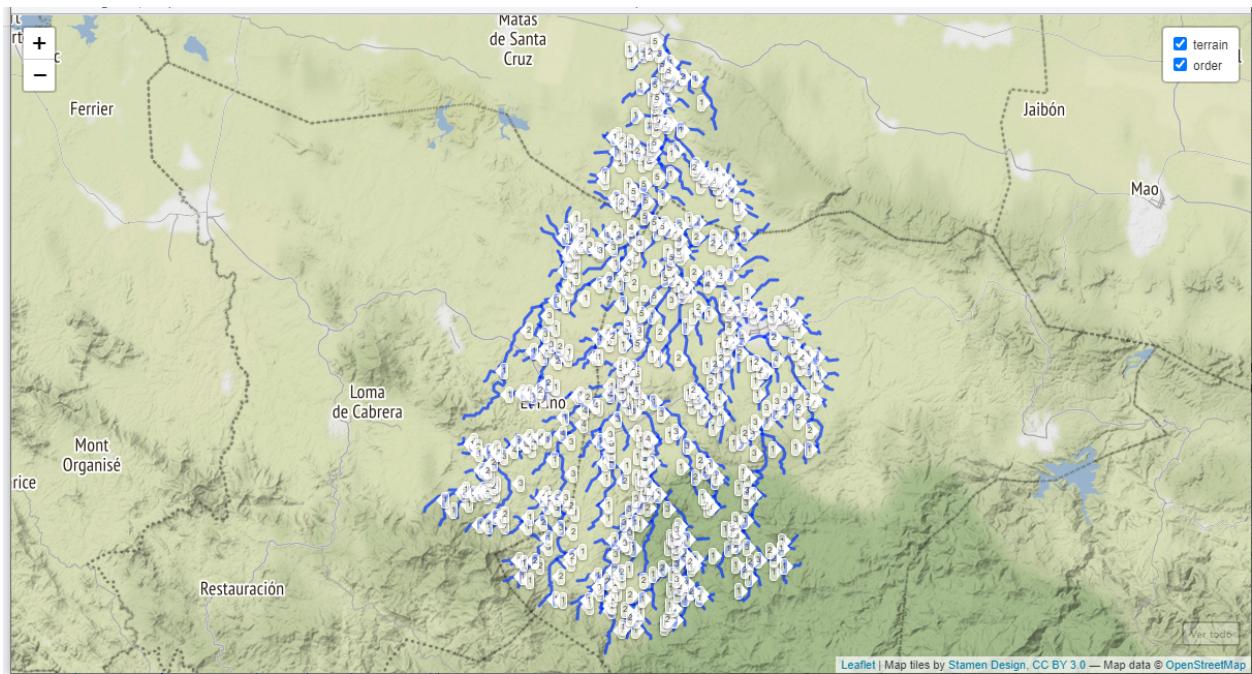


Figure 5: Ordenes de red del río Guayubín con simbología única

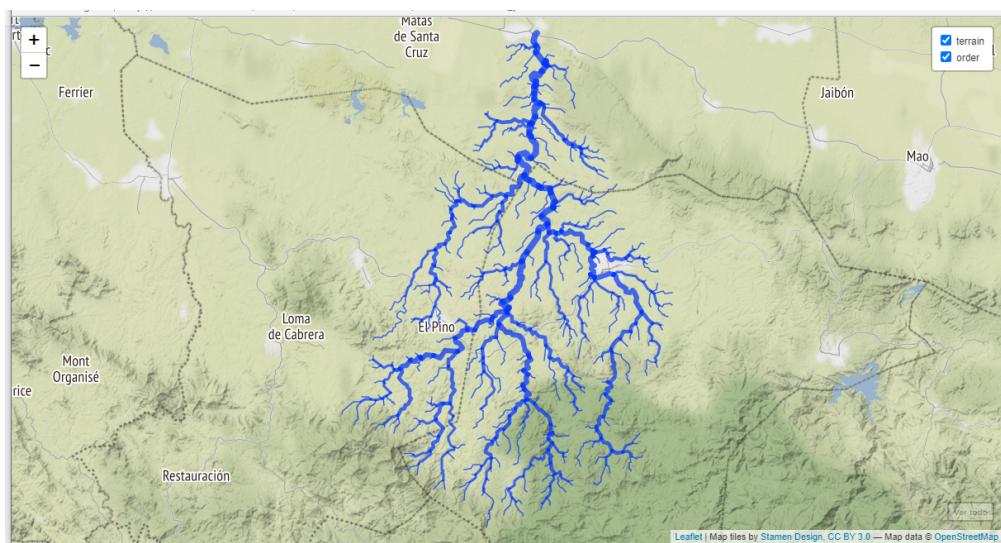


Figure 6: Ordenes de red del río Guayubín con simbología aplicando grosor según su orden

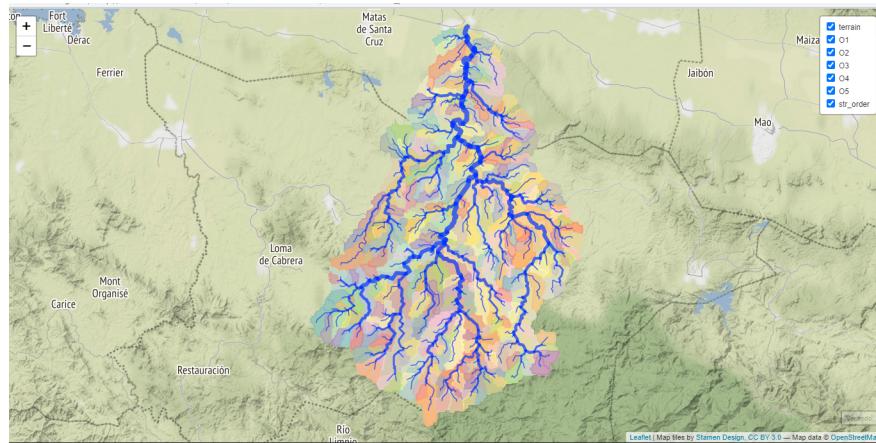


Figure 7: Red de drenaje según su orden de red del río Guayubín

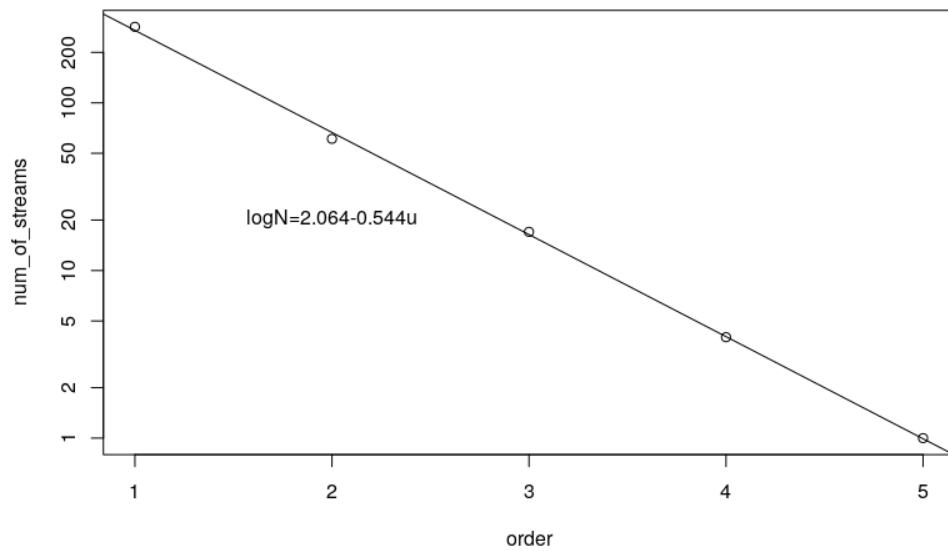


Figure 8: Número de redes según su orden y Razón de bifurcación

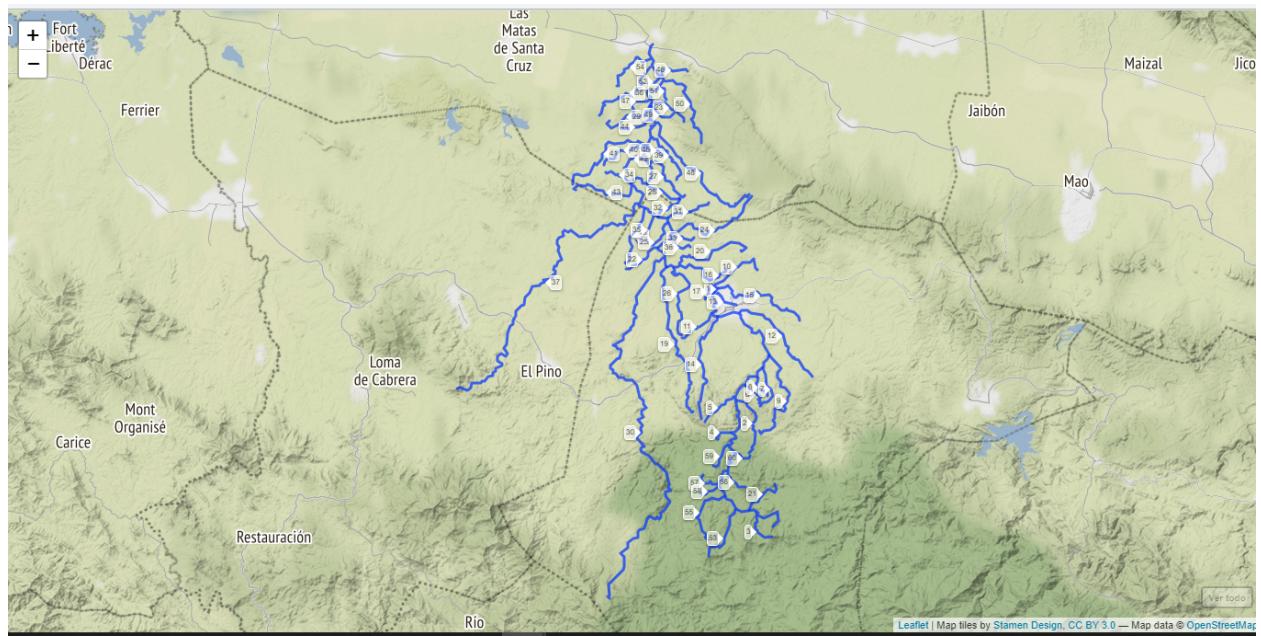


Figure 9: Cursos fluviales más largos de la cuenca del río Guayubín

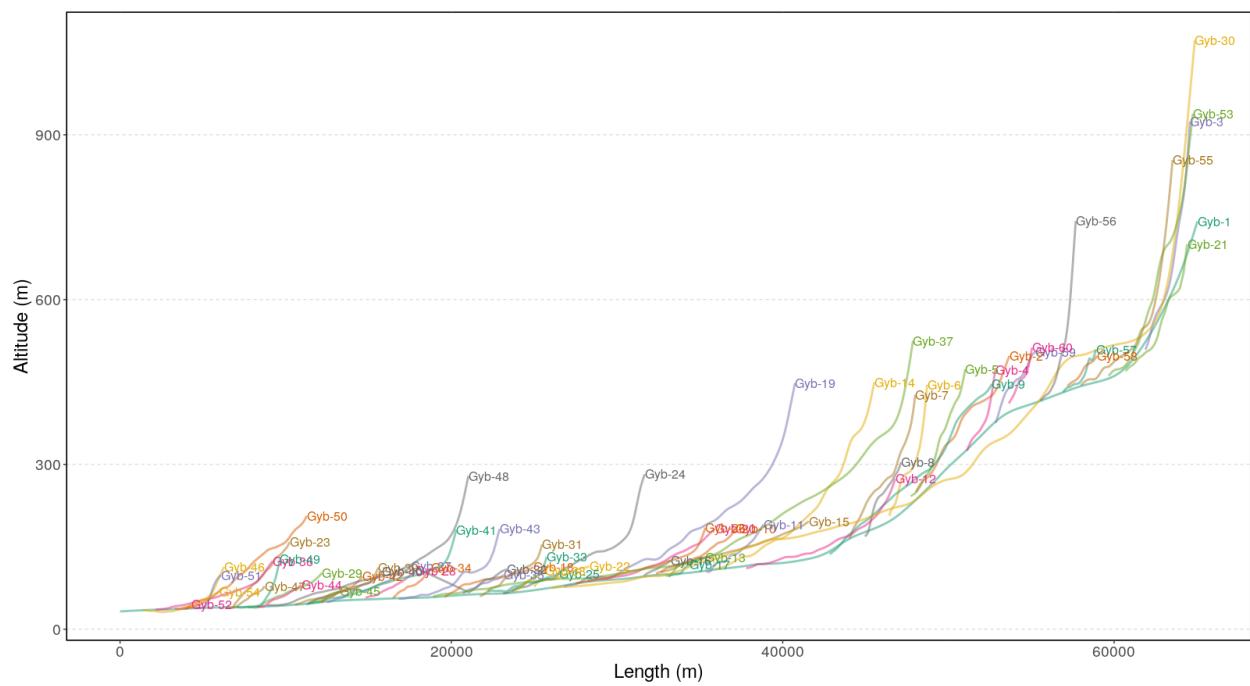


Figure 10: Perfiles longitudinales de los cursos más largos en la cuenca del río Guayubín

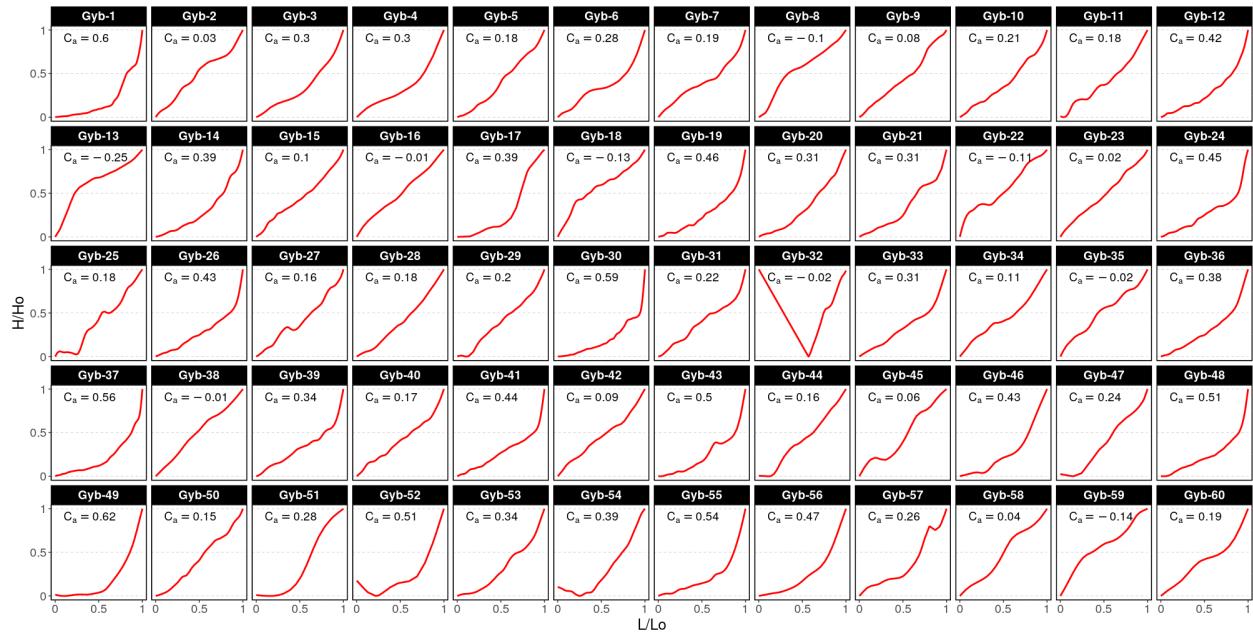


Figure 11: Perfiles longitudinales e índices de concavidad de los cursos más largos en la cuenca del río Guayubín

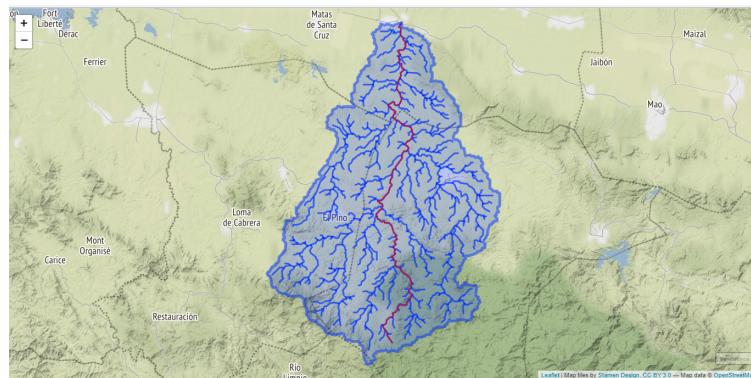


Figure 12: Cuenca del río Guayubín con su red de drenaje y su curso más largo

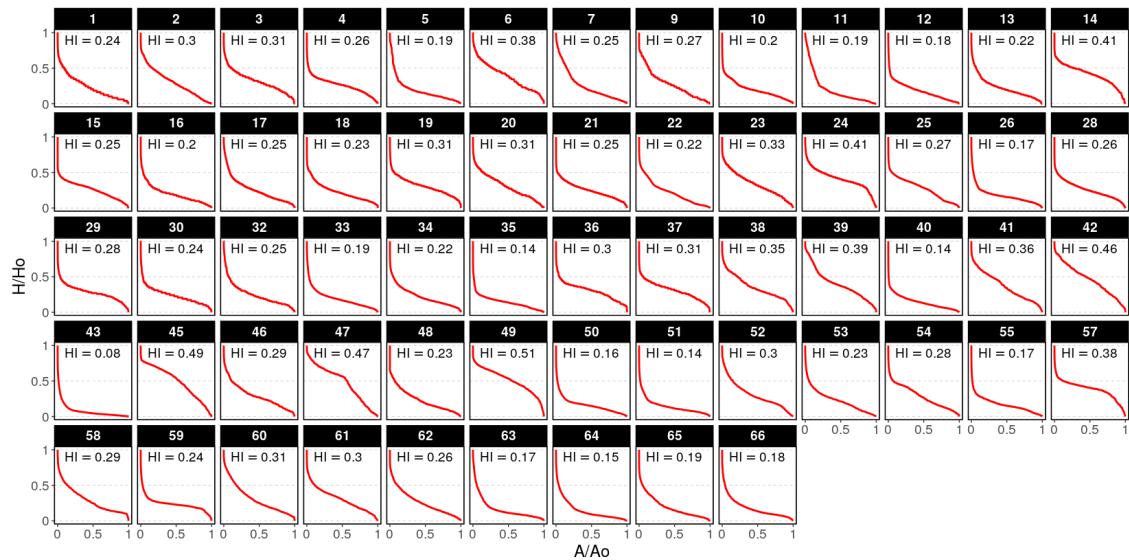


Figure 13: Curva e integral hipsométrica para las cuencas de orden 2

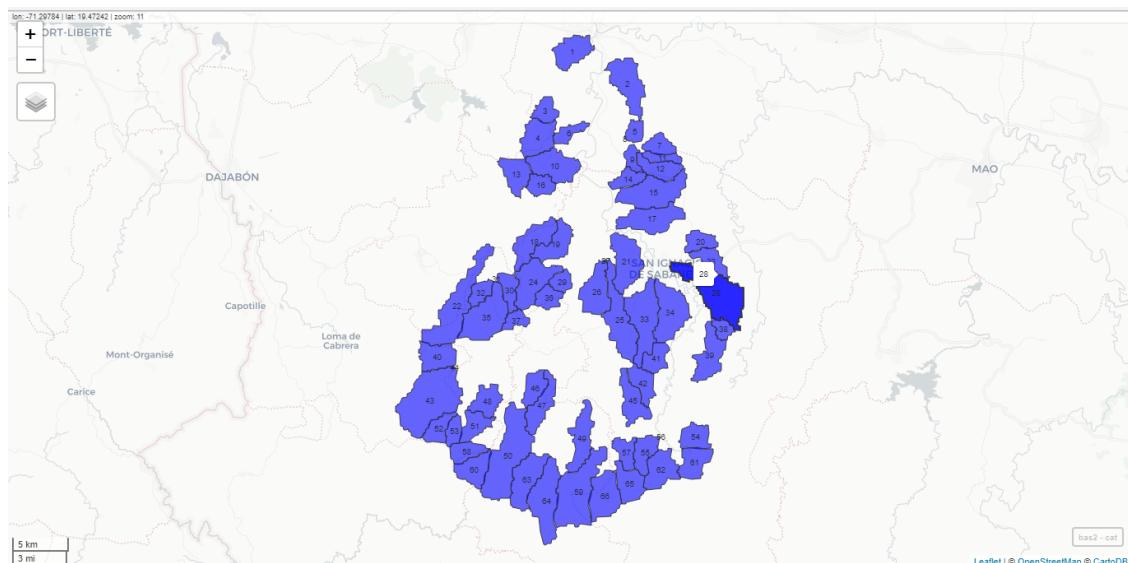


Figure 14: Cuencas de red de drenaje orden 2

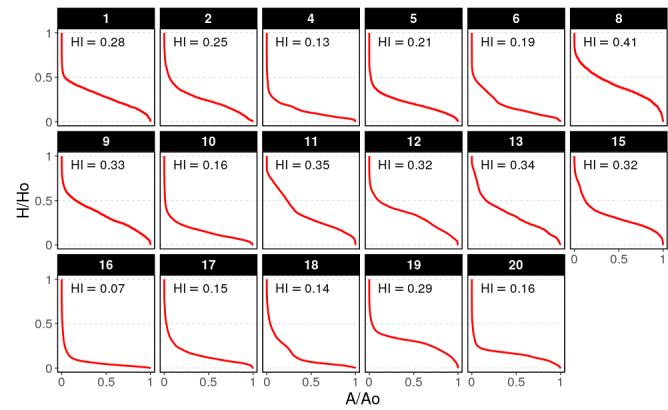


Figure 15: Curva e integral hipsométrica para las cuencas de orden 3

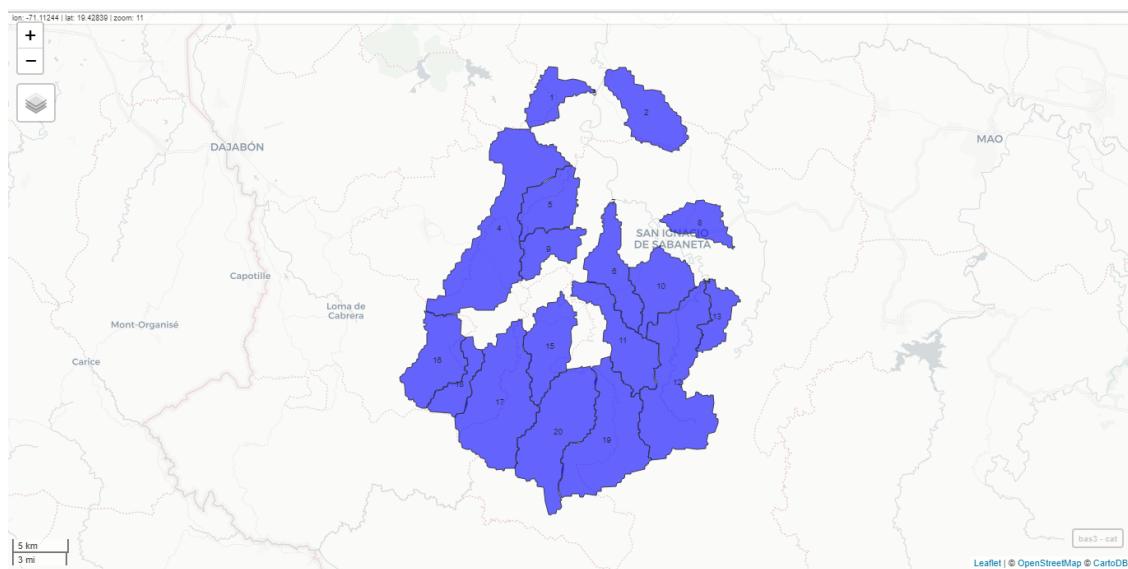


Figure 16: Cuencas de red de drenaje orden 3

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 7: Estadisticas de parámetros hidrgográficos segün el orden de red

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

Table 8: Razones de los parámetros hidrográficos segün 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

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
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

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

Categoría	Integral hipsométrica
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
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

Categoría	Integral hipsométrica
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 hipsométrico
1	0.28106607
2	0.24855493
4	0.12697883
5	0.21021494
6	0.18586633
8	0.40849637
9	0.33264116
10	0.15880640
11	0.34507681
12	0.32371339
13	0.33707592
15	0.32319904
16	0.06673204
17	0.15091492
18	0.14111015
19	0.29051932
20	0.15859746

8 Script reproducible

```
# Intro a Grass, video no. 3 ----
## Parte reutilizable del script ----
## Cargar paquetes
library(rgrass7)
library(sp)
use_sp()
library(sf)
library(raster)
library(leaflet)
```

```

library(leafem)
library(mapview)
library(readr)

gisdbase <- 'grass-data-test' #Base de datos de GRASS GIS
wd <- getwd() #Directorio de trabajo
wd
loc <- initGRASS(gisBase = "/usr/lib/grass78/",
                  home = wd,
                  gisDbase = paste(wd, gisdbase, sep = '/'),
                  location = 'guayubin',
                  mapset = "PERMANENT",
                  override = TRUE)

## Imprimir fuentes en la region
execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
  )
)

## Limpiar archivo de bloqueo del conjunto de mapas de GRASS
unlink_.gislock()

## Fin de la parte reutilizable

# Video no. 4, Definir proyección de la región de GRASS GIS, importar fuente y utilizarla para definir la proyección
## Muestra la definición de la región
gmeta()

## Definir ruta del DEM
dem <- 'datos-fuente/srtm_dem_cuenca_guayubin.tif'
execGRASS(
  cmd = 'g.proj',
  flags = c('t', 'c'),
  georef = dem)

## Muestra la definición de la región modificada
gmeta()

## r.in.gdal importa la fuente a GRASS
execGRASS(
  cmd = 'r.in.gdal',
  flags=c('overwrite','quiet'),
  parameters=list(

```

```

        input=dem,
        output='dem'
    )
)

## Actualizar la extensión de la región al DEM, sólo por precaución
execGRASS(
  cmd = 'g.region',
  parameters=list(
    raster = 'dem',
    align = 'dem'
  )
)

## Muestra la región de Grass again
gmeta()

## Importar vectorial a la región de Grass
demext <- 'datos-fuente/srtm_dem_cuenca_guayubin.geojson'
execGRASS(
  cmd = 'v.in.ogr',
  flags=c('overwrite','quiet'),
  parameters=list(
    input = demext,
    output = 'dem_extent'
  )
)

## Imprimir lista de mapas ráster y vectoriales dentro en la región/localización activa
execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
  )
)

## Ver los addons disponibles en el repositorio oficial de GRASS GIS, incluyendo descripción
execGRASS(
  cmd = 'g.extension',
  flags = 'c'
)

## Consultar la ayuda de una función
parseGRASS("r.in.gdal")

## Consultar la ayuda de una función. Segunda alternativa

```

```

system('r.in.gdal --help')

## Limpiar archivo de bloqueo del conjunto de mapas de GRASS
unlink_.gislock()

# Video no. 5, Explorar datos espaciales básicos entre GRASS y R ----
## Imprimir lista de mapas ráster y vectoriales dentro en la región/localización activa
execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
  )
)

## Cargar en R el DEM (mapa ráster)
library(sp)
use_sp()
dem_sp <- readRAST('dem')
op <- par()
plot(dem_sp)

## Cargar a R el mapa vectorial de una cuenca que se encuentra alojado fuera de GRASS, hacer el
library(sf)
rutaguayubin <- 'datos-fuente/cuenca_guayubin.geojson'
guayubin <- st_read(rutaguayubin)
plot(dem_sp)
plot(guayubin, add=T, col='transparent', border='black', lwd=5);par(op[c('mfrow', 'mar')])

## Analizar el DEM dentro de la cuenca de guayubin
library(raster)
dem_r0 <- raster(dem_sp)
dem_r1 <- crop(dem_r0, guayubin)
dem_guayu <- mask(dem_r1, guayubin)
plot(dem_guayu)
summary(dem_guayu)
hist(dem_guayu)

## Obtener variables de terreno básicas con el paquete raster dentro de R
pend_guayu <- terrain(x = dem_guayu, opt = 'slope', unit = 'degrees')
plot(pend_guayu)
summary(pend_guayu)
hist(pend_guayu)

## Obtener la misma variable de terreno con GRASS GIS
writeVECT(as_Spatial(guayubin), 'guayubin', v.in.ogr_flags='quiet')
execGRASS(

```

```

  "g.region",
  parameters=list(
    vector = "guayubin"
  )
)

execGRASS(
  "r.mask",
  flags = c('verbose', 'overwrite', 'quiet'),
  parameters = list(
    vector = 'guayubin'
  )
)

execGRASS(
  cmd = 'r.slope.aspect',
  flags = c('overwrite', 'quiet'),
  parameters = list(
    elevation='dem',
    slope='slope',
    aspect='aspect',
    pcurvature='pcurv',
    tcurvature='tcurv')
)
)

pend_guayu_g <- readRAST('slope')
plot(pend_guayu_g);par(op[c('mfrow', 'mar')])
summary(pend_guayu_g)
summary(pend_guayu)
gmeta()

execGRASS(
  "g.region",
  parameters=list(
    raster = "dem"
  )
)

execGRASS(
  "r.mask",
  flags = c('r', 'quiet')
)

gmeta()

## Limpiar archivo de bloqueo del conjunto de mapas de GRASS
unlink_.gislock()

```

```

# Video 6. Calcular parámetros hidrográficos con r.watershed. Visualizar con leaflet ----

## Imprimir lista de mapas ráster y vectoriales dentro en la región/localización activa
## Está en el archivo reusable como (# Imprimir fuentes en la region)
execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
  )
)
## Calcular parámetros hidrográficos de interés usando r.watershed
execGRASS(
  "r.watershed",
  flags = c('overwrite','quiet'),
  parameters = list(
    elevation = "dem",
    accumulation = "accum-de-rwshed",
    stream = "stream-de-rwshed",
    drainage = "drainage-dir-de-rwshed",
    basin = 'basins',
    half_basin = 'half-basins',
    threshold = 80
  )
)

## Traer capas a R

## Usar Spatial*
library(sp)
use_sp()
## Paquete manejo de los raster
library(raster)
## DEM
dem <- raster(readRAST('dem'))
## Basins
basins <- raster(readRAST('basins'))
## Stream network
stream <- raster(readRAST('stream-de-rwshed'))
stream3857 <- projectRaster(stream, crs = CRS("+init=epsg:3857"), method = 'ngb')
## Generar un vectorial de extensión de capa en EPSG:4326
e <- extent(stream)
e <- as(e, 'SpatialPolygons')
proj4string(e) <- CRS("+init=epsg:32619")
e <- spTransform(e, CRSobj = CRS("+init=epsg:4326"))

## Visualizar capas con leaflet

```

```

library(leaflet)
library(leafem)
leaflet() %>%
  addProviderTiles(providers$Stamen.Terrain, group = 'terrain') %>%
  addRasterImage(dem, group='DEM', opacity = 0.5) %>%
  addRasterImage(
    ratify(basins),
    group='basins', opacity = 0.7,
    colors = sample(rep(RColorBrewer::brewer.pal(12, 'Set3'), 1000))) %>%
  addRasterImage(stream3857, project = F, group='str', opacity = 0.7, method = 'ngb', colors = 'str')
  addLayersControl(
    overlayGroups = c('terrain','DEM','basins','str'),
    options = layersControlOptions(collapsed=FALSE)) %>%
  addHomeButton(extent(e), 'Ver todo')

## Limpiar archivo de bloqueo del conjunto de mapas de GRASS
unlink_.gislock()

# Video 7, Extraer una cuenca con r.water.outlet. Visualizar con mapview y leaflet ----
## Imprimir lista de mapas ráster y vectoriales dentro en la región/localización activa (está en el directorio actual)
execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
  )
)

## Obtener las coordenadas de la desembocadura de la cuenca de interés
library(mapview)
mapview(
  stream3857, method='ngb', col.regions = 'blue',
  legend = FALSE, label = FALSE, maxpixels = 910425
)

## Convertir las coordenadas lat/lon a EPSG:32619
my_trans <- function(coords = NULL) {
  require(sp)
  pt <- SpatialPoints(matrix(coords, ncol = 2), CRS("+init=epsg:4326"))
  foo <- spTransform(pt, CRSobj = CRS("+init=epsg:32619"))
  bar <- as.vector(coordinates(foo))
  return(bar)
}
guayu_out <- my_trans(coords = c(-71.40021, 19.66387))
guayu_out

## Extraer la cuenca de interés

```

```

execGRASS(
  "r.water.outlet",
  flags = c('overwrite','quiet'),
  parameters = list(
    input = 'drainage-dir-de-rwshed',
    output = 'guayubin-basin',
    coordinates = guayu_out
  )
)

## Convertir la cuenca a vectorial en GRASS
execGRASS(
  "r.to.vect",
  flags = c('overwrite','quiet'),
  parameters = list(
    input = 'guayubin-basin',
    output = 'guayubin_basin',
    type = 'area'
  )
)

## Mostrar lista nuevamente
execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
  )
)

## Traer a R la cuenca del rio guayubin
guayu_bas <- readVECT('guayubin_basin')
guayu_bas
plot(guayu_bas)
guayu_bas4326 <- spTransform(guayu_bas, CRSobj = CRS("+init=epsg:4326"))
leaflet() %>%
  addProviderTiles(providers$Stamen.Terrain) %>%
  addRasterImage(stream, opacity = 0.7, method = 'ngb', colors = 'blue') %>%
  addPolygons(data = guayu_bas4326) %>%
  leafem::addHomeButton(extent(guayu_bas4326), 'Ver cuenca')

## Limpiar archivo de bloqueo del conjunto de mapas de GRASS
unlink_.gislock()

# Video 8, Extraer una red drenaje con r.stream.extract. Visualizar con leaflet ----
## Imprimir lista de mapas ráster y vectoriales dentro en la región/localización activa
execGRASS(

```

```

'g.list',
flags = 't',
parameters = list(
  type = c('raster', 'vector')
)
)

## Usar la cuenca del rio guayubin como máscara
execGRASS(
  "r.mask",
  flags = c('verbose', 'overwrite', 'quiet'),
  parameters = list(
    vector = 'guayubin_basin'
  )
)

## Extraer la red de drenaje de la cuenca de interés
execGRASS(
  "r.stream.extract",
  flags = c('overwrite', 'quiet'),
  parameters = list(
    elevation = 'dem',
    threshold = 80,
    stream_raster = 'guayubin-stream-de-rstr',
    stream_vector = 'guayubin_stream_de_rstr'
  )
)

## Mostrar lista nuevamente
execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
)
)

## Traer a R la red de drenaje del rio guayubin
guayu_net <- readVECT('guayubin_stream_de_rstr', ignore.stderr = T)
guayu_net
plot(guayu_net)
guayu_net4326 <- spTransform(guayu_net, CRSobj = CRS("+init=epsg:4326"))
guayu_net4326
guayu_centroid <- coordinates(rgeos::gCentroid(guayu_bas4326))
guayu_centroid
guayu_net_r <- raster(readRAST('guayubin-stream-de-rstr'))
guayu_net_r

```

```

guayu_net_r3857 <- projectRaster(guayu_net_r, crs = CRS("+init=epsg:3857"), method = 'ngb')
guayu_net_r3857
leaflet() %>%
  setView(lng = guayu_centroid[1], lat = guayu_centroid[2], zoom = 11) %>%
  addProviderTiles(providers$Stamen.Terrain, group = 'terrain') %>%
  addRasterImage(guayu_net_r3857, opacity = 0.7, method = 'ngb', colors = 'grey20', group = 'str')
  addPolylines(data = guayu_net4326, weight = 3, opacity = 0.7, group = 'str_vect') %>%
  leafem::addHomeButton(extent(guayu_net4326), 'Ver todo') %>%
  addLayersControl(
    overlayGroups = c('terrain','str_vect','str_raster'),
    options = layersControlOptions(collapsed=FALSE))

## Limpiar archivo de bloqueo del conjunto de mapas de GRASS
unlink_.gislock()

# Video 10, Orden de red y análisis hortoniano usando r.stream*. Visualizar con leaflet ----
## Imprimir lista de mapas ráster y vectoriales dentro en la región/localización activa (está en
execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
  )
)

## Crear mapa de dirección de flujo a partir de r.stream.extract
execGRASS(
  "r.stream.extract",
  flags = c('overwrite', 'quiet'),
  parameters = list(
    elevation = 'dem',
    threshold = 80,
    direction = 'drainage-dir-de-rstr'
  )
)

## Crear mapas de órdenes de red
execGRASS(
  "r.stream.order",
  flags = c('overwrite', 'quiet'),
  parameters = list(
    stream_rast = 'guayubin-stream-de-rstr',
    direction = 'drainage-dir-de-rstr',
    elevation = 'dem',
    accumulation = 'accum-de-rwshed',
    stream_vect = 'order_all',

```

```

    strahler = 'order-strahler',
    horton = 'order-horton',
    shreve = 'order-shreve',
    hack = 'order-hack-gravelius',
    topo = 'order-topology'
)
)

## Visualizar la red con leaflet
## Simbología única
order <- readVECT('order_all')
order4326 <- spTransform(order, CRSobj = CRS("+init=epsg:4326"))
leaflet() %>%
  addProviderTiles(providers$Stamen.Terrain, group = 'terrain') %>%
  addPolylines(
    data = order4326, weight = 3, opacity = 0.7, group = 'order',
    label = ~as.character(strahler),
    highlightOptions = highlightOptions(color = "white",
                                         weight = 5, bringToFront = F, opacity = 1),
    labelOptions = labelOptions(noHide = T,
                                style = list(
                                  "font-size" = "8px",
                                  "background" = "rgba(255, 255, 255, 0.5)",
                                  "background-clip" = "padding-box",
                                  "padding" = "1px")))) %>%
  leafem::addHomeButton(extent(order4326), 'Ver todo') %>%
  addLayersControl(
    overlayGroups = c('terrain','order'),
    options = layersControlOptions(collapsed=FALSE))

## Simbología aplicando grosor según orden de red
leaflet() %>%
  addProviderTiles(providers$Stamen.Terrain, group = 'terrain') %>%
  addPolylines(
    data = order4326, weight = order4326$strahler*1.5, opacity = 0.7, group = 'order',
    label = ~as.character(strahler),
    highlightOptions = highlightOptions(color = "white",
                                         weight = 5, bringToFront = F, opacity = 1),
    labelOptions = labelOptions(noHide = F)) %>%
  leafem::addHomeButton(extent(order4326), 'Ver todo') %>%
  addLayersControl(
    overlayGroups = c('terrain','order'),
    options = layersControlOptions(collapsed=FALSE))

## Delimitar cuencas según orden de red de Strahler

## Obtener órdenes de red mínimo y máximo

```

```

## Estadísticas para obtener los valores mínimo y máximo del orden de red de Strahler
rinfo.ordstra <- execGRASS(
  'r.info',
  flags = 'r',
  parameters = list(
    map = 'order-strahler'
  )
)

## Órdenes de red mínimo y máximo
minmaxord <- as.numeric(
  stringr::str_extract_all(
    attributes(rinfo.ordstra)$resOut,
    "[0-9]+"
  )
)
minmaxord

## Delimitar cuencas, convertirlas de ráster a vectorial
sapply(
  min(minmaxord):max(minmaxord),
  function(x){
    execGRASS(
      "r.stream.basins",
      flags = c('overwrite','c','quiet'),
      parameters = list(
        direction = 'drainage-dir-de-rstr',
        stream_rast = 'order-strahler',
        cats = as.character(x),
        basins = paste0('r-stream-basins-',x)
      )
    )
    execGRASS(
      "r.to.vect",
      flags=c('overwrite','quiet'),
      parameters = list(
        input = paste0('r-stream-basins-',x),
        output = paste0('r_stream_basins_',x),
        type = 'area'
      )
    )
  }
)

## Representar las cuencas con leaflet
sapply(
  min(minmaxord):max(minmaxord),

```

```

function(x){
  assign(
    paste0('orden', x),
    spTransform(readVECT(paste0('r_stream_basins_', x)), CRSobj = CRS("+init=epsg:4326")),
    envir = .GlobalEnv)
}

paleta <- RColorBrewer::brewer.pal(12, 'Set3')
leaflet() %>%
  addProviderTiles(providers$Stamen.Terrain, group = 'terrain') %>%
  addPolygons(data = orden5, stroke = T, weight = 2,
              color = ~paleta, fillOpacity = 0.4, group = '05') %>%
  addPolygons(data = orden4, stroke = T, weight = 2,
              color = ~paleta, fillOpacity = 0.4, group = '04') %>%
  addPolygons(data = orden3, stroke = T, weight = 2,
              color = ~paleta, fillOpacity = 0.4, group = '03') %>%
  addPolygons(data = orden2, stroke = T, weight = 2,
              color = ~paleta, fillOpacity = 0.4, group = '02') %>%
  addPolygons(data = orden1, stroke = T, weight = 2,
              color = ~paleta, fillOpacity = 0.4, group = '01') %>%
  addPolylines(
    data = order4326, weight = order4326$strahler*1.5,
    opacity = 0.7, group = 'str_order') %>%
  leafem::addHomeButton(extent(order4326), 'Ver todo') %>%
  addLayersControl(
    overlayGroups = c('terrain','01','02','03','04','05','str_order'),
    options = layersControlOptions(collapsed=FALSE))

## Estadísticas de red resumidas por orden de red
execGRASS(
  "r.stream.stats",
  flags = c('overwrite','quiet','o'),
  parameters = list(
    stream_rast = 'order-strahler',
    direction = 'drainage-dir-de-rstr',
    elevation = 'dem',
    output = 'guayu_stats.txt'
  )
)
file.show('guayu_stats.txt')
d <- read.csv("guayu_stats.txt", skip=1, header=TRUE)
plot(num_of_streams~order, data=d, log="y")
mod <- lm(log10(num_of_streams)~order, data=d)
abline(mod)
text(2, 20, 'logN=2.064-0.544u')
rb <- 1/10^mod$coefficients[[2]]

```

```

rb

## Estadísticas de red ampliadas
execGRASS(
  "r.stream.stats",
  flags = c('overwrite','quiet'),
  parameters = list(
    stream_rast = 'order-strahler',
    direction = 'drainage-dir-de-rstr',
    elevation = 'dem',
    output = 'guayu_stats_expanded.txt'
  )
)
file.show('guayu_stats_expanded.txt')

## Limpiar archivo de bloqueo del conjunto de mapas de GRASS
unlink_.gislock()

```

```

# Video 11, Calcular índices de concavidad y perfiles longitudinales de cursos fluviales---
## Imprimir lista de mapas ráster y vectoriales dentro en la región/localización activa
execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
  )
)

## Obtener coordenada
mapview(order, col.regions = 'blue', legend = FALSE)

## Obtener cursos más largos (cargar función propia)
devtools::source_url('https://raw.githubusercontent.com/geofis/rgrass/master/lfp_network.R') #Ca
LfpNetwork(
  xycoords = my_trans(c(-71.40047,19.66268)),
  suffix = 'Gyb',
  stream_vect = 'order_all',
  direction = 'drainage-dir-de-rstr'
)

## Imprimir lista de mapas ráster y vectoriales
execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
  )
)

```

```

)

## Representar con leaflet
lfp <- readVECT('LfpNetwork_lfp_all_final_Gyb')
lfp4326 <- spTransform(lfp, CRSobj = CRS("+init=epsg:4326"))
leaflet() %>%
  addProviderTiles(providers$Stamen.Terrain, group = 'terrain') %>%
  addPolylines(
    data = lfp4326, weight = 3, opacity = 0.7, group = 'order',
    label = ~as.character(cat),
    highlightOptions = highlightOptions(color = "white",
                                         weight = 5, bringToFront = F, opacity = 1),
    labelOptions = labelOptions(noHide = T,
                                style = list(
                                  "font-size" = "8px",
                                  "background" = "rgba(255, 255, 255, 0.5)",
                                  "background-clip" = "padding-box",
                                  "padding" = "1px")))) %>%
  leafem::addHomeButton(extent(lfp4326), 'Ver todo')

## Exportar a KML
execGRASS(
  'v.out.ogr',
  flags = c('overwrite','quiet'),
  parameters = list(
    input = 'LfpNetwork_lfp_all_final_Gyb',
    output = 'lfp_kml.kml',
    format = 'KML',
    dsco = 'NameField=cat'
  )
)

## Obtención de perfiles longitudinales e índices de concavidad
source('lfp_profiles_concavity.R') #Cargado como función "LfpProfilesConcavity"
guayubin_conv_prof <- LfpProfilesConcavity(
  xycoords = my_trans(c(-71.40047,19.6626)),
  network = 'LfpNetwork_lfp_all_final_Gyb',
  prefix = 'Gyb',
  dem = 'dem',
  direction = 'drainage-dir-de-rstr',
  crs = '+init=epsg:32619',
  smns = 0.5,
  nrow = 5)

## Mostrar resultados
guayubin_conv_prof$profiles
guayubin_conv_prof$concavityindex

```

```

guayubin_conv_prof$dimensionlessprofiles

## Tabla dx/dy, tanto en metros como adimensional. Útiles para construir perfiles por cuenta propia
guayubin_conv_prof$lengthzdata %>% tibble::as.tibble()
guayubin_conv_prof$lengthzdatadmnls %>% tibble::as.tibble()

## Revisar en QGIS/Google Earth relación litología/concavidad
## Descargar archivo lfp_kml.kml localmente, superponer al mapa geológico usando QGIS y GoogleEarth

## Limpiar archivo de bloqueo del conjunto de mapas de GRASS
unlink_.gislock()

# Video 12, Parámetros de cuenca con r.basin ----
library(rgrass7)
gisdbase <- 'grass-data-test' #Base de datos de GRASS GIS
wd <- getwd() #Directorio de trabajo
wd
loc <- initGRASS(gisBase = "/usr/lib/grass78/",
                  home = wd,
                  gisDbase = paste(wd, gisdbase, sep = '/'),
                  location = 'guayubin',
                  mapset = "PERMANENT",
                  override = TRUE)

gmeta()
execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
  )
)

## Convertir a números enteros la extensión y la resolución del DEM
library(raster)
rutadem <- 'datos-fuente/srtm_dem_cuenca_guayubin.tif'
rawextent <- extent(raster(rutadem))
rawextent
devtools::source_url('https://raw.githubusercontent.com/geofis/rgrass/master/integerextent.R')
devtools::source_url('https://raw.githubusercontent.com/geofis/rgrass/master/xyvector.R')
newextent <- intext(e = rawextent, r = 90, type = 'inner')
newextent
gdalUtils::gdalwarp(
  srcfile = 'datos-fuente/srtm_dem_cuenca_guayubin.tif',
  dstfile = 'demint.tif',
  te = xyvector(newextent),
  tr = c(90,90),
  r = 'bilinear',

```

```

    overwrite = T
)

## Importar a sesión de GRASS
rutademint <- 'demint.tif'
execGRASS(
  "g.proj",
  flags = c('t','c'),
  georef=rutademint)
gmeta()
execGRASS(
  "r.in.gdal",
  flags='overwrite',
  parameters=list(
    input=rutademint,
    output="demint"
  )
)

execGRASS(
  "g.region",
  parameters=list(
    raster = "demint",
    align = "demint"
  )
)

gmeta()

execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
  )
)

## Generar red de drenaje para obtener coordenada posteriormente
execGRASS(
  "r.stream.extract",
  flags = c('overwrite','quiet'),
  parameters = list(
    elevation = 'demint',
    threshold = 80,
    stream_raster = 'stream-de-rstr',
    stream_vector = 'stream_de_rstr'
  )
)

```

```

)

execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
  )
)

## Obtener coordenada
library(sp)
use_sp()
library(mapview)
netw <- spTransform(
  readVECT('stream_de_rstr'),
  CRSobj = CRS("+init=epsg:4326"))

mapview(netw, col.regions = 'blue', legend = FALSE)

## Transformar coordenada a EPSG:32619 como número entero
source('my-trans.R')
outlet <- as.integer(my_trans(c(-71.40009, 19.66390)))

## Ejecutar r.basin
pref <- 'rbasin_guay'
execGRASS(
  "r.basin",
  flags = 'overwrite',
  parameters = list(
    map = 'demint',
    prefix = pref,
    coordinates = outlet,
    threshold = 80,
    dir = 'salidas-rbasin/guayubin'
  )
)

execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
  )
)

# Si r.basin arrojara error (sólo en el caso de error, no en caso de advertencia), ejecutar este

```

```

# execGRASS(
#   "g.remove",
#   flags = 'f',
#   parameters = list(
#     type = c('raster', 'vector'),
#     pattern = paste0(pref, '*')
#   )
# )

## Cargar los vectoriales transformados a EPSG:4326 para visualizar en leaflet
rbnetw <- spTransform(
  readVECT('rbasin_guay_demint_network'),
  CRSobj = CRS("+init=epsg:4326")
rbnetw
rbmain <- spTransform(
  readVECT('rbasin_guay_demint_mainchannel'),
  CRSobj = CRS("+init=epsg:4326")
rbmain
rbbasin <- spTransform(
  readVECT('rbasin_guay_demint_basin'),
  CRSobj = CRS("+init=epsg:4326")
rbbasin

library(leaflet)
leaflet() %>%
  addProviderTiles(providers$Stamen.Terrain, group = 'terrain') %>%
  addPolylines(data = rbnetw, weight = 3, opacity = 0.7) %>%
  addPolylines(data = rbmain, weight = 3, opacity = 0.7, color = 'red') %>%
  addPolygons(data = rbbasin) %>%
  leafem::addHomeButton(extent(rbbasin), 'Ver cuenca')

## Explorar los parámetros de cuenca
library(readr)
rbguaypar1 <- read_csv("salidas-rbasin/guayubin/rbasin_guay_demint_parametersT.csv")
rbguaypar1 %>% tibble::as_tibble()
# para vizualizar la tabla mejor traer a r, usar View(rbguaypar1)

rbguaypar2 <- read_csv(
  "salidas-rbasin/guayubin/rbasin_guay_demint_parameters.csv",
  skip=2, col_names = c('Parameter', 'Value'))
rbguaypar2 %>% print(n=Inf)

## Limpiar archivo de bloqueo del conjunto de mapas de GRASS
unlink_.gislock()

# Video 13, Curva e integral hipsométrica ----
## Imprimir lista de mapas ráster y vectoriales dentro en la región/localización activa

```

```

execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
  )
)

## Representar cuencas
library(sp)
use_sp()
library(mapview)
bas2 <- readVECT('r_stream_basins_2')
bas3 <- readVECT('r_stream_basins_3')

## Curva e integral hipsométrica
source('integral_hypsometric_curve.R') #Cargada como función "HypsoIntCurve"
HypsoBasinsOrder2 <- HypsoIntCurve(
  basins = 'r_stream_basins_2',
  dem = 'dem',
  labelfield = 'cat',
  nrow = 5,
  labelsize = 4
)

HypsoBasinsOrder2$HypsoInt
HypsoBasinsOrder2$HypsoCurve
mapview(bas2, zcol='cat', col.regions = 'blue', legend = FALSE) %>%
  addStaticLabels(label = bas2$cat)

HypsoBasinsOrder3 <- HypsoIntCurve(
  basins = 'r_stream_basins_3',
  dem = 'dem',
  labelfield = 'cat',
  nrow = 3,
  labelsize = 4
)

HypsoBasinsOrder3$HypsoInt
HypsoBasinsOrder3$HypsoCurve

mapview(bas3, zcol='cat', col.regions = 'blue', legend = FALSE) %>%
  addStaticLabels(label = bas3$cat)

## Limpiar archivo de bloqueo del conjunto de mapas de GRASS
unlink_.gislock()

```

Referencias

- Allaire, J. (2012). RStudio: Integrated development environment for r. *Boston, MA*, 770, 394.
- 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.
- 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.
- Di Leo, M., & Di Stefano, M. (2003–2021). *Addon r.basin*. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/addons/r.basin.html#morphometric-parameters-of-basin>
- Ehlschlaeger, C., & Laboratory, U. A. C. E. R. (2003–2021a). *Addon r.water.outlet*. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/r.water.outlet.html>
- Ehlschlaeger, C., & Laboratory, U. A. C. E. R. (2003–2021b). *Addon r.watershed*. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/grass79/manuals/r.watershed.html>
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., ... others. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2).
- 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.
- Fernández, V. (2002). El papel de la geomorfología en los problemas ambientales. *Centro de Geociencias Aplicadas, Universidad Nacional Del Nordeste, Chaco, Argentina*.
- 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.
- GRASS Development Team. (2003–2021). *Addon r.to.vect*. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/grass76/manuals/r.to.vect.html>
- 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>
- Jasiewicz, J. (2003–2021). *Addon r.stream.order*. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/addons/r.stream.order.html>
- Jasiewicz, J., University, A. M., & GeoInformation Institute, G. &. (2003–2021). *Addon r.stream.stats*. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/addons/r.stream.stats.html>
- Jasiewicz, J., University, A. M., Geocology, & Institute, G. (2003–2021). *Addon r.stream.basins*. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/addons/r.stream.basins.html>
- Kelly, P. (2003–2021). *Addon g.proj*. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/grass79/manuals/g.proj.html>
- Lizmap. (s.f.). *Topo map of the dominican republic 1:50k*. url<https://geofis.xyz/lm/index.php/view/map/?repository=geo50krd&project=dominican>
- Lohmar, F. J. (1988). World geodetic system 1984—geodetic reference system of gps orbits. In *GPS-techniques applied to geodesy and surveying* (pp. 476–486). Springer.
- López Cadenas de Llano, F., & Mintegui Aguirre, J. (1986). *Hidrología de la superficie-ti*.
- 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>
- Mollat, H., Wagner, B. M., Cepek, P., & Weiss, W. (2004). *Mapa geológico nacional de la república dominicana: Escala 1:250,000*. url<https://geofis.xyz/lm/index.php/view/map/?repository=geo250krd&project=dominican>
- Morais, F., & Almeida, L. M. (2010). Geomorfologia fluvial da bacia hidrográfica do ribeirão jaú-palmas-to. *Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities Research Medium*, 1(2).
- Neteler, M., Beaudette, D., Cavallini, P., Lami, L., & Cepicky, J. (2008). Grass gis. In *Open source approaches in spatial data handling* (pp. 171–199). Springer.
- O’Shea, M., & Laboratory, U. A. C. E. R. (2003–2021). *Addon r.info*. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/r.info.html>
- 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.
- Sala, M. (1984). Geomorfología actual. guía conceptual, temática y bibliográfica. *Revista de Geografía*, 209–248.
- 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.
- Terrain Works Team. (2014). Tributary confluence effects. Retrieved from http://www.netmaptools.org/Pages/NetMapHelp/tributary_confluence_effects.htm
- Warmerdam, F. (2003–2021). *Addon r.in.gdal*. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/grass79/manuals/r.in.gdal.html>
- Warmerdam, F., Rouault, E., & others. (1998–2021). *Utility gdalwarp*. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/grass79/manuals/gdalwarp.html>

[//gdal.org/programs/gdalwarp.html](https://gdal.org/programs/gdalwarp.html)

Wikipedia Contributors. (2020). Stream order. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Stream_order