
GENERACIÓN DE RED HIDROGRÁFICA DENSA DE REPÚBLICA DOMINICANA A PARTIR DE MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES DE RESOLUCIÓN MEDIA

PREPUBLICACIÓN - PREPRINT

José-Ramón Martínez-Batlle^{ID}

Facultad de Ciencias

Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD)
Santo Domingo, República Dominicana
joseramon@geografiafisica.org

Michela Izzo Gioiosa^{ID}

Directora Ejecutiva

Guakia Ambiente

Santo Domingo, República Dominicana
michela.izzo@guakiambiente.org

10 de agosto de 2023

Resumen

La administración eficiente de recursos hídricos es crucial, especialmente en países que comparten islas, como República Dominicana. No obstante, la gestión de estos recursos a menudo se ve limitada por la falta de información precisa y detallada sobre la red hidrográfica. A pesar de que existen múltiples fuentes de información geográfica sobre la hidrografía del país, éstas presentan limitaciones en términos de resolución, cobertura y consistencia. En este trabajo presentamos una red hidrográfica densa, y sus correspondientes cuencas, obtenidas tras aplicar algoritmos reproducibles de hidrología computacional a un Modelo Digital de Elevaciones (DEM) de resolución media de República Dominicana. Extrajimos estadísticos sobre la morfotopografía y variables hortonianas, y caracterizamos las corrientes y cuencas en función del orden de red de forma consistente. Los resultados evidenciaron patrones hasta ahora desconocidos sobre la hidrografía, que responden en gran medida a la distribución de la litología, las estructuras tectónicas, la geomorfología y, posiblemente, a variables climáticas. A pesar de limitaciones como la variabilidad en precisión posicional y la falta de datos completos en llanuras, nuestro resultado tiene buena precisión en áreas de montaña y piedemonte y, al mismo tiempo, generamos una contribución metodológica y de producción de datos relevante. Nuestro trabajo constituye un aporte significativo a la geografía física dominicana, y sienta un precedente en la aplicación de técnicas de hidrología computacional. Con la combinación de datos, protocolos y análisis, destaca la trascendencia de la investigación, aportando herramientas valiosas para futuras aplicaciones prácticas y científicas.

Keywords modelo digital de elevaciones · análisis hidrológico · procesamiento de datos geoespaciales · hidrología computacional

1. Introducción

El agua es un recurso crítico, que impulsa la economía y sostiene la vida. A nivel global, pero especialmente en países que comparten islas pequeñas, como República Dominicana (RD), la administración eficaz de este recurso es esencial (Izzo et al., 2010; Le, 2019; Lenderking et al., 2020; Lohmann, 2016; Mackay y Spencer, 2017; Roson, 2013). Sin embargo, la gestión eficiente de los recursos hídricos puede verse limitada por la falta de información precisa y completa sobre la red hidrográfica. En este contexto, las fuentes actuales de información geográfica, a pesar de su valor, presentan limitaciones en cuanto a su resolución, cobertura y consistencia.

- 30 La red hidrográfica de RD digitalizada a partir del mapa topográfico nacional a escala 1:50,000 (“MTN-50k”) (Instituto Cartográfico Militar (ICM), 1989) ofrece una cobertura extensa pero carece de los detalles necesarios para apoyar el análisis hidrológico. Por otro lado, los estudios técnicos y multitemáticos de ámbito subnacional desarrollados por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI) de RD y otras entidades y autores, aunque son valiosas fuentes de información, utilizan metodologías diversas, lo que limita la consolidación de una red hidrográfica coherente a nivel nacional (CIDIAT y INDRHI, 1992; Halcrow-COR Ing. S.A., 2002; INDRHI, 1996, 2012; INDRHI y AQUATER, 2000; INDRHI y EPTISA, 2000; Martínez-Batlle, 2019; Martínez-Batlle, 2019a; OEA y INDRHI, 1994; Rodríguez y Febrillet, 2006; Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2004; SERCITEC y INDRHI, 2002)
- 31 Adicionalmente, las redes hidrográficas derivadas de modelos digitales de elevaciones de baja resolución, como el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de 3 arco-segundos, normalmente presentan artefactos de difícil depuración, además de que la longitud de los canales es siempre más corta que la verdadera, resultando en redes poco densas (Jarvis et al., 2008; NASA JPL, 2013; NASA LP DAAC, 2000; National Aeronautics and Space Administration y United States Geological Survey, 2009). Por otro lado, el DEM SRTM de 1 arco-segundo (~30 metros) garantiza la precisión mientras aumenta el detalle de elevación y parece ser una de las fuentes más consistentes actualmente (Aziz y Rashwan, 2022). No obstante, nosotros hemos generado productos hidrográficos con SRTM-DEM de 30 metros, y notamos que el nivel de detalle de la red es bastante mejorable, sobre todo en áreas de montaña.
- 32 Desde 2014, Alaska Satellite Facility (ASF) inició la creación de productos ALOS-PALSAR corregidos radiométricamente en función del terreno (RTC), con el objetivo de mejorar la geometría y la radiometría—coeficiente de retrodispersión por unidad de superficie del frente de onda incidente, también conocido como *gamma-nought*, γ^0 —de las imágenes generadas por el sensor PALSAR (radar de apertura sintética, banda L, con distintas polarizaciones y modos de barrido) montado a bordo del satélite ALOS de la Agencia Espacial Japonesa (JAXA) (ASF DAAC, 2014; JAXA/METI y ASF DAAC, 2015). ALOS fue lanzado en 2006, pero luego de cinco años de servicio, perdió energía y cesó la comunicación con el centro de control, aunque aún permanece en órbita.
- 33 Para obtener los productos RTC, denominados propiamente como “*Hi-Res Terrain Corrected*” o “ALOS PALSAR RTC”, ASF requirió de datos globales de elevación de la máxima resolución posible, para lo cual empleó de forma preferente (según territorios) el SRTM de 1 arco-segundo. En el proceso fue necesario ajustar el espaciado de píxeles del DEM fuente (~30 metros) para hacerlo coincidir con el espaciado de píxel de las imágenes ALOS PALSAR (~ 12.5 metros) usando una función de remuestreo (*up-sampling*), obteniéndose así un DEM de 12.5 metros (ASF DAAC, 2014; JAXA/METI y ASF DAAC, 2015).
- 34 A pesar de que ASF advirtió que este DEM se empleó únicamente para realizar la corrección radiométrica del terreno del producto derivado de ALOS-PALSAR, y que no debería ser utilizado como fuente de elevación precisa (ASF DAAC, 2014), lo cierto es que en países donde no se dispone de DEM de mediana o alta resolución, se vuelve crucial indagar en el potencial de cada nuevo producto disponible. Por esta razón, tras varias pruebas iniciales en las que extrajimos redes de drenaje y elementos del relieve a partir de este DEM, comprobamos que la red hidrográfica obtenida tenía mucho mayor detalle que las redes generadas con cualquier otra fuente disponible. Dado que la elevación precisa no es crucial en nuestras aplicaciones, vimos un alto potencial en este DEM para realizar aplicaciones de hidrología computacional, en concreto para la extracción de redes densas con énfasis en áreas de montaña.
- 35 El propósito de este artículo es ofrecer nuevos datos hidrográficos para superar las limitaciones de las fuentes cartográficas existentes, generando una red densa de ríos, arroyos y cañadas—canales, talwegs—, acompañada de una delimitación exhaustiva de cuencas hidrográficas, con énfasis en áreas montañosas—donde las fuentes actualmente disponibles suelen mostrar una red dispersa—, utilizando como fuente el DEM servido con los productos ALOS PALSAR RTC de 12.5 metros de resolución espacial. Nuestro segundo objetivo es optimizar el DEM, reduciendo el ruido y asegurando su precisión hidrológica, a la vez que mantenemos los elementos morfológicos significativos del terreno. Nuestro tercer objetivo, de igual importancia, es sistematizar el protocolo de procesamiento y análisis, creando una metodología explícita y completamente reproducible, que se traduce en una base de código abierto para el manejo de datos de elevación e hidrología computacional, disponible para su uso por estudiantes e investigadores interesados en aplicarlo a datos similares.
- 36 Nuestro trabajo tiene potencial para suplir las demandas de información sobre hidrografía de resolución fina, que es un aspecto crucial en muchos estudios de modelación, análisis de riesgos, morfometría de cuencas, entre otros. De manera particular, la hidrografía densa generada por nosotros es idónea para mejorar la red estaciones hidrométricas del país, la cual es limitada y afronta diversos desafíos de densidad de puntos y de operación, un común denominador en este tipo de redes globalmente. Nos enfocamos en la utilidad

de una hidrografía sistemáticamente generada, no necesariamente en las métricas precisas, pues el modelo digital de elevaciones usado tiene error, y la información de terreno necesaria para conducir el flujo en áreas llanas, es insuficiente. Asimismo, nuestro trabajo también podría contribuir a aportar información para acciones de conservación, planificación y gestión de los recursos hídricos a nivel nacional (Burn, 1997; INDRHI, 2019; Mishra y Coulibaly, 2009; Mishra y Coulibaly, 2010). Además, los datos generados pueden ser de gran valor para un amplio rango de aplicaciones, incluyendo la planificación del uso del suelo, el diseño de infraestructuras, la gestión de cuencas hidrográficas y la modelización de escorrentía y erosión. A medida que nos enfrentamos a los impactos del cambio climático y a la creciente escasez de agua, esperamos que este trabajo sirva como una contribución significativa para la gestión de los recursos hídricos en la República Dominicana (Izzo et al., 2010; Le, 2019; Lenderking et al., 2020; Lohmann, 2016; Mackay y Spencer, 2017; Roson, 2013).

Notas sobre terminología

La terminología utilizada para describir los distintos componentes de los sistemas fluviales es un tema de continuo debate en el campo de la geomorfología fluvial. Este debate suele estar intrínsecamente ligado a la escala de análisis empleada; al variar la escala, incrementándola o reduciéndola, los criterios empleados para delimitar las definiciones de los elementos morfológicos, tienden a desdibujarse y/o a resultar inconsistentes (García y Ojeda, 2011). Seleccionar el término apropiado para describir la unidad topográficamente deprimida por donde fluye o por donde podría circular el agua de escorrentía, es un desafío nada despreciable. Este reto se intensifica cuando el idioma introduce distintas connotaciones para términos similares, y donde la traducción podría prestarse a confusión—tal como ocurre con *channel* y canal en inglés y español, respectivamente—(Anderson y Anderson, 2010; Charlton, 2010; Gutiérrez Elorza, 2009; Pedraza Gilsanz, 1996).

La resolución de las discrepancias en la terminología supera el alcance del presente trabajo, por lo decidimos fijar los términos utilizados en el artículo de manera convencional. En este estudio, empleamos los términos *talweg* y canal de forma indistinta para referirnos a la unidad topográficamente deprimida por la que fluye, o podría fluir, la corriente. En geomorfología, utilizamos la voz germánica *talweg* para referirnos a la línea imaginaria que traza la parte más baja de un valle, razón por la cual también la hemos incluido entre los términos genéricos usados (Foucault y Raoult, 1985). Es importante remarcar que nuestra definición convencional no siempre se refiere a un curso fluvial permanente, pues la circulación del agua es influenciada por múltiples factores. Asimismo, cabe destacar que, a esta unidad geomorfológica en sus distintas variantes hidrodinámicas y dimensionales, también se le conoce con múltiples nombres en República Dominicana (en orden de mayor a menor “importancia”), como son río, arroyo o cañada, denominaciones que también incorporamos en la redacción.

Finalmente, en nuestro en este trabajo también adoptamos los términos curso, drenaje o corriente, especialmente cuando destacamos la presencia de un flujo ya sea permanente, semipermanente o intermitente. Además, para el análisis hortoniano de los sistemas fluviales, nos referimos al sistema interconectado de canales, cursos, corrientes o drenajes con las denominaciones “red de drenajes” o “red hidrográfica”.

2. Materiales y métodos

2.1. Obtención y Preprocesamiento del DEM

Iniciamos nuestro estudio valorando diversas herramientas para el procesamiento de los datos (Figura 1). Debido a la gran variedad de complementos que ofrece, junto con su alto rendimiento y la calidad de los resultados que proporciona, decidimos utilizar GRASS GIS v8.2.0 para realizar la mayor parte del preprocesamiento del DEM (GRASS Development Team, 2023). La implementación de su interfaz de línea de comandos (e.g. interfaz basada en texto), en nuestro caso Bash, garantizó la reproducibilidad de nuestros procedimientos. Nos auxiliamos también de la biblioteca GDAL/OGR, WhiteboxTools el entorno de programación estadística R y el lenguaje de programación Python (GDAL/OGR contributors, 2022; Lindsay, 2018; R Core Team, 2023; Van Rossum y Drake, 2009). Nuestro enfoque de reproducibilidad asegura que, sin importar la fuente de datos empleada, el seguimiento del flujo de trabajo es viable, manteniendo la integridad y coherencia del proceso de análisis, sin menoscabo de la calidad del resultado final.

Asimismo, para facilitar nuestra labor, utilizamos una serie de bibliotecas de R, además de funciones personalizadas escritas por nosotros para agilizar y optimizar las tareas de limpieza y representación de datos y mapas (Hijmans, 2023; O'Brien, 2023; Pebesma, 2018; Pebesma y Bivand, 2023; Tennekes, 2018; Wickham

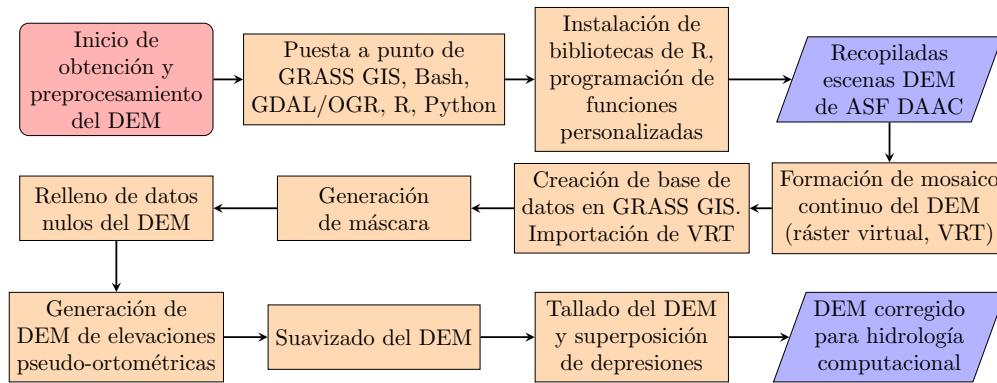


Figura 1: Resumen gráfico de la obtención y preprocesamiento del DEM

et al., 2019; Xie, 2014, 2015, 2023; Zhu, 2021). El código reproducible usado en el estudio se puede consultar en la sección Información suplementaria, así como los repositorios creados al efecto, donde incluimos el código escrito y las direcciones para acceder a los datos fuentes, entre otras utilidades.

Nos centramos en la fuente de datos, que en nuestro caso es el modelo digital de elevaciones (DEM) servido con los productos *Hi-Res Terrain Corrected* de Alaska Satellite Facility (ASF) (ASF DAAC, 2014). Este producto se descarga desde el Centro de Archivo Activo Distribuido del Alaska Satellite Facility o ASF DAAC—una de las instalaciones temáticas de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos, NASA—en forma de escenas o “cuadros” (*tiles*), conteniendo dos imágenes de retrodispersión γ^0 (ca. 70x58 km cada una), una por cada polaridad, y el modelo digital de elevaciones remuestreado con el que ASF realizó la corrección radiométrica de terreno (ca. 80x70 km), objeto de nuestro estudio.

Cabe señalar que en un estudio de Aziz y Rashwan (2022), se evaluó la precisión del DEM comparándolo con otras fuentes de elevación, encontrándose un rendimiento relativamente bajo en varias pruebas. Sin embargo, en el trabajo se utilizó el DEM sin preprocesar, lo cual seguramente afectó el detectado bajo rendimiento. Consideramos que, a pesar de los resultados de su comparativa, la alta resolución del DEM lo convierte en una excelente opción para la extracción de redes de drenaje, siempre que se apliquen filtros apropiados (Ngula Niipele y Chen, 2019). Además, ASF señaló en su documentación (ASF DAAC, 2014; JAXA/METI y ASF DAAC, 2015) que el DEM usado en la RTC no es una fuente confiable de elevación, por lo que el resultado obtenido por Aziz y Rashwan (2022) era más bien el esperado.

Para conformar un mosaico continuo del DEM de República Dominicana, seleccionamos y descargamos más de 40 escenas únicas de ALOS-PALSAR desde el ASF DAAC (JAXA/METI y ASF DAAC, 2015), minimizando la redundancia espacial y eligiendo las versiones más recientes, conservando sólo 28 escenas distintas (Figura 2 y Tabla S1). Despues, extrajimos los DEM correspondientes de los archivos comprimidos y transformamos aquellos proyectos en el huso 18N al 19N del sistema UTM. Posteriormente, creamos un mosaico continuo (“sin costuras”) usando el formato de ráster virtual.

Posteriormente, creamos una base de datos, con su correspondiente localización, en GRASS GIS, nuestro software principal por su eficiencia. Ocasionalmente recurrimos a otras herramientas como WhiteboxTools y QGIS, siempre con el objetivo de optimizar el uso de los recursos de hardware para obtener los resultados necesarios de manera rápida (GRASS Development Team, 2023; Lindsay, 2018; QGIS Development Team, 2021). Complementariamente, generamos una máscara de país en QGIS, fusionando el límite oficial de la Oficina Nacional de Estadística con fuentes en línea como GADM, OCHA y OpenStreetMap, y excluyendo superficies de lagos naturales y embalses para facilitar el análisis de cuencas endorreicas; este paso fue realizado de forma semimanual. Posteriormente, importamos tanto el ráster virtual como la máscara a la base de datos de GRASS GIS (Figura S1). Inmediatamente, aplicamos la máscara a la región activa para enfocar los análisis sólo dentro del área de interés. (GADM, 2022; OCHA, 2022; Oficina Nacional de Estadística (ONE), 2018; OpenStreetMap contributors, 2017; QGIS Development Team, 2021).

Dentro de la base de datos de GRASS, rellenamos los datos nulos del DEM (Figura S2), para luego suavizar el resultado preservando morfologías con la herramienta *FeaturePreservingSmoothing* de WhiteboxTools (Figura S3) (Lindsay, 2018; Lindsay et al., 2019). Tras esto, combinamos el DEM suavizado con el ráster de altura del geoide EGM2008 mediante una simple suma algebraica para obtener alturas pseudo-ortométricas, incrementando previamente la resolución del segundo para acercarla ligeramente a la del primero.

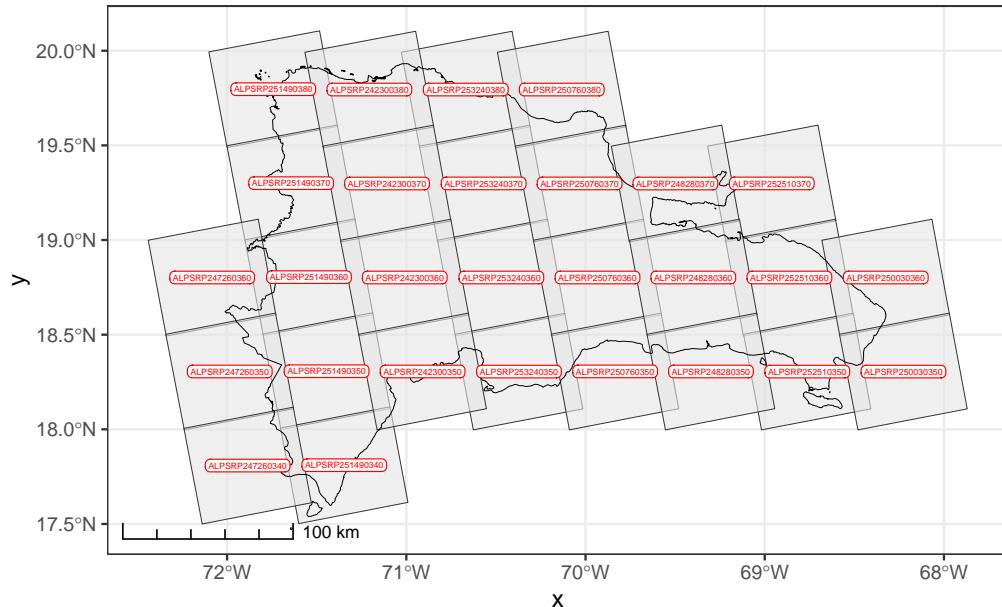


Figura 2: Mapa índice de las 28 escenas usadas en la formación del DEM de República Dominicana, superponiendo las huellas (polígono de área con datos) de las escenas ALOS PALSAR RTC sobre el límite costero e internacional del país

178 A continuación, como último paso del preprocesamiento, tallamos el DEM con una red preexistente de
 179 cursos seleccionados de República Dominicana, un paso clave en la generación de la hidrografía por métodos
 180 computacionales, y que en inglés se conoce como *stream burning* (Lindsay, 2016). Primero creamos la red
 181 a partir de una selección de ríos permanentes, apoyados en imágenes satelitales (Google; Airbus, CNES;
 182 Airbus, Landsat; Copernicus; Maxar Technologies; U.S. Geological Survey, 2023), MTN-50K (Instituto
 183 Cartográfico Militar (ICM), 1989) y OpenStreetMap contributors (2017). Para representar ríos que llenan
 184 embalses, usamos sus trazados históricos para así mantener la continuidad hidrológica (Figura S5). Luego
 185 realizamos el tallado del DEM probando tres algoritmos: `r.carve` y `r.mapcalc` de GRASS GIS, y `FillBurn`
 186 de WhiteboxTools (GRASS Development Team, 2022a; GRASS Development Team, 2022b, 2022c; Larson
 187 et al., 1991; Lindsay, 2018; Petrasova et al., 2011; Saunders, 2000; Shapiro y Westervelt, 1994). Como criterio
 188 de selección establecimos que el mejor algoritmo fuese aquel que lograra una mínima alteración en el DEM,
 189 minimizando a la vez el tiempo de cómputo. `r.carve` produjo un buen DEM tallado, aunque ocupó mucho
 190 tiempo de cómputo, por lo que no la consideramos una herramienta adecuada para iteraciones rápidas. Con
 191 `r.mapcalc` realizamos el tallado mediante una simple álgebra de mapas (normalización, operaciones booleanas,
 192 multiplicación), de donde obtuvimos un DEM poco alterado en tiempo relativamente corto. Finalmente,
 193 probamos con la función `FillBurn` de WhiteboxTools, la cual produjo un DEM tallado sustancialmente
 194 alterado respecto del original, especialmente en las áreas de karst con depresiones. Optamos por continuar
 195 nuestro flujo de procesamiento con el DEM tallado por `r.mapcalc` (ver Figura S6).

196 Finalmente, como último paso del preprocesamiento del DEM, aplicamos algoritmos para superponer
 197 depresiones al modelo, un paso esencial para dirigir la escorrentía y definir de forma coherente los límites
 198 de las cuencas y redes de drenaje. Utilizamos diversas fuentes para generar un conjunto de depresiones.
 199 Principalmente, a partir de la capa de litologías de la República Dominicana (Mollat et al., 2004), identificamos
 200 las calizas con suficiente grado de karstificación. Además, utilizamos el complemento `r.geomorphon` para
 201 crear una capa de depresiones (Jasiewicz y Stepinski, 2013) (Figura S7), y digitalizamos manualmente algunas
 202 depresiones conocidas. Finalmente, intersectamos las tres fuentes de datos para producir una capa exhaustiva
 203 de las depresiones que capturan la escorrentía superficial (Figura S8).

204 2.2. Procesamiento de hidrología computacional

205 El avance en las técnicas de procesamiento de hidrología computacional ha permitido estudios cada vez más
 206 sofisticados de fenómenos hídricos, impulsado por las actualizaciones y herramientas disponibles hoy en día,
 207 entre las cuales destacan las de GRASS GIS (Ehlschlaeger, 1989; Freeman, 1991; Holmgren, 1994; Larson

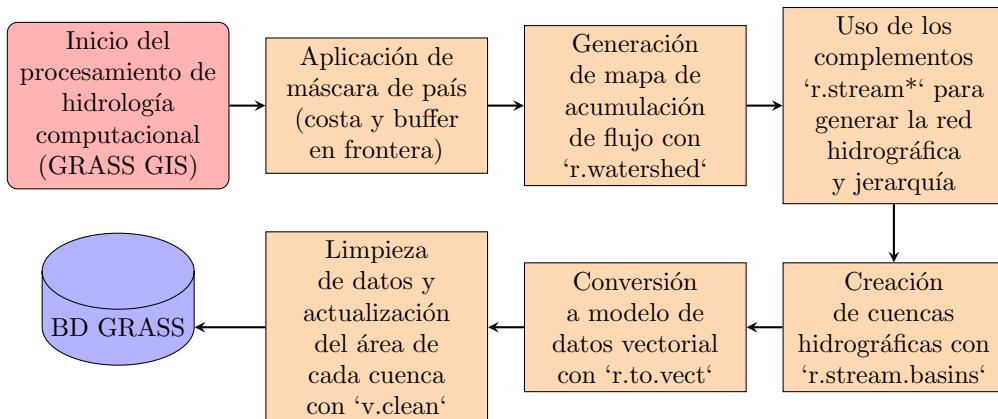


Figura 3: Resumen gráfico del procesamiento de hidrología computacional

208 et al., 1991; McCool et al., 1987; Metz et al., 2011; Moore et al., 1991; Quinn et al., 1991; Weltz et al., 1988).
 209 Por su potencial y múltiples complementos disponibles, todo el procesamiento de hidrología computacional lo
 210 desarrollamos en GRASS GIS (Figura 3).

211 Antes de iniciar el procesamiento de hidrología computacional con GRASS GIS, aplicamos una máscara de
 212 país, delimitada por la línea de costa y a los límites fronterizos, para evitar que las redes se extendieran más
 213 allá de nuestra área de interés. Posteriormente, generamos el mapa de acumulación de flujo con el complemento
 214 **r.watershed** (GRASS Development Team, 2022d) (Figura S9), y utilizamos este mapa como fuente de los
 215 complementos de la familia **r.stream*** para el estudio de redes de drenaje y jerarquía hidrográfica (Jasiewicz
 216 y Metz, 2011). Dentro de esta familia se encuentran **r.stream.extract**, que usa el mapa de acumulación de
 217 flujo generado por **r.watershed** para extraer la red, **r.stream.order** para calcular la jerarquía hidrográfica,
 218 **r.stream.basins** para crear cuencas hidrográficas en función de la referida jerarquía, y **r.stream.stats**
 219 para calcular estadísticos y parámetros del análisis hortoniano. En consecuencia, aplicamos estos algoritmos
 220 al DEM para generar la hidrografía dominicana jerarquizada y la delimitación de las cuencas según órdenes,
 221 proceso que sumarizamos a continuación.

222 Empleando el DEM y el mapa de acumulación creado con **r.watershed**, generamos la red hidrográfica
 223 usando el complemento **r.stream.extract**, enfocándonos en la extracción de cursos indiferenciados, sin
 224 caracterización hidrodinámica, sólo morfológica (Freeman, 1991; Jasiewicz y Metz, 2011; Marchesini et al.,
 225 2021). Basándonos en experiencia de terreno y estudios previos, seleccionamos umbrales de acumulación de
 226 180, 540 y 900 celdas, equivalentes a 3, 8 y 14 hectáreas respectivamente (Freeman, 1991; Marchesini et al.,
 227 2021). Automatizamos la generación de las redes con un bucle **for** en Bash, iterando sobre cada umbral de
 228 acumulación; para cada red generada (Figura S10), actualizamos la base de datos y creamos un resumen con
 229 estadísticas básicas.

230 Para determinar la red hidrográfica óptima de alta densidad de República Dominicana, realizamos una
 231 inspección visual de los tres resultados generados a partir de los umbrales de acumulación elegidos (Figura S11).
 232 Tras evaluar las redes, seleccionamos la obtenida con el umbral de 540 celdas, por ajustarse a nuestros criterios
 233 de selección. Sin embargo, para preservar la reproducibilidad de nuestros resultados y facilitar eventuales
 234 aplicaciones futuras, decidimos conservar todas las redes en la base de datos, incluyendo las originadas a
 235 partir de los umbrales de 180 y 900 celdas. En concreto, la red generada con el umbral 180 celdas, presenta
 236 un buen ajuste con las vaguadas topográficas marcadas en el mapa topográfico, ofreciendo diversas opciones
 237 para futuros estudios o aplicaciones que requieran niveles de resolución más detallados (Figura S12).

238 A continuación, con el complemento **r.stream.order** de GRASS GIS, calculamos la jerarquía de la red
 239 hidrográfica para cada uno de los umbrales de acumulación previamente establecidos (180, 540 y 900 celdas),
 240 utilizando un bucle en Bash para automatizar el proceso. Este análisis permitió obtener la jerarquía de la
 241 red hidrográfica de acuerdo a los métodos de Strahler y Horton, ofreciendo información útil para nuestros
 242 objetivos (Horton, 1945; Strahler, 1957). El resultado obtenido lo usamos como entrada del complemento
 243 **r.stream.stats** para obtener los estadísticos básicos de la red hidrográfica según órdenes, como los promedios
 244 de longitudes y pendientes, la densidad de drenaje y la razón de bifurcación, entre otros.

245 Utilizando el complemento **r.stream.basins** de GRASS GIS, delimitamos las cuencas y subcuencas según
 246 la jerarquía de red para cada uno de los tres umbrales de acumulación. Este proceso permitió la delimitación

247 de unidades que incluyen, de forma indiferenciada, tanto cuencas como subcuencas con redes de drenaje
 248 tributarias. Posteriormente, aplicamos el mismo complemento para delimitar las cuencas que desembocan en el
 249 mar, lagos, lagunas o pérdidas del karst, excluyendo las subcuencas tributarias (e.g. cuencas sin prolongación
 250 de drenaje superficial fuera de ellas).

251 Seleccionamos las cuencas generadas para el umbral de 540 celdas y las convertimos en un modelo de datos
 252 vectorial utilizando el complemento `r.to.vect` de GRASS GIS, eliminando las cuencas de menos de 4000 m².
 253 Este procedimiento incluyó la creación y actualización de una nueva columna `strahler` en la tabla de
 254 atributos de cada capa vectorial para indicar el correspondiente orden de red. Después de procesar y fusionar
 255 todas las cuencas de cada orden en una única capa vectorial con `v.patch`, procedimos a limpiar y preparar
 256 los datos para el análisis. Este paso, que incluyó la corrección de topología, la actualización del área de cada
 257 cuenca con `v.clean`, la eliminación de áreas espurias y artefactos, resultó crítico para garantizar la precisión
 258 de nuestros resultados. A continuación, seleccionamos los datos válidos y los exportamos a un archivo de
 259 texto, lo que nos proporcionó valiosas estadísticas del área para cada cuenca con desembocadura en mares,
 260 lagos o en pérdidas kársticas, según el orden Strahler para nuestro análisis posterior.

261 Finalizamos la etapa de procesamiento hidrológico utilizando los complementos `r.stream.stats` y
 262 `r.accumulate`. Mediante `r.stream.stats`, derivamos estadísticas fundamentales de redes y cuencas clasifica-
 263 das por órdenes de red. Estas incluyeron medidas como los promedios de longitud de los cursos, áreas drenadas,
 264 pendientes, gradientes y diferencias de elevación. Además, determinamos la razón de bifurcación utilizando
 265 dos métodos: coeficientes de regresión y promedios. Por su parte, con `r.accumulate` generamos los cursos
 266 más largos de aquellos ríos con un alto orden de red, asegurando, a su vez, una adecuada representatividad
 267 territorial.

268 3. Resultados

269 La base de datos de cuencas hidrográficas delimitadas y la red de drenaje extraída usando el umbral de
 270 acumulación de 540 celdas (~8 ha), se ajustó bien a nuestros criterios óptimos de selección. El modelo de red
 271 hidrográfica y la delimitación de cuencas demostró coherencia, suficiente detalle y una diversidad sustancial a
 272 lo largo del territorio dominicano, especialmente en las áreas de montaña, proporcionando una representación
 273 hidrográfica precisa sin atenuar patrones de variabilidad. Presentamos a continuación los principales hallazgos,
 274 en forma de resúmenes estadísticos, de las cuencas y sus redes de drenaje.

275 3.1. Cuencas que desembocan en mares, lagos, lagunas o en pérdidas kársticas

276 En el caso de las cuencas que desembocan en mares, lagos, lagunas o en pérdidas kársticas, en total delimitamos
 277 7087 cuencas hidrográficas (Figura 4). Predominan cuencas de gran tamaño y anchura en los valles del Cibao
 278 y de San Juan, así como en la periferia de la plataforma kárstica sudoriental. Por otro lado, las cuencas
 279 medianas y de forma alargada con forma ligeramente ensanchada en cabecera, tienden a concentrarse a lo
 280 largo del borde meridional de la Cordillera Central y en el karst de la plataforma sudoriental. Las cuencas
 281 más pequeñas, en cambio, se distribuyen de manera más uniforme a través de los sistemas kársticos y zonas
 282 costeras. Entre todas las cuencas delimitadas, se alcanzó una jerarquía de red máxima de ocho, condición que
 283 sólo se observó en tres cuencas específicas: Yaque del Sur, Yuna y Ozama.

284 La cuenca más extensa, correspondiente al río Yaque del Norte, cubre una superficie de 6986 km², aunque
 285 sólo alcanzó orden máximo de siete, seguida de las cuencas de los ríos Yuna (4950 km²) y Yaque del Sur
 286 (4674 km²), ambas con orden máximo de ocho (en la sección “Discusión” abordamos la discrepancia entre las
 287 superficies de cuencas obtenidas por nosotros y los tamaños publicados en referencias existentes). El tamaño
 288 promedio de las cuencas es de 7 km² y desviación estándar de 129 km², reflejando la diversidad de las cuencas
 289 hidrográficas presentes en el país.

290 La mitad de las cuencas delimitadas tiene 0.36 km² o menos de superficie, el 25 % de las cuencas más grandes
 291 apenas supera los 0.85 km² y, de hecho, el 5 % más grande sólo alcanza 5.4 km² o más. Por lo tanto, la
 292 distribución de las cuencas por tamaño es asimétrica hacia la derecha (asimetría calculada, 40.2), con un
 293 importante número de cuencas pequeñas y pocas grandes, un patrón bastante común en este tipo de conjunto
 294 de datos.

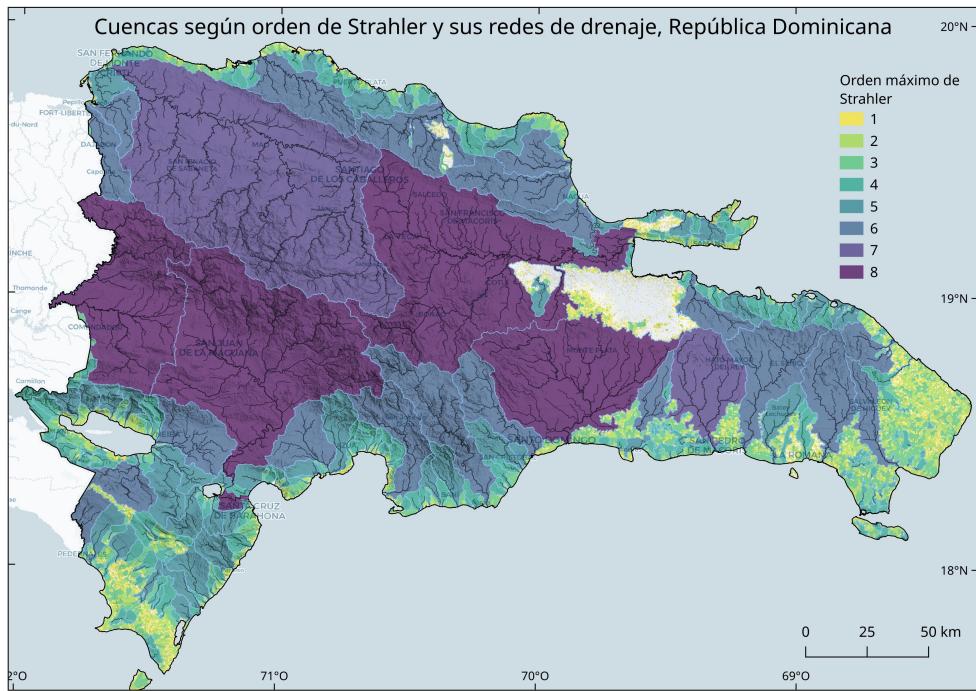


Figura 4: Cuenca que desembocan en mares, lagos, lagunas o en pérdidas kársticas categorizadas según orden de Strahler de República Dominicana, y sus correspondientes redes de drenaje (sólo mostrando los cursos de orden 4 o superior). El umbral de acumulación usado para extraer la red fue de 540 celdas (aprox. 8 ha).

Tabla 1: Orden de red de Strahler y número de cuencas que desembocan en mares, lagos, lagunas o en pérdidas kársticas, para el umbral de acumulación 540 celdas (~ 8 hectáreas)

Orden de red (Strahler)	Número de cuencas	Área total (km ²)	Área promedio (km ²) (error est.)
1	4152	1095	0.2638 (0.002423)
2	2077	1979	0.9526 (0.01493)
3	624	2406	3.856 (0.1192)
4	164	3541	21.59 (1.239)
5	44	4559	103.6 (10.94)
6	20	10130	506.7 (55.31)
7	2	7960	3980 (3006)
8	4	14970	3743 (620)
Total	7087	46640	-

295 Los estadísticos básicos de cuenca sugieren que los resultados obtenidos fueron consistentes, pues observamos
296 el típico decrecimiento exponencial del número de cuencas en relación con el orden de red (ver Figura 5 y
297 Tabla 1). En segundo lugar, destaca un hecho particular reseñable: el número de cuencas de orden siete es
298 menor que el número de cuencas de orden ocho, un hecho que afecta a la cuenca del Yaque del Norte que,
299 con independencia de su gran tamaño, no alcanza la jerarquía máxima.

300 Una caracterización de las cuencas que alcanzan un orden cuatro o mayor resulta también oportuna en este
301 caso, dado que las de orden de red inferior son muy numerosas y, por la naturaleza del DEM empleado, la
302 delimitación de las cuencas pequeñas es más propensa a error. Así, enfocando nuestro análisis sólo en las
303 cuencas de orden cuatro o mayor, encontramos algunos patrones de interés que merecen mención.

304 Contabilizamos 234 cuencas de orden cuatro y mayor, lo que representa un 3.3 % del total nacional. Sin
305 embargo, este pequeño porcentaje representa, en términos de superficie, el 88.3 % del área total de cuencas. En



Figura 5: Número de cuencas que desembocan en mares, lagos, lagunas o en pérdidas kársticas, según órdenes de red de Strahler para el umbral de acumulación 540 celdas (~ 8 hectáreas)

306 este subconjunto encontramos un tamaño mínimo de 2.37 km^2 , promedio de 176 km^2 y desviación estándar
 307 de 129 km^2 . La mitad de las cuencas de orden cuatro y mayor 25.08 km^2 o menos de superficie y, aunque este
 308 subconjunto de cuencas tiene mejor distribución, la asimetría a la derecha persiste (asimetría: 7.3).

309 3.2. Cuencas y subcuencas

310 Extrajimos las cuencas y subcuencas en función de su orden de red y calculamos su extensión superficial. En
 311 este caso, delimitamos las unidades hidrográficas de forma desagregada para aportar insumos al análisis de
 312 posibles patrones de asociación con elementos territoriales y ambientales (Tabla 2 y Figura 6).

Tabla 2: Estadísticos de superficie (en km^2) de cuencas y subcuencas según orden de red de Strahler para el umbral de acumulación 540 celdas (~ 8 hectáreas)

Orden de red	Número	Media (km^2)	Mediana (km^2)	Desv. están- dar (km^2)	Mínimo (km^2)	Máximo (km^2)	Rango (km^2)	Sesgo	Curtosis
1	99918	0.29	0.23	0.21	0.00	3.33	3.33	2.35	9.80
2	22788	1.27	1.01	0.93	0.06	11.13	11.07	2.19	8.03
3	4942	5.73	4.47	4.29	0.58	36.26	35.68	2.10	6.54
4	1049	26.79	21.78	18.73	2.37	132.07	129.69	1.70	3.90
5	222	126.19	105.11	86.52	12.37	514.25	501.88	1.58	3.27
6	51	489.56	402.30	241.66	68.91	1031.78	962.88	0.42	-0.85
7	10	2042.74	1571.14	1815.15	664.63	6985.68	6321.06	2.69	7.78
8	4	3742.74	3678.55	1240.04	2663.91	4949.95	2286.04	0.04	-5.75

313 Debido a la relación exponencial entre el área y el orden de red, existe una diferencia significativa en el
 314 tamaño de las cuencas dependiendo de su orden. Las cuencas de orden 1 son considerablemente más pequeñas,
 315 con un tamaño promedio de menos de 4 km^2 . En contraste, las cuencas de orden 8 son varios órdenes de
 316 magnitud más grandes, abarcando casi 5000 km^2 en promedio. En lo que respecta a su abundancia, el patrón
 317 se invierte. Las cuencas de orden 1 son las más frecuentes, contabilizando cerca de 100,000 en total. Por otro
 318 lado, las cuencas de orden 8 son las menos comunes, con solamente cuatro identificadas en todo el territorio
 319 dominicano. Las cuencas, en todos los órdenes, presentaron una distribución asimétrica de su superficie
 320 calculada, salvo en el caso de las de orden seis, donde se alcanzó buena simetría.

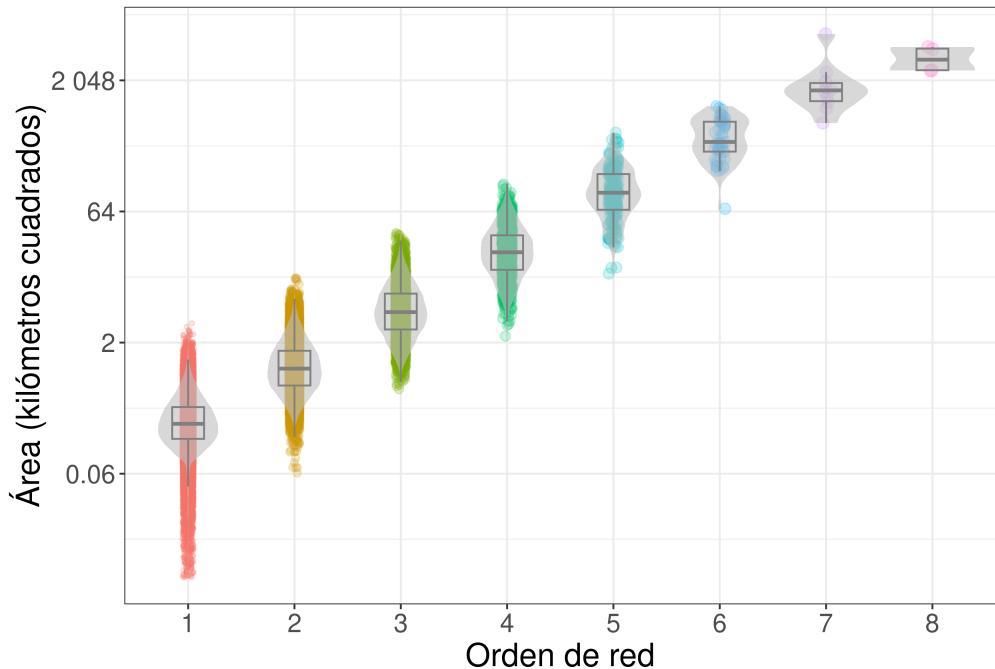


Figura 6: Área de las cuencas y subcuencas según órdenes de red de Strahler para el umbral de acumulación 540 celdas (~8 hectáreas)

- 321 A lo largo de todos los órdenes de red, observamos la presencia de valores atípicos en las superficies calculadas
 322 (Figura 6). En algunos contextos, estos atípicos fueron resultado de errores de cómputo o de delimitación
 323 de cuencas y subcuencas, en cuyo caso, corregimos la base de datos eliminando dichas observaciones. No
 324 obstante, hubo casos en los que ciertas cuencas y subcuencas presentaban dimensiones atípicas genuinas.
 325 Un ejemplo notable es una subcuenca de orden seis, afluente del río Yuna, que se extiende desde el borde
 326 occidental de la península de Samaná. Por otro lado, respecto a la asimetría, detectamos distribuciones con
 327 sesgo hacia la derecha en todos los órdenes (Tabla 2). Sin embargo, el conjunto correspondiente al orden seis
 328 destacó al mostrar una distribución altamente simétrica.
- 329 Representamos la distribución espacial de subcuencas según órdenes y tamaño en el mapa de la Figura 7.
 330 Cada uno de los órdenes obtenidos, del uno al ocho, se encuentra representado en casi todo el territorio
 331 dominicano, especialmente en sus cadenas montañosas. La mayor parte de las unidades delimitadas son
 332 subcuencas, especialmente las de orden jerárquico inferior, cuyas redes de drenaje son tributarias de otras
 333 subcuencas y cuencas de órdenes mayores. Analizamos la distribución de las cuencas y subcuencas delimitadas
 334 según órdenes a continuación.
- 335 Las subcuencas de los órdenes uno, dos y tres forman cúmulos particularmente llamativos en los sistemas
 336 montañosos, y su distribución a menudo refleja la orientación general de las estructuras geológicas. En
 337 particular, las subcuencas que son relativamente grandes en su categoría jerárquica, se reparten de forma
 338 dispersa en la cordillera Central, pero muestran un patrón concentrado en elevaciones altas e intermedias
 339 de las montañas kársticas, incluyendo las sierras de Bahoruco y Neyba, en los afloramientos de calizas de
 340 la cordillera Oriental, así como en determinados sectores de la cordillera Septentrional. En esta última, las
 341 subcuencas grandes de los órdenes uno, dos y tres, se concentran en dos áreas clave: a lo largo del eje principal
 342 de la cordillera y en las laderas que rodean la Loma Isabel de Torres. La concentración de subcuencas grandes
 343 de órdenes pequeños en dichas áreas, pone de relieve la complejidad geológica e hidrológica de esos terrenos
 344 montañosos.
- 345 Las subcuencas de orden cuatro, abarcando tamaños desde pequeñas hasta medianas y grandes, se encuentran
 346 ampliamente distribuidas en toda la República Dominicana. Este grupo presenta características singulares
 347 que detallaremos a continuación. Las grandes destacan generalmente por ser alargadas y por encontrarse
 348 comúnmente orientadas según las estructuras geológicas, mientras que las medianas y pequeñas tienen mayor
 349 razón de circularidad, y suelen repartirse de forma dispersa, rodeando cúmulos de cuencas grandes. De manera

particular, las subcuencas de orden cuatro son especialmente abundantes y grandes en todas las vertientes de la cordillera Central (más escasas al norte), así como en las vertientes meridionales de la cordillera Oriental y de las sierras de Yamasá y Bahoruco. Igualmente, destacan cúmulos de cuencas de orden cuatro de tamaño grande en determinados sectores de la cordillera Septentrional.

En la cordillera Central, las subcuencas grandes de orden cuatro se concentran en torno a su eje principal noroeste-sudeste, especialmente en los alrededores de sus máximas elevaciones (Alto Bandera, picos Duarte y La Pelona), en las vertientes de enlace con los valles altos y medios (e.g. Valle de Bao, Valle Nuevo, Constanza, Jarabacoa), dentro del denominado “Cinturón de Peralta”—según Hernaiz Huerta y Andrés (2002), se trata de un sistema de cabalgamientos imbricado con pliegues, de vergencia hacia el sur, dentro de la denominada cuenca sedimentaria de Azua—, y en el borde sudoriental, concretamente en niveles medios y altos de las cuencas de los ríos Nizao, Haina, Nigua.

En la sierra de Yamasá y en la cordillera Oriental, las subcuencas de orden cuatro, particularmente las grandes, forman cúmulos densos integrados dentro de cuencas de orden superior, como las del Ozama, Maguá, Chavón, Cumayasa y Duey. En la sierra de Bahoruco, las subcuencas de orden cuatro son particularmente grandes en la vertiente sur, en concreto en el subsistema denominado “Bahoruco Occidental”—según Martínez-Battle (2012), se trata de un sistema montañoso de morfologías de superficies corrosivas Fini-Paleógenas y Fini-Pliocenas labradas sobre calizas Cenozoicas, escalonadas desde 2200 m hasta los 100 m—y hacia el enlace con el Hoyo de Pelempito—uno de los más conocidos *poljes* dominicanos. En este caso, se trata de cuencas sin cursos fluviales permanentes, en las que la infiltración logra abrirse paso a través del karst. Finalmente, las cuencas de orden cuatro en la cordillera septentrional, se localizan especialmente en los niveles intermedios y altos de la cuenca del río Bajabonico, así como hacia al norte de las ciudades de Santiago, Salcedo y San Francisco de Macorís. Destaca particularmente la alargada subcuenca de orden cuatro del río Nagua, con casi 130 km², la cual sigue el rumbo predominante—noroeste-sudeste—de la Falla Septentrional.

Las cuencas y subcuencas pertenecientes a los órdenes cinco y seis exhiben patrones de distribución espacial notablemente parecidos entre sí. Varias unidades de estos órdenes son cuencas propiamente, cuyo curso principal desemboca comúnmente en el Mar Caribe, el Océano Atlántico o el Lago Enriquillo. Algunos ejemplos de cuencas de orden seis son las de los ríos Nizao, Haina, Ocoa, Soco, Chavón), y algunas de orden cinco son las de los ríos Nigua, Cumayasa, Nizaíto, Jura, Duey. Asimismo, por su tamaño, destacan algunas subcuencas en la vertiente norte y oriental de la cordillera Central, las cuales encierran redes tributarias de los ríos Yaque del Norte y Yuna. Es importante subrayar que las cuencas medianas y grandes de estos órdenes muestran consistentemente una forma alargada, siguiendo en la mayoría de los casos la orientación de las estructuras geológicas predominantes.

Por último, caracterizamos las unidades hidrográficas delimitadas como de órdenes siete y ocho. Estas muestran una concentración espacial significativa, junto con una amplia variación en términos de tamaño. En el orden siete delimitamos diez unidades, de las cuales sólo las correspondientes a los ríos Yaque del Norte e Higuamo califican propiamente como cuencas, ya que son las únicas que tienen desembocaduras directas al mar. La cuenca del río Yaque del Norte es particularmente importante en República Dominicana, pues es la más grande en términos de superficie, y porque cuenta con múltiples infraestructuras orientadas a la producción de agua potable y de riego, así como a la generación hidroeléctrica. No obstante, es notable el hecho de que esta cuenca, siendo la más grande del país, sólo haya alcanzado el orden siete. También es destacable el hecho de que la cuenca del río Higuamo haya alcanzado este orden.

Finalmente, caracterizamos las unidades hidrográficas identificadas como de órdenes siete y ocho, cuyas particularidades incluyen una notable concentración espacial y una diversidad considerable en sus dimensiones. Dentro del orden siete, distinguimos diez unidades, pero sólo las correspondientes a los ríos Yaque del Norte e Higuamo cumplen con las características completas de cuencas, dada su condición de contener desembocaduras directas al mar. Especial mención merece la cuenca del río Yaque del Norte, por su relevancia en la República Dominicana. Esta se destaca por ser la de mayor superficie en el país, y por albergar múltiples infraestructuras esenciales para la producción de agua potable, riego y generación de energía hidroeléctrica. Sin embargo, es interesante observar que, a pesar de ser la cuenca más extensa del país, su jerarquía sólo alcanza el orden siete, quedando por detrás de otras cuencas que sí alcanzan el orden ocho. Resulta igualmente notable que la cuenca del río Higuamo, con un tamaño mucho menor (un orden de magnitud más pequeña), haya alcanzado este mismo orden.

En cuanto a las cuencas de orden ocho, delimitamos sólo cuatro. En este grupo se incluyen las cuencas del río Yaque del Sur y del Yuna, que son las número segunda y tercera en tamaño para todo el país, respectivamente. Las otras dos cuencas son las del río Artibonito—curso fluvial fronterizo que, al confluir con el Macasías, adquiere el orden ocho—y la del Ozama. La red fluvial del Artibonito podría alcanzar un orden máximo

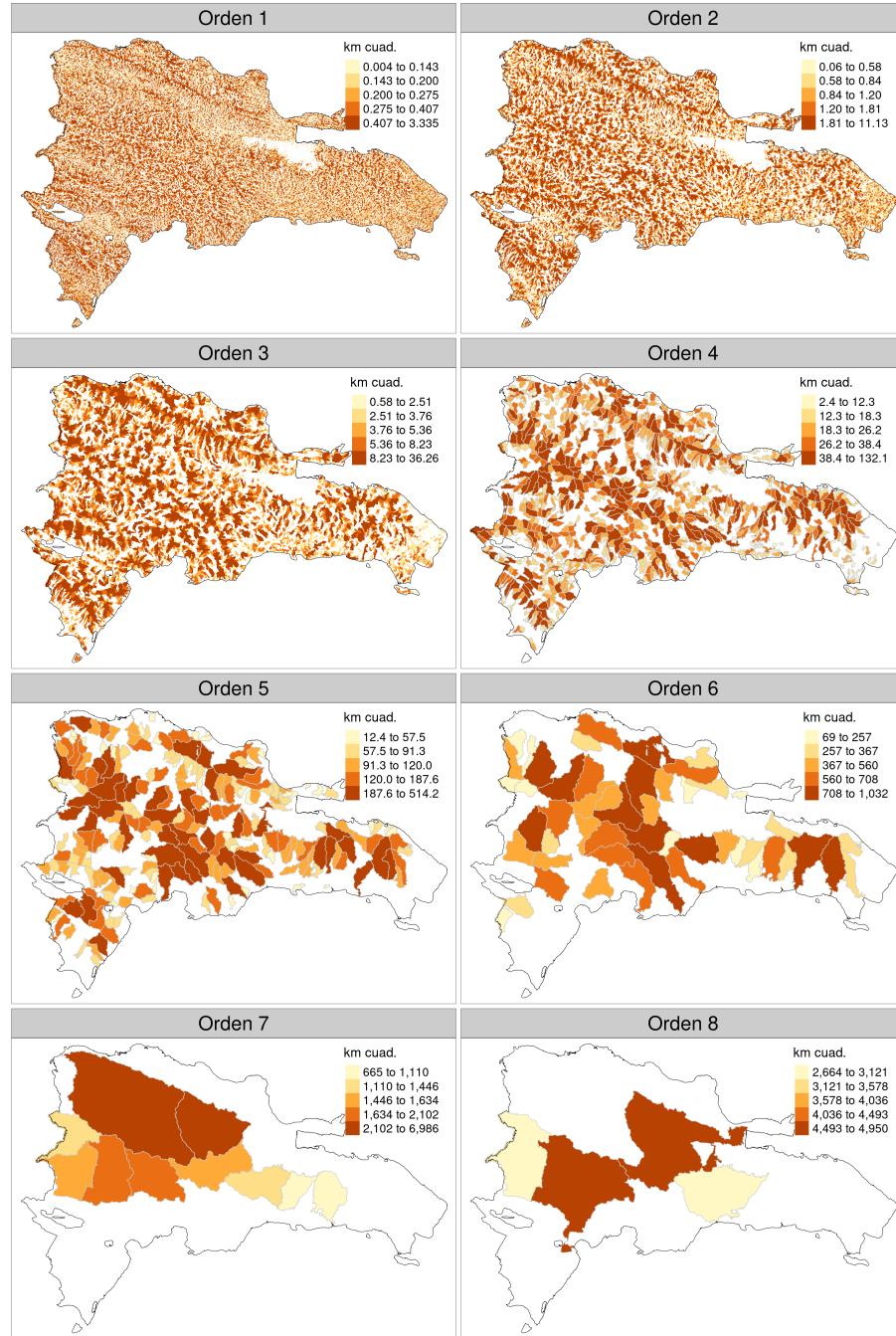


Figura 7: Distribución espacial de las cuencas y subcuenca según superficie calculada y órdenes de red de Strahler para el umbral de acumulación 540 celdas (~8 hectáreas)

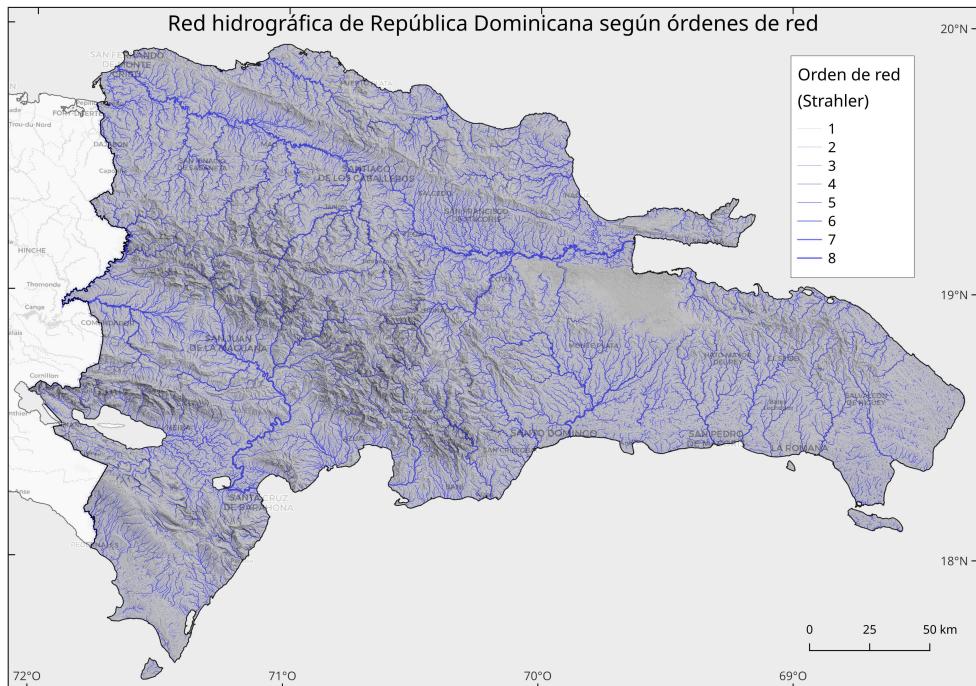


Figura 8: Representación de la red hidrográfica dominicana simbolizando el grosor de los segmentos en función de su orden de red (método de Strahler). El orden máximo alcanzado fue de 8. Esta red fue generada usando un umbral de acumulación de 540 celdas (~ 8 ha)

superior a ocho si se analizara su cuenca completa, como bien comentamos en la sección de Metodología. Destacamos a la cuenca del río Ozama como una singularidad entre las cuencas listadas dentro de este orden jerárquico, pues se trata de una cuenca relativamente pequeña, pero con una red bastante ramificada. Con sus 270 km^2 calculados en este estudio, es la cuenca más pequeña de mayor orden de todo el país.

410 3.3. Red de drenaje

411 La red de drenaje de República Dominicana exhibe una variabilidad notable en sus órdenes jerárquicos, lo que
412 se manifiesta en la heterogeneidad de su distribución espacial y topográfica. Esta complejidad en la jerarquía
413 hidrográfica puede apreciarse en la Figura 8, en la cual se observan distintas densidades de drenaje según
414 territorios, con mayores concentraciones de *talwegs* en la vertiente meridional de la cordillera Central y en la
415 cordillera Septentrional. En los grandes valles, la dirección predominante de los grandes cursos fluviales es
416 noroeste-sudeste y la red complementaria es ortogonal. En la cordillera Oriental y en el enlace hacia el karst
417 de plataforma del sudeste, la dirección predominante es norte-sur. Destaca igualmente la ausencia de drenaje
418 superficial en los sistemas kársticos de Los Haitises, y en sectores de la sierra de Bahoruco y la cordillera
419 Septentrional.

Extrajimos más de 129000 *talwegs*, los cuales alcanzaron una longitud de poco más de 98000 km (Tabla 3). El análisis hortoniano y la caracterización hidrográfica por órdenes de red según el método de Strahler, proporcionaron información valiosa sobre la estructura y organización de los sistemas fluviales dominicanos. El orden jerárquico más alto alcanzado fue ocho, visible en tramos bien extendidos de los ríos Yuna y Yaque del Sur. Asimismo, un tramo bajo del río Ozama justo aguas abajo de su confluencia con el Yabacao, alcanzó el orden este orden máximo, así como en un pequeño segmento del sistema Macasía-Artibonito situado justo en la confluencia de ambos ríos. El río dominicano más largo, el Yaque del Norte, sólo alcanzó el orden jerárquico siete, justo aguas abajo de los ríos Bao, Jagua y Guanajuma, los cuales confluyen en el embalse de Bao. Otro río que alcanzó el orden siete, aunque con un tamaño mucho menor que el Yaque del Norte, fue el Higuamo, justo aguas abajo de la confluencia con uno de sus más importantes tributarios, el río Maguá.

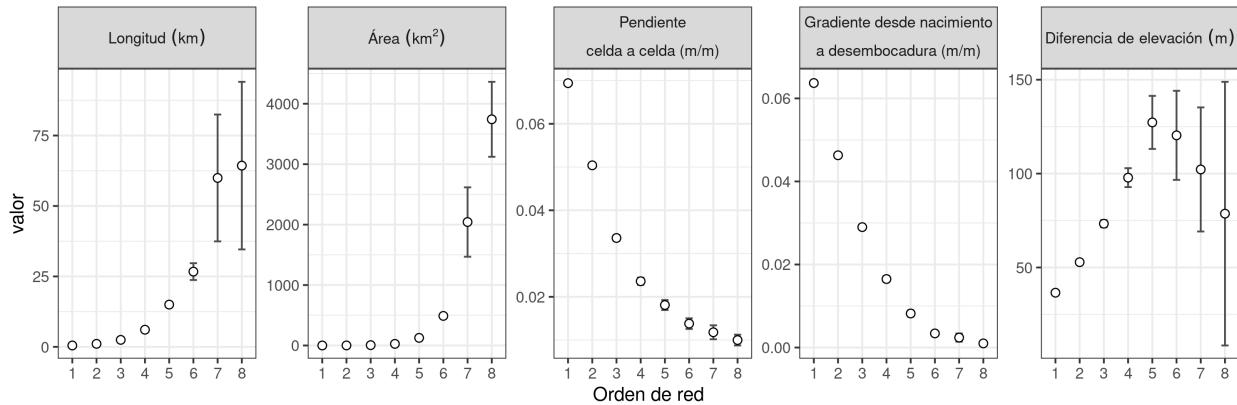


Figura 9: Promedios de longitud de cursos, área de cuenca, pendiente (celda a celda), gradiente (entre extremos) y rango promedio (diferencia de elevación), por tramos, según órdenes de Strahler

Tabla 3: Totales de número de cursos y longitudes de cursos según órdenes de Strahler de la red generada

Orden de red	Número de cursos	Longitud total (km)
1	100126	49627.78
2	22790	24469.96
3	4942	12267.06
4	1049	6381.46
5	222	3329.86
6	51	1362.22
7	10	599.50
8	4	257.31
Total	129194	98295.14

430 Los cursos de órdenes pequeños—e.g., del uno al cuatro—suman un total de 128907 cursos, casi la totalidad
 431 de todos los cursos (en número), mientras que en longitud suponen 92746 km (94 %). Estos cursos de órdenes
 432 pequeños, especialmente los de los órdenes uno y dos, se concentran en áreas de montaña, especialmente en
 433 sectores de cabecera, cuencas vertiente y áreas de captación, siendo escasos en las grandes llanuras y valles
 434 bajos. Son especialmente densos en redes de drenaje del sudoeste, especialmente en el área del denominado
 435 “Cinturón de Peralta”, así como en las vertientes altas de la cordillera Septentrional.

436 Numerosos ríos dominicanos alcanzaron órdenes de cinco y seis, concentrados especialmente los valles
 437 intramontanos y en los piedemontes de los sistemas montañosos dominicanos, justo en el enlace con los
 438 grandes valles bajos. Destacan especialmente los tramos de ríos situados en los piedemontes septentrional
 439 y meridional de la cordillera Central, justo en los enlaces con los valles del Cibao (afluentes del Yaque del
 440 Norte) y de San Juan (tributarios del Yaque del Sur). También son comunes los cursos de órdenes cinco y
 441 seis en el borde meridional de la cordillera Central, específicamente en el sector que enlaza con el Mar Caribe,
 442 entre los que destacan los ríos Nizao, Ocoa, Haina, Nigua, Jura y Tábara. Asimismo, varios ríos que nacen en
 443 la cordillera Oriental, y que desembocan en el Mar Caribe, pertenecen a los órdenes cinco y seis, entre los
 444 que merecen mención los ríos Yuma, Chavón, Cumayasa y Soco. También en este sector se encuentra el río
 445 Brujuelas, de orden máximo seis, el cual se pierde, a través de un conjunto de *ponors*, dentro del karst de
 446 plataforma del sudeste dominicano. Por otra parte, varios sistemas fluviales de la cordillera Septentrional
 447 alcanzaron el orden seis, como son el Boba, Bacúi, Yásica y Bajabonico. Finalmente, algunos ríos o cursos
 448 temporales que desembocan en el Lago Enriquillo son de orden seis, como el Panzo y Las Damas.

449 También analizamos la morfometría de la red hidrográfica en función del orden de red (Tabla 4). Específicamente,
 450 evaluamos los promedios de las siguientes cinco variables por tramos de cursos fluviales: longitud
 451 (km), área de cuenca (km²), pendiente (celda a celda, m/m), gradiente (desde nacimiento a desembocadura,
 452 m/m) y diferencia de elevación (m). Los valores de cada variable incluyen una estimación del error estándar
 453 como medida de dispersión (ver Figura 9 y Tabla 4).

Tabla 4: Promedios y errores estándar (entre paréntesis) de longitud, área de cuenca, pendiente (celda a celda), gradiente (entre extremos) y rango promedio (diferencia de elevación), por tramos, según órdenes de Strahler.

Orden de red	Longitud (km)	Área (km^2)	Pendiente (m/m)	Gradiente (m/m)	Diferencia de elevación (m)
1	0.5 (0.001)	0.29 (7e-04)	0.069 (3e-04)	0.064 (3e-04)	37 (0.2)
2	1.1 (0.007)	1.3 (0.006)	0.05 (5e-04)	0.046 (5e-04)	53 (0.7)
3	2.5 (0.03)	5.7 (0.06)	0.034 (7e-04)	0.029 (6e-04)	73 (2)
4	6.1 (0.2)	27 (0.6)	0.024 (8e-04)	0.016 (7e-04)	98 (5)
5	15 (0.9)	130 (6)	0.018 (0.001)	0.0082 (8e-04)	130 (10)
6	27 (3)	490 (30)	0.014 (0.001)	0.0034 (5e-04)	120 (20)
7	60 (20)	2000 (600)	0.012 (0.002)	0.0024 (0.001)	100 (30)
8	64 (30)	3700 (600)	0.01 (0.001)	0.001 (5e-04)	79 (70)

454 El patrón observado en los promedios de longitud y área drenada sigue una relación exponencial directa con el
 455 orden de la red (Figura 9). Además, la variabilidad de estas métricas se intensifica en los órdenes de red más
 456 altos, siendo especialmente notable en los órdenes siete y ocho. Para los órdenes de red del uno al cuatro, las
 457 longitudes promedio fluctúan entre 0.5 y 6.1 km, mientras que las áreas promedio oscilan entre 0.29 y 27 km^2 ,
 458 promedios muy bajos en comparación con los correspondientes a los órdenes de red más altos. Notamos que se
 459 produce una inflexión notable en los promedios de los órdenes cinco y seis, antes de alcanzarse las longitudes
 460 y superficies promedio máximas en los órdenes siete y ocho. En particular, las longitudes rondan los 60 km,
 461 mientras que las áreas se sitúan entre 2043 y 3743 km^2 para estos órdenes de red.

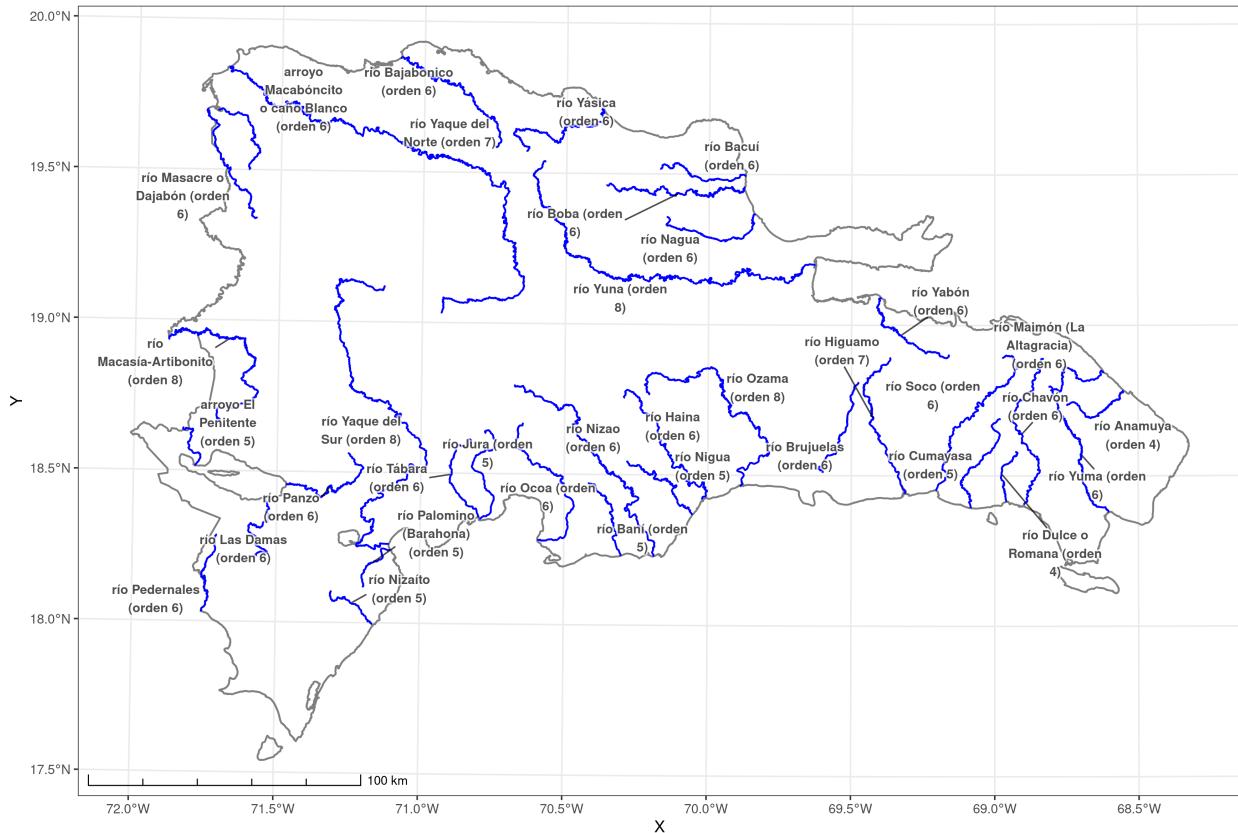


Tabla 5: Longitud del curso más largo, y orden máximo, de 35 ríos seleccionados de República Dominicana, ordenados de mayor a menor longitud

Rango	Nombre	Longitud (km)	Orden máximo
1	río Yaque del Norte	334.30	7
2	río Yuna	272.00	8
3	río Yaque del Sur	251.50	8
4	río Nizao	150.60	6
5	río Ozama	148.70	8
6	río Macasía-Artibonito	128.10	8
7	río Boba	103.80	6
8	río Soco	94.38	6
9	río Bajabonico	92.16	6
10	río Yásica	88.50	6
11	río Haina	87.74	6
12	río Chavón	86.63	6
13	río Higuamo	83.98	7
14	río Ocoa	83.35	6
15	río Yuma	81.45	6
16	río Masacre o Dajabón	71.49	6
17	río Panzo	66.02	6
18	río Yabón	61.79	6
19	río Nagua	56.35	6
20	río Cumayasa	55.55	5
21	río Nigua	55.11	5
22	río Jura	54.06	5
23	río Bacúi	51.50	6
24	río Brujuelas	50.99	6
25	arroyo Macabónrico o caño Blanco	48.78	6
26	río Las Damas	48.41	6
27	río Tábara	46.21	6
28	río Pedernales	44.08	6
29	río Baní	43.26	5
30	río Maimón (La Altagracia)	42.15	6
31	río Anamuya	41.45	4
32	río Nizaíto	29.57	5
33	río Dulce o Romana	27.66	4
34	arroyo El Penitente	26.77	5
35	río Palomino (Barahona)	25.56	5

462 Por otro lado, tanto la pendiente promedio (celda a celda) como el gradiente promedio (cabecera a desembocadura) muestran una disminución a medida que aumenta el orden de red, siguiendo una típica relación
 463 inversa exponencial (Figura 9). Aunque se trata de valores generalmente pequeños, pues se trata de métricas
 464 tomadas por tramos o celda a celda, el rango de variación es sustancial. La pendiente promedio para el primer
 465 orden es de 0.069 m/m , disminuyendo hasta 0.01 m/m en el octavo orden. En forma similar, el gradiente
 466 promedio disminuye desde 0.064 m/m en el primer orden a 0.001 m/m en el octavo orden.

467
 468 El último promedio analizado fue la diferencia de elevación. Esta variable presenta un patrón distinto al de
 469 las anteriores, pues incrementa su valor promedio desde el orden uno al cinco y, a partir de este orden, se
 470 produce una inflexión y desciende hasta alcanzar el orden ocho, aumentando al mismo tiempo su dispersión.
 471 En el orden uno, el promedio de la diferencia de elevación fue de 37 m, alcanza un promedio más alto de
 472 127 m en el quinto orden de red, manteniéndose igualmente alto en el seis (120 m). A partir de este orden, se
 473 produce un descenso de los promedios, conjuntamente con un aumento de la dispersión, hasta alcanzarse el
 474 valor de 79 m en el orden ocho.

475 También analizamos en detalle los cursos más largos de 35 ríos redes de drenaje seleccionadas de República
 476 Dominicana. La selección de este subconjunto la apoyamos en dos criterios: orden de red y representatividad
 477 territorial. De manera preferente, incluimos cursos fluviales de orden seis o superior. En áreas del sur y
 478 sudoeste del país donde este orden no fue alcanzado, elegimos algunos ríos de orden cinco de gran longitud.
 479 Este enfoque nos permitió obtener información valiosa sobre los rasgos básicos de longitud y orden de red de
 480 los ríos más largos y emblemáticos del país. Asimismo, al garantizar la representatividad territorial, logramos
 481 abarcar cada una de las regiones del país.

482 La Figura 10 muestra el trazado de los cursos más largos de ríos seleccionados. Los más grandes y de mayor
 483 jerarquía, de orden seis a ocho, se dividen en dos subgrupos distintos. El primer subgrupo incluye cursos que
 484 siguen direcciones predominantes, como los ubicados en el borde sudoriental de la cordillera Central (Haina,
 485 Nizao, Nigua), aquellos que discurren por la vertiente meridional de la cordillera Oriental (Higuamo, Soco,
 486 Chavón), y los localizados al este de la cordillera Septentrional (Boba, Bacuí). El segundo subgrupo está
 487 compuesto por cursos con trazados tortuosos, destacando especialmente los ríos Ozama y Macasía-Artibonito,
 488 que alcanzaron un orden de red elevado y presentan longitudes notables.

489 La Tabla 5 presenta los ríos seleccionados en función de la longitud de su curso, ordenados de mayor a menor.
 490 El río Yaque del Norte destaca con una longitud de 334 km y un orden máximo de siete. Este río nace en
 491 el pico del Yaque en la cordillera Central y desemboca en la bahía de Montecristi. Siguiendo en longitud,
 492 tenemos al río Yuna con 272 km y un orden máximo de ocho, con curso más largo extendiéndose por la
 493 cordillera Septentrional a través del río Licey, tributario del río Camú. Notablemente, los ríos Yaque del Sur,
 494 Macasía-Artibonito y Ozama tienen cursos más largos de 252, 128 y 149 km, respectivamente. Todos, incluido
 495 el Yuna, han alcanzado un orden máximo de ocho, subrayando su relevancia en la red de drenaje a nivel
 496 nacional. El Macasía-Artibonito es singular por lograr el orden máximo siendo el sexto en longitud, mientras
 497 que el Nizao, siendo el cuarto más largo con 151 km, alcanza solo el orden seis.

498 El resto de ríos en la tabla poseen cursos más largos de 100 km o menos, y un orden de seis o inferior. Se
 499 dividen en dos categorías: entre 40 y 100 km, y aquellos de 40 km o menos. El primer grupo, de 40 a 100 km,
 500 incluye 20 ríos, principalmente de orden seis, situados en las cordilleras Oriental y Central que desembocan
 501 en el mar Caribe, así como en la cordillera Septentrional que fluyen hacia el océano Atlántico. Estos sistemas
 502 fluviales a menudo tienen cuencas extensas, y muchos se originan o atraviesan regiones kársticas. Un caso
 503 destacado es el río Higuamo, que, a pesar de ser el 13° en longitud, tiene un orden de siete. El segundo grupo,
 504 de menos de 40 km, comprende principalmente ríos de los órdenes cinco y cuatro, ubicados en el sudoeste del
 505 país y en zonas kársticas orientales.

506 Finalmente, determinamos la razón de bifurcación y la densidad de la red de drenaje, tanto a nivel global
 507 como diferenciado por órdenes de red (ver Tabla 6). A escala global, la densidad de drenaje se estableció
 508 en 2.11 km/km². Por otro lado, al calcular la razón de bifurcación, obtuvimos dos métricas distintas: 4.34
 509 utilizando promedios, y 4.42 por medio de coeficientes de regresión. Descomponiendo estos indicadores por
 510 órdenes de red, se identifica un comportamiento distintivo en la densidad de drenaje: presenta un pico en
 511 los órdenes iniciales, con 1.7 km/km² en el primer orden, y exhibe un descenso progresivo hasta alcanzar
 512 0.0172 km/km² en el octavo orden. De manera similar, la razón de bifurcación refleja la esperada disminución
 513 a medida que avanzamos en el orden, comenzando con 4.39 en el primer orden y finalizando en 2.5 para el
 514 séptimo orden.

Tabla 6: Razones o cocientes de la red de drenaje

Orden de red	Razón de bifurcación	Densidad de drenaje (km/km ²)
1	4.39	1.70
2	4.61	0.84
3	4.71	0.43
4	4.73	0.23
5	4.35	0.12
6	5.10	0.05
7	2.50	0.03
8	0.00	0.02

515 **4. Discusión**

516 Elaboramos una representación detallada de cuencas hidrográficas y redes de drenaje de República Dominicana,
 517 a partir del DEM proporcionado con los productos ALOS PALSAR RTC. Con la aplicación de técnicas
 518 avanzadas de hidrología computacional y análisis hortoniano (GRASS Development Team, 2023; Horton, 1945;
 519 Jasiewicz y Metz, 2011; Strahler, 1957), no sólo logramos mejorar la delimitación de cuencas y la extracción
 520 de redes, sino que también caracterizamos los patrones fundamentales de la hidrografía dominicana mediante
 521 estadísticos propios de la hidrología computacional. Este avance es particularmente significativo en las áreas
 522 montañosas, donde las fuentes existentes mostraban una red fragmentada o incompleta (INDRHI, 2012;
 523 Instituto Cartográfico Militar (ICM), 1989; OpenStreetMap contributors, 2017; Secretaría de Estado de Medio
 524 Ambiente y Recursos Naturales, 2004). Paralelamente, trabajamos en la optimización del DEM, enfocándonos
 525 en el tallado de la red en áreas llanas, reduciendo el ruido y manteniendo los elementos morfológicos clave para
 526 garantizar una precisión hidrológica óptima. Como parte de nuestro apego a la transparencia y accesibilidad
 527 en la investigación, publicamos la base de datos generada en repositorio disponible al público, sistematizamos
 528 un protocolo completamente reproducible y desarrollamos una base de código abierto, posicionándola como
 529 una herramienta esencial para futuros estudios en hidrología computacional.

530 La hidrología computacional y el análisis hortoniano de la hidrografía dominicana, han tenido históricamente
 531 poco alcance debido a la limitada disponibilidad de datos detallados y precisos. Previo a nuestro trabajo,
 532 las fuentes más relevantes para estudios en la región se centraban primordialmente en modelos digitales
 533 de elevación de resolución baja (Jarvis et al., 2008; NASA JPL, 2013; NASA LP DAAC, 2000; National
 534 Aeronautics and Space Administration y United States Geological Survey, 2009), o en la cartografía topográfica
 535 base e investigaciones locales (CIDIAT y INDRHI, 1992; INDRHI, 2012; Instituto Cartográfico Militar (ICM),
 536 1989; Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2004; SERCITEC y INDRHI, 2002).
 537 Estas publicaciones, aunque fundamentales, carecían del nivel de detalle y la sistematización necesaria para
 538 avanzar en la hidrología computacional y el análisis hortoniano.

539 En este contexto de fuentes escasas, Martínez-Batlle (2019b) explora la reorganización del drenaje en una
 540 subcuenca del río Ocoa durante el Pleistoceno superior. A pesar de la relevancia de dicho trabajo, su
 541 aplicabilidad a escala nacional, o incluso local, es limitada. En contraposición, nuestro trabajo contribuye
 542 a llenar este vacío, al ofrecer una perspectiva detallada y amplia, primordial para efectuar análisis tan
 543 profundos como el referido, pero a escala nacional. De esta manera, allanamos el camino para investigaciones
 544 subsecuentes en el dominio de la hidrología computacional.

545 La configuración y densidad de la red de drenaje generada por nosotros, resalta claramente la influencia de la
 546 fisiografía y la diversidad litológica de República Dominicana. La densidad de drenaje no es aleatoria; está
 547 determinada por factores específicos como la permeabilidad de las rocas y el suelo, la cantidad de precipitación,
 548 el tamaño de la cuenca y sus características topográficas (Culler et al., 1961). En áreas caracterizadas por
 549 rocas impermeables, como margas y esquistos, así como otras que al intemperizarse producen suelos de textura
 550 fina, es típico encontrar densidades de drenaje y razones de bifurcación elevadas (Anderson y Anderson, 2010;
 551 Horton, 1932; Horton, 1945; Strahler, 1957). Dichas condiciones son prevalentes en regiones como el borde
 552 meridional de la cordillera Central, la cordillera Septentrional, la cordillera Oriental y la sierra de Yamasá
 553 (Mollat et al., 2004; Pérez Estaún et al., 2007), lo cual explica la jerarquía alcanzada por ríos como el Yaque
 554 del Sur, Macasía-Artibonito, Ozama, Yuna e Higuamo. Por otra parte, no podemos precisar si los valores
 555 elevados de densidad de drenaje en subcuencas del río Yaque del Sur ubicadas sobre margas y fangos, están
 556 asociados, conjuntamente con la litología, a las mayores intensidades de precipitación comúnmente observadas
 557 en esta zona del país, lo cual constituye una pregunta abierta que requerirá futura investigación.

558 Nuestra red refleja la harmonización con los elementos morfoestructurales del país, un sistema alternante
 559 de cordilleras y amplios valles fluviales, dispuestos predominantemente en dirección noroeste-sudeste. Esta
 560 disposición, moldeada por procesos geotectónicos históricos y contemporáneos, guía la orientación de ríos
 561 prominentes como el Yuna-Camú, Yaque del Norte y Yaque del Sur.

562 Asimismo, es innegable el impacto de los sistemas kársticos en la organización de la red de drenaje. En este
 563 contexto, el karst de Los Haitises es el más destacado, influyendo significativamente en la estructuración de la
 564 red hidrográfica. Su característica de sumidero, vinculada a la repetición monótona de dolinas con ponors
 565 que dirigen flujos de agua hacia el endokarst, marca la ausencia de escorrentía superficial jerarquizada entre
 566 la sierra de Yamasá y la cordillera Oriental. Se observan influencias análogas, aunque de menor extensión,
 567 en áreas del karst de plataforma de la llanura sudoriental, en la cordillera Septentrional y en las sierras de
 568 Bahoruco y Neyba.

569 La Española es una isla originada a partir de una colisión derivada de la convergencia oblicua entre la
 570 Placa Norteamericana y el arco-isla Cretácico caribeño (Pérez Estaún et al., 2007). Esto significa que se
 571 trata de un país con un activo pasado geológico, donde los procesos de reorganización del drenaje, resultado
 572 de la interacción entre litología, tectónica y clima a lo largo del tiempo, han debido ser frecuentes. En
 573 general, los ríos con trazado tortuoso, caracterizados por largos rodeos entre su origen y desembocadura, a
 574 menudo son indicativos de una reorganización del drenaje, como por ejemplo, captura fluvial (Bishop, 1995).
 575 Biogeográficamente, tales reorganizaciones tienen consecuencias significativas, por lo que constituyen una
 576 línea de investigación muy activa en varios sistemas fluviales del mundo (Barreto et al., 2022; Musher et al.,
 577 2022). Nuestro análisis mostró varios casos de ríos cuyo curso más largo sigue un trazado de amplio rodeo,
 578 con giros bruscos en distintos puntos de sus respectivos recorridos, como por ejemplo los ríos Yaque del
 579 Norte, Yaque del Sur y Ozama. Contrariamente, los ríos con trazados rectilíneos podrían representar una
 580 fase evolutiva más reciente de la isla, tal como ocurre en los ríos Nizao, Haina e Higuamo. Estos patrones,
 581 en su conjunto, proporcionan una comprensión profunda de cómo los procesos geomorfológicos, tectónicos,
 582 climáticos y biológicos interactúan, modelando tanto el paisaje como la biodiversidad dominicanas.

583 Nosotros pudimos comprobar la relación exponencial entre el orden de red y distintas variables morfométricas
 584 de la estadística hortoniana, como la razón de bifurcación, el área de cuencas y las longitudes de cursos, entre
 585 otros (Horton, 1945). En cuanto a la razón de bifurcación, esta sigue la regla del número de cursos o corrientes,
 586 que expresa la relación existente entre el número de cursos de un orden dado y el orden del curso en términos
 587 de una serie geométrica inversa. Los valores de razón de bifurcación de ámbito nacional obtenidos por nosotros
 588 ($R_b > 4.5$), tanto mediante regresión como por promedios, superan el valor comúnmente observado en este
 589 tipo de estudios ($3.5 < R_b < 4$). Este resultado lo asociamos con el umbral de acumulación elegido por
 590 nosotros para crear la red, de 8 ha, dado que se espera que a menor umbral de acumulación, mayor razón de
 591 bifurcación. No obstante, dado que los estudios realizados en el siglo pasado se basaban en extracciones de la
 592 red a partir de mapas topográficos de escala 1:50,000, es esperable que nuestra red, al ser más densa, alcance
 593 razones mayores.

594 Un aspecto destacable de nuestros resultados es la observación de que los cursos o corrientes de órdenes 5 y 6
 595 presentan, en promedio, diferencias de elevación superiores en comparación con los otros órdenes jerárquicos
 596 (1 a 4, y 7 a 8). Esta característica singular podría tener su origen en la posición geomorfológica donde ocurren
 597 estos cursos, preferentemente en zonas de transición, específicamente en enlaces con piedemontes. Estas áreas
 598 suelen mostrar rasgos morfológicos donde el drenaje experimenta una expansión vertical acusada, es decir, un
 599 cambio de elevación del terreno de manera abrupta, sin que ello esté asociado con un incremento en el orden
 600 de la red. Esta situación indica que en estas zonas, las dinámicas geomorfológicas podrían estar favoreciendo
 601 un relieve más pronunciado, sin necesariamente acompañarse de una mayor complejidad en la estructura de
 602 drenaje. Nuestra interpretación resalta la importancia de considerar no solo la jerarquía fluvial, sino también
 603 la geomorfología local, al evaluar las características morfodinámicas de una cuenca.

604 Nuestros resultados presentan limitaciones, inherentes a todo estudio, que es preciso abordar en esta sección. En
 605 primer lugar, la precisión posicional de la red varía significativamente dependiendo de la geomorfología. Si bien
 606 es alta en sistemas montañosos no kársticos, se modera en terrenos kársticos y disminuye en grandes llanuras
 607 y zonas de desembocadura. Específicamente, en los relieves kársticos, enfrentamos una alta incertidumbre
 608 dada la carencia de un catálogo exhaustivo de depresiones con drenaje endorreico, como las dolinas con
 609 ponors activos, lo cual es esencial para definir la topología y jerarquización de la red en dichos morfositemas.
 610 Explicamos que, ante esta limitación, desarrollamos un inventario propio de depresiones basado en el propio
 611 DEM, el cual consideramos suficiente para nuestros fines, pero limitado para aplicaciones más amplias sobre
 612 infiltración en el karst. También es pertinente añadir que en zonas urbanas, áreas llanas, terrenos con sistemas
 613 de riego y áreas de desembocadura (por ejemplo, en los ríos Yaque del Sur y Yuna), la precisión de nuestra
 614 red puede verse muy comprometida. Sin embargo, dado que nuestro objetivo se centra en la generación
 615 sistemática de la hidrografía densa, con énfasis en las áreas de montaña, el error posicional inherente no
 616 menoscaba la relevancia de nuestros resultados.

617 En lo concerniente a las cuencas y redes de drenaje transfronterizas, cabe señalar que las extraídas por
 618 nosotros se basan exclusivamente en datos del territorio dominicano. Esto significa que el orden de red máximo
 619 reportado para estas redes podría no ser representativo de su orden verdadero. A pesar de esta restricción,
 620 nuestro análisis visual preliminar sugiere que no compromete el objetivo central de nuestro estudio. Es una
 621 línea que, en futuras investigaciones, será abordada de forma integral, ofreciendo una visión más acabada de
 622 su morfometría.

623 Por último, en cuanto a las limitaciones esbozadas, para nosotros es importante aclarar el alcance de nuestra
 624 singular propuesta nuestra investigación. A diferencia de los enfoques convencionales que se articulan en

625 torno a preguntas e hipótesis, el nuestro se centra en la generación y exposición de datos, así como en la
 626 producción de código reproducible. Dado el énfasis en la construcción de la red hidrográfica y la metodología
 627 rigurosa empleada, entendemos este trabajo como un aporte esencialmente de carácter metodológico y para
 628 la producción de datos, llenando un hueco en la bibliografía y generando una base de datos y de código para
 629 futuros estudios sobre la hidrografía dominicana y de otros territorios.

630 A partir de los resultados obtenidos y las observaciones registradas en el presente estudio, es posible identificar
 631 diversas vías de investigación futura que podrían enriquecer la caracterización de los sistemas hídricos
 632 dominicanos realizada en el presente estudio. Nuestra primera consideración se centra la precisión del modelo
 633 de elevación utilizado. Entendemos que es crucial realizar una evaluación detallada de la precisión para
 634 cuantificar el error posicional de la red hidrográfica derivada, lo cual podría contribuir a potenciar la robustez
 635 de resultados futuros. Una de propuesta de investigación relacionada, consiste en colectar puntos mediante
 636 receptores GNSS en el terreno y realizar, por distintos métodos, una revisión de precisión y rectificación del
 637 modelo. Dado que las áreas llanas presentan mayores retos, sería beneficioso refinar la hidrografía de estas
 638 zonas a medida que se mejoren la precisión del modelo.

639 Por otra parte, los hallazgos del presente estudio pueden allanar el camino para investigaciones que se
 640 adentren en fenómenos de reorganización de drenaje, incorporando métricas más sofisticadas. Para una mejor
 641 comprensión de los fenómenos geomorfológicos, sería oportuno explorar el índice de concavidad, la hipsometría,
 642 el índice χ y las métricas de Gilbert, tal como se ha realizado para distintas regiones en años recientes (Dal
 643 Pai et al., 2023; Forte y Whipple, 2018; Harkins et al., 2007; Maneerat y Bürgmann, 2022; Pereira de Oliveira
 644 et al., 2023). Al mismo tiempo, un enfoque individualizado en las cuencas, particularmente de aquellas de
 645 orden cuatro o superior, podría proporcionar analíticas específicas sobre la dinámica y características de
 646 dicho subconjunto.

647 Además, la morfometría de redes y cuencas debería recibir una atención especial en futuros estudios. Este
 648 enfoque permitiría un entendimiento más profundo de las propiedades y el comportamiento de la red fluvial y
 649 de las cuencas en general. Paralelamente, sería provechoso realizar análisis hortonianos más exhaustivos, que
 650 aborden la estructura, jerarquía y distribución espacial de las redes de drenaje según rasgos comunes que
 651 ayuden a clasificar mejor la hidrografía dominicana.

652 Por último, resulta esencial estudiar la relación y patrones de asociación entre diferentes variables de las
 653 cuencas (e.g. densidad de drenaje), y a su vez confrontarlas con características del medio físico como la
 654 elevación, pendiente, litología, geomorfología y, particularmente, con el clima. Una dirección prometedora en
 655 la investigación podría explorar si las densidades de drenaje más altas en las cuencas del borde meridional
 656 de la cordillera Central, como en el Cinturón de Peralta, están vinculadas tanto a la litología como al
 657 clima. Herramientas como **r.basin** (de GRASS GIS) podrían facilitar este proceso, revelando interacciones y
 658 correlaciones hasta ahora no identificadas.

659 Finalmente, sobre la relevancia de nuestro estudio, los resultados obtenidos representan un hito en la
 660 investigación hidrológica de la República Dominicana, siendo la primera vez que se aborda la hidrología
 661 computacional a nivel nacional de manera coherente y sistemática. Con la caracterización realizada, hemos
 662 generado una red hidrográfica densa que sirve como base apropiada para realizar comparaciones sistemáticas,
 663 así como numerosos estudios y aplicaciones prácticas.

664 Nuestros resultados tienen potencial para aplicaciones en diversos ámbitos, desde el diseño de estrategias
 665 de conservación de cuencas y la modelización hidrológica en zonas altas y medias, hasta la contribución en
 666 estudios de riesgos y en el diseño de redes hidrométricas. Además, la red generada proporciona una base
 667 idónea para futuras investigaciones sobre la biodiversidad y su conservación, facilitando el diseño de muestreos
 668 de flora y fauna acuática en sistemas fluviales de montaña media y alta.

669 Por otro lado, por nuestro compromiso con la transparencia y la educación, hemos generado una base de
 670 código informático conjuntamente con el protocolo seguido, que no sólo garantizan la replicabilidad del
 671 estudio sino que también se ofrece un valioso recurso didáctico. Estudiantes, tanto de grado como de posgrado,
 672 y profesionales interesados en la hidrología, encontrarán en nuestra investigación una guía detallada para
 673 aplicar métodos similares a otras fuentes de elevación.

674 En conclusión, nuestro estudio abre un camino innovador en la comprensión de la hidrografía de República
 675 Dominicana, fusionando tecnologías y metodologías computacionales con un análisis sistemático a nivel
 676 nacional. La caracterización detallada y sistemática de la hidrografía ha desvelado la intrincada red fluvial
 677 del país, ofreciendo una herramienta invaluable para aplicaciones prácticas y científicas, desde la conservación
 678 de cuencas hasta la modelización hidrológica. Nos hemos apoyado en el rigor metodológico y en las fuentes de
 679 datos de mayor detalle disponibles públicamente, para generar un producto que, aunque reconocemos que

680 es mejorable, enriquece nuestra comprensión de la geografía física dominicana y sienta un precedente para
681 investigaciones futuras, estableciendo un marco de referencia que puede ser replicado o adaptado en otros
682 contextos y regiones. La combinación de datos, protocolos y análisis que hemos presentado en este trabajo,
683 junto con la relevancia de su contenido, evidencia la trascendencia de la investigación.

684 **Declaración de conflicto de intereses**

685 El autor y la autora declaran que no tienen ningún conflicto de interés con el contenido de este artículo.

686 **Disponibilidad de datos, scripts y código**

687 Los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles abiertamente en Zenodo en <https://doi.org/10.5281/zenodo.8146391> (Martínez-Batlle y Izzo-Gioiosa, 2023). Los scripts utilizados para la
688 curación de datos, análisis y visualización están disponibles en esta sección, así como en el repositorio de
689 GitHub en <https://github.com/geofis/red-hidrografica-densa-rd> y en Zenodo en (RELENAR?).
690

691 **Información suplementaria**

692 **Suplemento metodológico para la subsección “Obtención y Preprocesamiento del DEM”**

693 Los siguientes bloques de código cargan los paquetes de uso común a lo largo de este cuaderno, así como
 694 funciones creadas por nosotros para eficientizar las tareas de limpieza y representación de datos y mapas.
 695 Igualmente, aprovechamos este bloque de código para declarar la ruta del directorio donde se alojan los
 696 archivos fuente, la cual reprovechamos en distintas partes del código.

```
conflicted::conflict_prefer("select", "dplyr")
conflicted::conflict_prefer("filter", "dplyr")
conflicted::conflict_prefer("distance", "raster")
conflicted::conflict_prefer("alpha", "ggplot2")
conflicted::conflict_prefer("rescale", "scales")
library(psych)
library(raster)
library(sf)
library(kableExtra)
library(tidyverse)
library(gdalUtilities)
library(e1071)
library(scales)
library(tmap)
library(janitor)
library(ggrepel)
library(ggsflabel)
library(spanish)
source('R/funciones.R')
rm(list = grep('RR_*', ls(), value = T)) #Borrar resúmenes sesión anterior
dem_proc_dir <- 'estadisticos'
figuras <- 'figuras'
umbral_espurias <- 4000 #Umbral por debajo del cual se considera una cuenca como espuria
```

697 Descargamos 42 escenas ALOS PALSAR RTC, específicamente los *Hi-Res Terrain Corrected*, desde el
 698 Centro de Archivo Activo Distribuido (DAAC) del Alaska Satellite Facility (ASF) (ASF DAAC, 2014), para
 699 posteriormente depurarlas y seleccionar las más idóneas para unirlas en un mosaico creado como ráster virtual.
 700 La descarga la realizamos por lotes, usando un *script* de Python provisto por el propio ASF.

```
python download-all-2023-04-20_00-30-00.py
```

701 Al momento de realizarse esta investigación, la tendencia en el análisis de datos geoespaciales
 702 apuntaba hacia enfoques basados en la nube, como Google Earth Engine y Microsoft Planetary
 703 Computer. Nosotros usamos regularmente estas plataformas en nuestras investigaciones, pero
 704 ciertos algoritmos esenciales para el análisis hidrológico aún no se encuentran disponibles en
 705 estos servicios. Por esta razón, nos vimos en la necesidad de utilizar nuestros propios equipos
 706 informáticos (Intel(R) Core(TM) i7-7700K CPU @ 4.20GHz, 64 GB de memoria RAM, unidad
 707 de estado sólido NVMe, corriendo bajo Ubuntu 20.04) y, aunque conseguimos paralelizar
 708 ciertos procesos, la mayoría de los algoritmos de hidrología computacional no utilizan
 709 eficientemente los múltiples núcleos de los procesadores, resultando en una subutilización
 710 de la capacidad de memoria y en procesamientos más lentos que los que comúnmente se
 711 conseguirían en la nube.

712 Identificamos las escenas necesarias para cubrir íntegramente la República Dominicana, usando una búsqueda
 713 geográfica mediante polígono delimitador en ASF. Dado que la misión del ALOS-PALSAR ofrece escenas
 714 de distintas fechas para una misma área, las descargamos todas y posteriormente excluimos del análisis las
 715 redundantes, conservando siempre la más reciente. Utilizando el índice de huellas de escenas, escribimos un
 716 pequeño programa para seleccionar las más recientes allí donde hubiese redundancia. Con esto construimos
 717 un índice de DEM para guiarnos durante la construcción del ráster virtual.

```

ind_orig <- invisible(
  st_read('alos-palsar-dem-rd/asf-datapool-results-2023-04-19_08-31-26.geojson',
    quiet = T)) %>%
  rownames_to_column('fila') %>% mutate(fila = as.integer(fila))
distancias <- ind_orig %>% st_centroid() %>% st_distance() %>% units::drop_units()
distancias[upper.tri(distancias, diag = T)] <- NA
indices <- which(distancias < 1000, arr.ind = TRUE)
duplicados <- as.data.frame(indices) %>%
  mutate(dup_id = 1:nrow(indices)) %>%
  pivot_longer(-dup_id, names_to = 'tipo', values_to = 'fila') %>%
  select(-tipo)
seleccionados <- duplicados %>%
  inner_join(ind_orig %>% select(fila, startTime) %>% st_drop_geometry()) %>%
  group_by(dup_id) %>% filter(startTime == max(startTime)) %>% pull(fila)
ind_orig_sel <- ind_orig %>%
  filter(!fila %in% duplicados$fila | fila %in% seleccionados) %>%
  filter(centerLon < -72.1821)

ind_orig_sel %>% select(sceneName, startTime) %>% st_drop_geometry() %>%
  estilo_kable(titulo = paste('Escenas ALOS-PALSAR usadas para generar un DEM de 12.5 m de
                                resolución espacial de República Dominicana'))

```

Tabla S1: Escenas ALOS-PALSAR usadas para generar un DEM de 12.5 m de resolución espacial de República Dominicana

sceneName	startTime
ALPSRP253240380	2010-10-25 23:18:16
ALPSRP253240370	2010-10-25 23:18:08
ALPSRP253240360	2010-10-25 23:17:59
ALPSRP253240350	2010-10-25 23:17:51
ALPSRP252510370	2010-10-20 23:11:46
ALPSRP252510360	2010-10-20 23:11:38
ALPSRP252510350	2010-10-20 23:11:30
ALPSRP251490380	2010-10-13 23:22:45
ALPSRP251490370	2010-10-13 23:22:36
ALPSRP251490360	2010-10-13 23:22:28
ALPSRP251490350	2010-10-13 23:22:20
ALPSRP251490340	2010-10-13 23:22:12
ALPSRP250760380	2010-10-08 23:16:23
ALPSRP250760370	2010-10-08 23:16:15
ALPSRP250760360	2010-10-08 23:16:06
ALPSRP250760350	2010-10-08 23:15:58
ALPSRP250030360	2010-10-03 23:09:44
ALPSRP250030350	2010-10-03 23:09:36
ALPSRP248280370	2010-09-21 23:14:21
ALPSRP248280360	2010-09-21 23:14:13
ALPSRP248280350	2010-09-21 23:14:05
ALPSRP247260360	2010-09-14 23:25:03
ALPSRP247260350	2010-09-14 23:24:55
ALPSRP247260340	2010-09-14 23:24:47
ALPSRP242300380	2010-08-11 23:21:28
ALPSRP242300370	2010-08-11 23:21:19
ALPSRP242300360	2010-08-11 23:21:11
ALPSRP242300350	2010-08-11 23:21:03

718 En total, para cubrir el territorio de República Dominicana, necesitamos 28 de escenas únicas ALOS PALSAR
 719 RTC. Señalamos en este punto un detalle relevante para el análisis hidrológico. Las escenas correspondientes
 720 a la porción haitiana del río Artibonito, no las procesamos en este estudio, a efectos de agilizar la producción
 721 de resultados. No obstante, dicha tarea nos quedó pendiente para futuras investigaciones.

```
ind_orig_sel_m <- ind_orig_sel %>%
  ggplot +
  geom_sf(alpha = 0.6, fill = 'grey90', color = 'grey20', size = 0.5) +
  geom_sf(data = pais, fill = 'transparent', color = 'black') +
  ggplot2::geom_sf_label(aes(label = sceneName), color = 'red', size = 1.5,
    label.padding = unit(0.1, "lines"), alpha = 0.9) +
  theme_bw() +
  theme(plot.title = element_text(size = 11)) +
  ggspatial::annotation_scale(style = 'ticks')
```

722 Usando como referencia el índice de escenas seleccionadas, extrajimos los DEM correspondientes, incluidos
 723 en formato GTiff dentro de los archivos comprimidos (.zip). Este formato es proporcionado por el Alaska
 724 Satellite Facility para minimizar el uso del ancho de banda durante las descargas, lo que resulta beneficioso
 725 para el rendimiento de sus servidores. A pesar de estar comprimidos, la descompresión de estos archivos no
 726 supone un proceso largo o laborioso.

```
zip_path <- 'alos-palsar-dem-rd/'
sapply(ind_orig_sel$fileNames,
  function(x)
    unzip(
      zipfile = paste0(zip_path, x),
      exdir = paste0(zip_path, 'dem'), junkpaths = T,
      files = paste0(gsub('.zip', '', x), '/', gsub('zip', 'dem.tif', x)))
)
```

727 Todos los DEM fueron proporcionados por ASF en el sistema de coordenadas Universal Transversal de
 728 Mercator (UTM). Sin embargo, los situados al oeste fueron suministrados en el huso 18N. Identificamos estos
 729 DEM y los transformamos al huso 19N, que es el que corresponde a nuestra área, con el objetivo de generar
 730 un producto continuo. Para realizar esta transformación, empleamos la herramienta gdalwarp de la biblioteca
 731 GDAL (GDAL/OGR contributors, 2022).

```
dems_orig_path <- list.files(path = 'alos-palsar-dem-rd/dem',
  pattern = '*dem.tif', full.names = T)
crs_18n <- names(which(sapply(dems_orig_path, function(x){
  crs_x <- gdal_crs(x)
  is_z18 <- grepl('zone 18N', crs_x[['wkt']])
})))
sapply(crs_18n, function(x) file.rename(from = x, to = gsub('.tif', '_z18n.tif', x)))
crs_18n_ren <- list.files(path = 'alos-palsar-dem-rd/dem',
  pattern = 'z18n.tif', full.names = T)
sapply(crs_18n_ren, function(x){
  gdalwarp(
    srcfile = x,
    dstfile = gsub('_z18n.tif', '.tif', x),
    t_srs = 'EPSG:32619', overwrite = T)})
```

732 A efectos de eficientizar la manipulación del DEM, creamos un ráster virtual (VRT) usando la herramienta
 733 gdalbuildvrt de la biblioteca GDAL. Un ráster virtual es básicamente la abstracción de una imagen que
 734 se genera *on the fly*, creado a partir de un índice de tamaño pequeño, en formato XML, que apunta a los
 735 archivos originales sin moverlos ni alterarlos. Tienen las mismas prestaciones que las imágenes guardadas
 736 permanentes guardadas en disco, por lo que con un ráster virtual podemos visualizar un mosaico continuo
 737 o realizar análisis intermedios, o evaluar un producto antes de crearlo de forma definitiva. Se trata de un
 738 formato muy eficiente que ayuda a ahorrar espacio en disco.

```
gdalbuildvrt(gdalfile = dems_orig_path,
             output.vrt = paste0(paste0(zip_path, 'dem'), '/dem_seamless.vrt'),
             resolution = 'highest', r = 'average')
```

739 Posteriormente, creamos la base de datos y localización de GRASS GIS usando como fuente de extensión y
 740 resolución el ráster virtual (GRASS Development Team, 2023). Decidimos usar GRASS GIS a partir de este
 741 punto para prácticamente todas las tareas de análisis geoespacial e hidrológico, pues se trata de un software
 742 bastante eficiente en muchos de sus complementos y algoritmos de serie (e.g. relleno de nulos). Sin embargo,
 743 en pasos posteriores, alternamos el flujo de procesamiento con otras herramientas, como WhiteboxTools
 744 (Lindsay, 2018). En todo caso, nuestro criterio fue siempre aprovechar al máximo los recursos de hardware y
 745 software disponibles para obtener los productos requeridos en el menor tiempo posible.

```
# Usando Bash, desde la ruta ./alos-palsar-dem-rd/dem
grass --text -c dem_seamless.vrt ./grassdata
# Para abrir luego de cerrada: grass grassdata/PERMANENT/
```

746 Luego creamos una máscara de país en QGIS (QGIS Development Team, 2021), superponiendo el límite
 747 oficial obtenido desde la página de la Oficina Nacional de Estadística (ONE), y combinándolo con otras
 748 fuentes disponibles en línea, como GADM, Humanitarian Data Exchange (OCHA) y OpenStreetMap (GADM,
 749 2022; OCHA, 2022; Oficina Nacional de Estadística (ONE), 2018; OpenStreetMap contributors, 2017). De la
 750 máscara, eliminamos las superficies de máximas de lagos y lagunas no artificiales, pues nos interesa procesar
 751 las cuencas endorreicas que drenan hacia ellos. No obstante, los embalses no los incluimos en dicha superficie,
 752 dado que necesitamos construir la jerarquía de red ignorando su presencia, es decir, asumiendo como continuos
 753 todos los cursos fluviales. Sobre esta máscara, creamos un área de influencia, para recortar el DEM con un
 754 cierto “acolchado” que nos permitiera analizar sin dificultades las áreas costeras y de frontera. La creación de
 755 esta máscara fue el único paso que realizamos de forma semimanual, pues el resto del flujo de procesamiento
 756 lo realizamos con algoritmo automáticos.

757 Posteriormente, importamos la máscara generada a la base de datos de GRASS y la aplicamos. GRASS opera
 758 de forma eficiente, circunscribiendo la aplicación de los algoritmos al área definida como máscara. Las áreas
 759 fuera de ésta son excluidas, eficientizando los recursos y evitando malgastar tiempo de CPU en áreas que
 760 ajenas al proyecto.

```
# Importar máscara
v.import input=mascara-1km.gpkg output=mascara_1km

# Fijar máscara
r.mask -r
r.mask vector=mascara_1km

# Ver ambiente
g.gisenv
## GISDBASE=/media/jose/datos/alos-palsar-dem-rd/dem
## LOCATION_NAME=grassdata
## MAPSET=PERMANENT
## GUI=text
## PID=1632142
```

761 Importamos el ráster virtual a la base de datos de GRASS GIS con la herramienta `r.import`. Con este paso
 762 generamos un mapa ráster dentro de la base de datos GRASS GIS, el cual es una realización con celdas
 763 manipulables y a la que le podemos aplicar algoritmos ráster de nuestra preferencia.

```
# Importar DEM a región de GRASS
time r.import --overwrite input=dem_seamless.vrt output=dem
## real

# Ver en lista (q para salir)
g.list type=raster
```

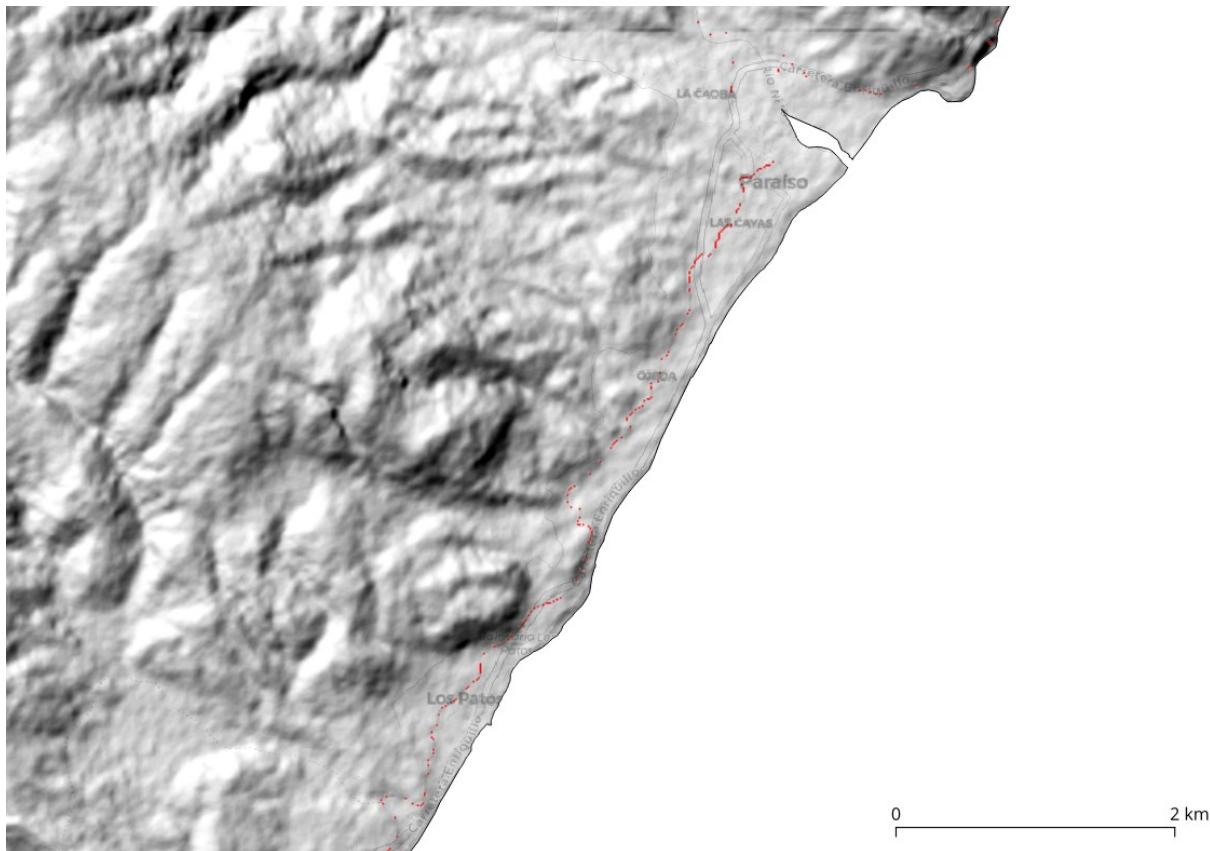


Figura S1: DEM sin procesar, representado como relieve sombreado. Nótese los píxeles sin datos, destacados en color rojo (Los Patos-Ojeda-Paraíso, provincia Barahona, sudoeste de República Dominicana)

764 A continuación, rellenamos las celdas con valor nulo (sin datos) por medio del eficiente complemento de
 765 GRASS `r.fillnulls`. Lo configuramos para llenar píxeles nulos usando interpolación *spline* bilineal
 766 con regularización Tykhonov (*spline* es un método de descomposición de curvas en porciones descritas por
 767 polinomios).

```
# Rellenar vacíos
time r.fillnulls --overwrite --verbose \
    input=dem method="bilinear" \
    tension=40 smooth=0.1 edge=3 npmin=600 segmax=300 lambda=0.01 \
    output=dem_relleno
# Enviar mensaje al finalizar (ejecutar conjuntamente con anterior)
echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
## real 10m11.925s
```

768 En el siguiente paso suavizamos el DEM preservando morfologías. Para esto usamos la herramienta *FeaturePreservingSmoothing* de WhiteboxTools, la cual reduce la rugosidad generada por el ruido en el DEM
 769 (Lindsay, 2018; Lindsay et al., 2019). Para aplicar esta herramienta, primero exportamos el DEM desde la
 770 base de datos de GRASS GIS a archivo GeoTIFF, y posteriormente aplicamos el suavizado. Finalmente,
 771 importamos el DEM suavizado nuevamente a la base de datos de GRASS GIS para continuar el procesamiento
 772 en dicha aplicación.

```
# Exportar a GTiff con compresión LZW
time r.out.gdal --overwrite --verbose createopt="COMPRESS=LZW,BIGTIFF=YES" \
    input=dem_relleno \
    format=GTiff type=Float64 output=dem_relleno.tif
# Enviar mensaje al finalizar (ejecutar conjuntamente con anterior)
```

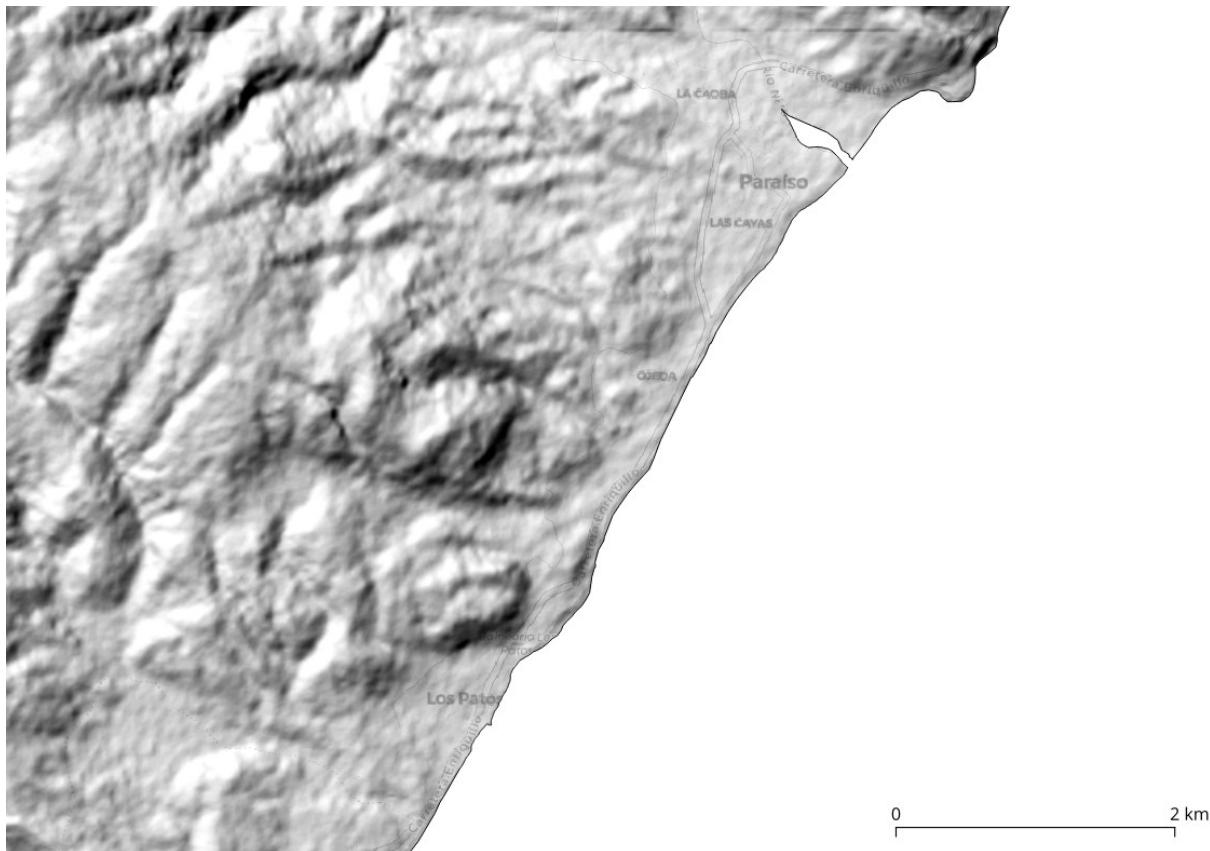


Figura S2: DEM sin procesar, representado como relieve sombreado. Los píxeles sin datos fueron eliminados (Los Patos-Ojeda-Paraíso, provincia Barahona, sudoeste de República Dominicana)

```

echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
## real 0m58.924s

# Comenzó a 23.20 de 22 de abril
time ~/WhiteboxTools_linux_amd64/WBT/whitebox_tools \
--wd='/media/jose/datos/alos-palsar-dem-rd/dem/' \
--filter=25 --norm_diff=45 --num_iter=5 \
--run=FeaturePreservingSmoothing --input='dem_relleno.tif' \
--output='dem_relleno_suavizado.tif' -v
# Enviar mensaje al finalizar (ejecutar conjuntamente con anterior)
echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
## real 9min46.103s

```

```

time r.import input=dem_relleno_suavizado.tif output=dem_suavizado
echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
## real 0m21.593s

```

774 A continuación, usamos el ráster de altura de geoide de La Española a 1 minuto de resolución (EGM2008)
 775 para obtener alturas pseudo-ortométricas, por medio de una suma algebraica simple de este ráster y el DEM
 776 suavizado en GRASS GIS con la herramienta `r.mapcalc`. Sin embargo, previamente fue necesario aumentar
 777 la resolución del ráster de altura del geoide antes de realizar la suma. Para esto, usamos `r.resamp.rst`
 778 (evaluamos una segunda alternativa con el complemento `r.resamp.interp` y, aunque realizó el trabajo
 779 eficientemente, eliminó muchas áreas limítrofes, por lo que preferimos no utilizarlo).

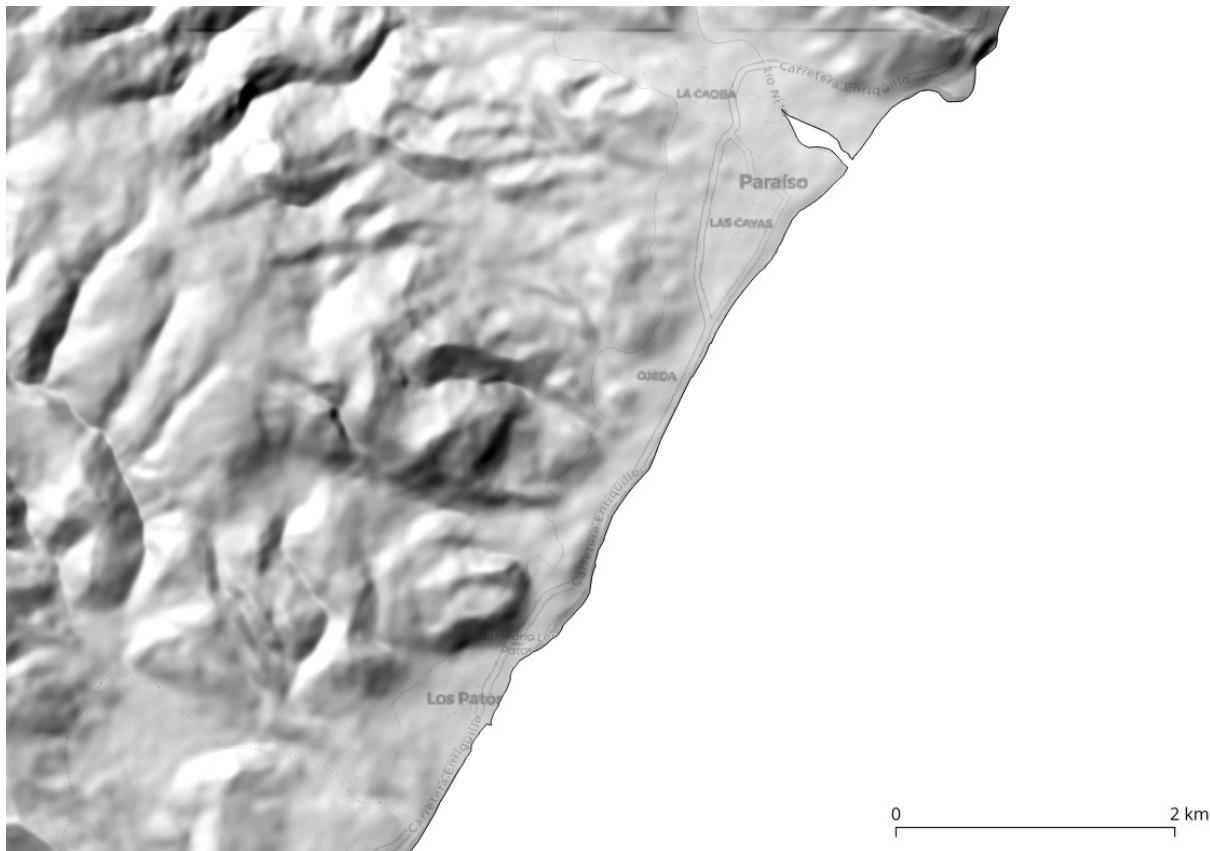


Figura S3: DEM suavizado, representado como relieve sombreado. Nótese la conservación de las morfologías principales y la eliminación del ruido sobre éstas (Los Patos-Ojeda-Paraíso, provincia Barahona, sudoeste de República Dominicana)

```

# Importar DEM a región de GRASS
r.import --overwrite input=egm2008-1_espanola.tif output=egm2008_1min

# Ver en lista (q para salir)
g.list type=raster

# Ver atributos de la región
g.region -p

# Alternativa 1. Usando r.resamp.rst. Más eficiente y precisa
# Fijar la región al geoide importado
g.region raster=egm2008_1min -ap
# Realizar la interpolación
r.resamp.rst --overwrite input=egm2008_1min ew_res=50 ns_res=50 elevation=egm2008_hires
echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
## real
# Fijar región a nuevo geoide
g.region raster=egm2008_hires -ap

# Alternativa 2. Usando r.resamp.interp. También eficiente, pero eliminar áreas de borde
# g.region res=50 -ap
# r.resamp.interp --overwrite input=egm2008_1min \
#   output=egm2008_hires method=bilinear

```

```

# Exportar para explorar visualmente
# r.out.gdal --overwrite --verbose createopt="COMPRESS=LZW" \
# input=egm2008_hires \
# format=GTiff type=Float64 output=egm2008_hires.tif

# Volver a resolución de DEM rellenado y suavizado
g.region raster=dem_suavizado -ap

# Aplicar álgebra de mapas
r.mapcalc --overwrite "dem_pseudo_ortometrico = dem_suavizado - egm2008_hires"

#Estadísticos univariados
r.univar --overwrite -te \
map=dem_pseudo_ortometrico \
output=stats_dem_pseudo_ortometrico.txt

stats_dem_pseudo_ortometrico <- read_delim(
  paste0(dem_proc_dir, '/',
         'stats_dem_pseudo_ortometrico.txt'),
  progress = F, show_col_types = F)

```

780 El resumen estadístico proporcionado por la herramienta `r.univar` de GRASS GIS, usando la máscara
 781 ajustada a los límites costeros e internacional del país, informó que la elevación mínima es -51 m, mientras que
 782 la máxima es 3102 m, para un rango de casi 3154 m. El valor mínimo probablemente no está bien recogido,
 783 debido a que la máscara empleada podría estar eliminando elevaciones muy bajas en el área de la Hoya de
 784 Enriquillo. La elevación media, considerando tanto los negativos como los positivos, es de aproximadamente
 785 404 m, con desviación estándar de 487 m y coeficiente de variación de 121 %. Remarcamos que, aunque ASF
 786 advierte de no usar este modelo para fines de elevación, el valor máximo se ajusta bastante a la elevación
 787 máxima conocida en República Dominicana, que es el pico Duarte (Instituto Geográfico Nacional, 2022).

788 A continuación, efectuamos el procedimiento de tallado o grabado de una red preexistente sobre el DEM,
 789 conocido como *stream burning* (Lindsay, 2016). Con este procedimiento, logramos que los píxeles del DEM
 790 intersectados con el vectorial de la red preexistente, adquieran un valor muy bajo respecto de su entorno,
 791 para asegurar que los algoritmos automáticos de análisis hidrológico dirijan el flujo a través de los lechos
 792 de ríos establecidos. El tallado es particularmente útil, incluso esencial, en áreas planas, ya que ayuda a los
 793 algoritmos automáticos a producir redes hidrográficas más realistas y topológicamente correctas. Sin embargo,
 794 su aplicación de requiere de una cuidadosa selección de la red preexistente a tallar. Para crearla, usamos una
 795 red de drenaje de cursos fluviales seleccionados, que incluyó sólo los de mayor longitud, comúnmente ríos
 796 permanentes, de lecho ancho y claramente establecidos. Nos apoyamos en imágenes satelitales (Google; Airbus,
 797 Airbus; Landsat; Copernicus; Maxar Technologies; U.S. Geological Survey, 2023) y, ocasionalmente, en
 798 el MTN-50K (Instituto Cartográfico Militar (ICM), 1989). Complementamos con OpenStreetMap contributors
 799 (2017), ya que este servicio provee información vectorial de fácil acceso y precisa. El resultado consistió en una
 800 red de cursos seleccionados para el tallado del DEM, representada por los ríos Artibonito, Yaque del Norte,
 801 Yuna, Yaque del Sur, varios ríos del extremo meridional de la cordillera Central y del borde sudoriental del
 802 país, así como algunos ríos seleccionados de la cordillera Septentrional.

803 Nuestra de red cursos seleccionados para el tallado contiene varios ríos que atraviesan amplios valles y
 804 karsts, por lo que son comunes los tramos que cruzan zonas complicadas para la conducción del flujo
 805 donde probablemente el error posicional de las líneas es mayor. Cabe también señalar que, para asegurar la
 806 continuidad topológica de la red, dimos un tratamiento especial a los ríos que llenan embalses, los cuales
 807 representamos por medio trazados históricos obtenidos del MTN-50K, omitiendo así la presencia de los
 808 embalses.

```

# Importar red a GRASS
# IMPORTANTE: la red en el GPKG que se desea tallar, debe tener "1" en el campo "rasterizar"
v.import --overwrite input=red_mtn50k_cleaned_largos.gpkg \
  output=red_mtn50k_cleaned_largos
# Ver mapa importado en lista (q para salir)
g.list type=vector
# Calcular y pasar a archivo, la longitud de cursos

```

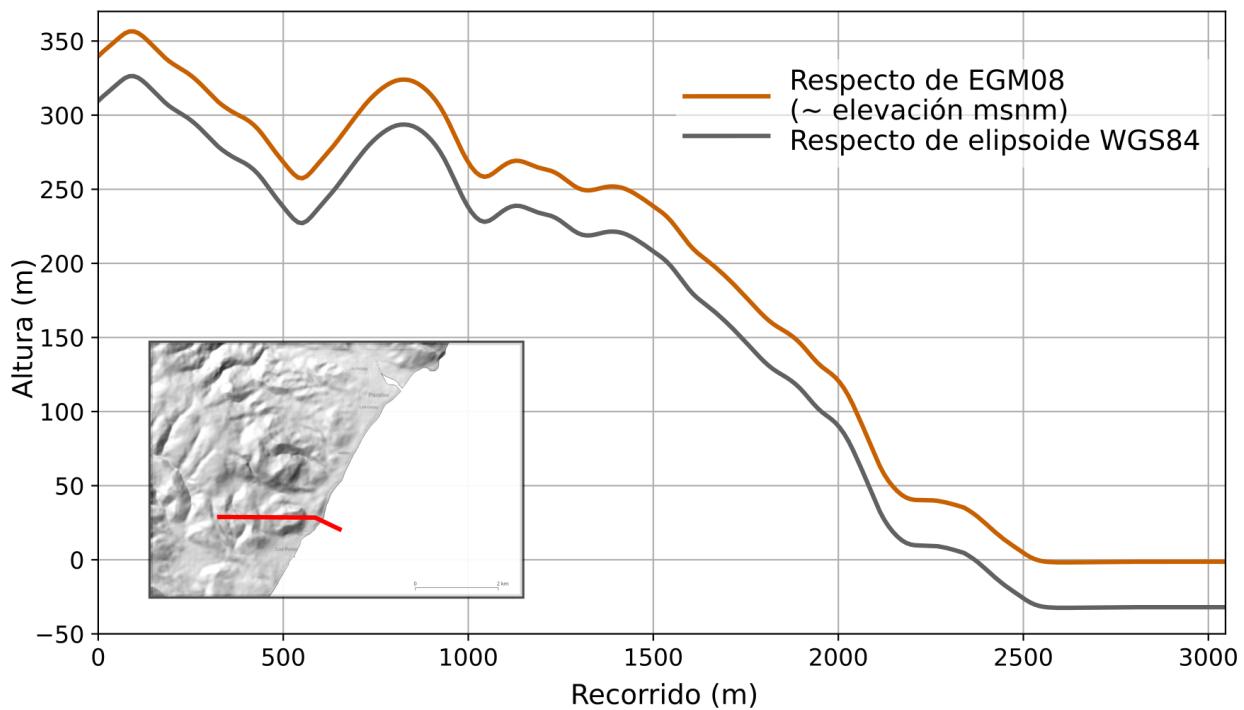


Figura S4: Alturas respecto de geoide EGM08 (~ortométrica) y sobre elíptido WGS84, de un transecto descendente desde Bahoruco Oriental al Mar Caribe (Los Patos-Ojeda-Paraíso, provincia Barahona, sudoeste de República Dominicana)

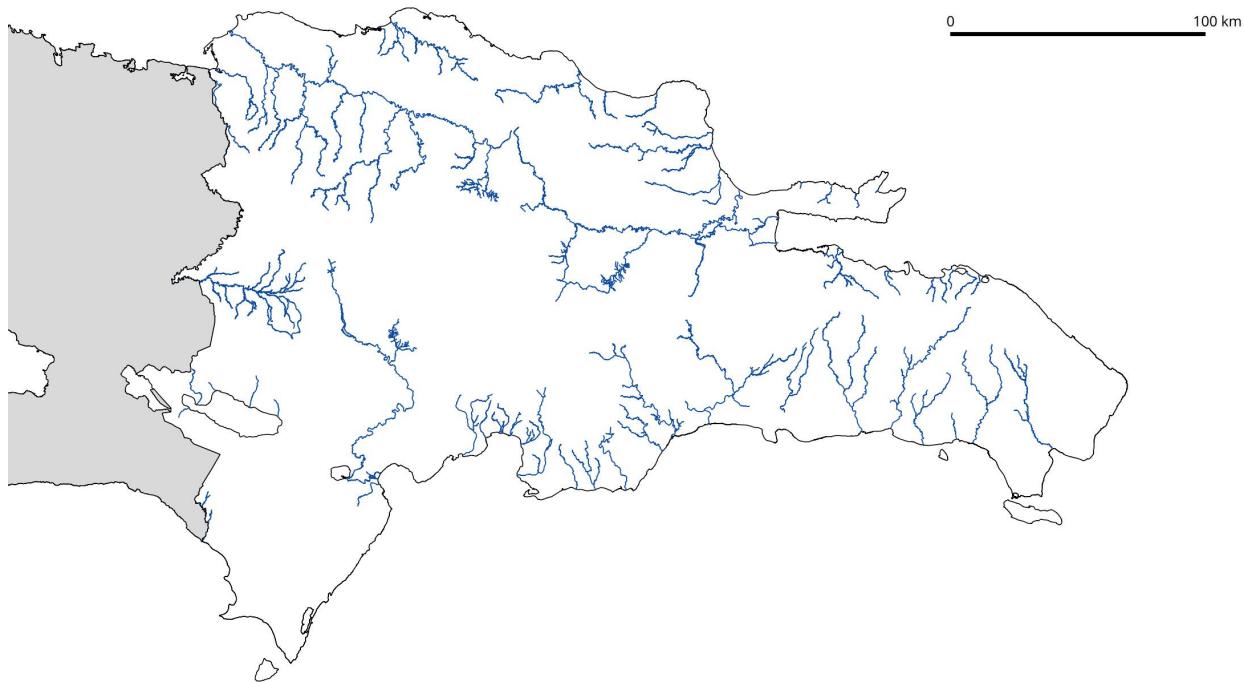


Figura S5: Mapa de la red de cursos largos creada para el estudio a partir de varias fuentes (más detalles, en el texto).

```
# y número de segmentos (ejecutar en casos de actualización)
v.to.db -p option=length map=red_mtn50k_cleaned_largos > \
stats_length_red_mtn50k_cleaned_largos.txt

stats_red_mtn50k_largos <- read_delim(
  paste0(dem_proc_dir, '/',
    'stats_length_red_mtn50k_cleaned_largos.txt'),
  progress = F, show_col_types = F)
n_seg_red_mtn50k_largos <- stats_red_mtn50k_largos %>%
  filter(!cat==1) %>% nrow
length_mtn50k_largos <- stats_red_mtn50k_largos %>%
  filter(!cat==1) %>% pull(length) %>% sum/1000
```

809 Finalmente, importamos nuestra red de cursos seleccionados para el tallado a la base de datos de GRASS
 810 GIS y generamos estadísticas básicas. Se trata de una red compuesta por **388 segmentos** que suman un
 811 total de **5163.66 kilómetros** de longitud. Cabe señalar que esta red no tiene valor hidrográfico, pues, como
 812 indicamos, ignora los lagos para garantizar la integridad topológica. Desaconsejamos su uso para otro fin que
 813 no sea el grabado de un DEM.

814 El siguiente paso consistió en realizar el *stream burning* (tallado) de la red de cursos seleccionados, usando
 815 distintos algoritmos sobre el DEM. Probamos las funciones **r.carve** y **r.mapcalc** (álgebra de mapas) de
 816 GRASS GIS, y **FillBurn** de WhiteboxTools (GRASS Development Team, 2022a; Lindsay, 2018). Sin embargo,
 817 es importante señalar que, dependiendo del algoritmo usado, el grabado modifica de forma diferente el DEM.
 818 Además, algunos algoritmos modifican no solamente los píxeles intersectados sino también otros píxeles,
 819 incluso pueden llegar a cambiar los valores en el DEM completo. Nosotros priorizamos un método de grabado
 820 que fuese efectivo pero que a la vez produjese la mínima alteración sobre el DEM.

821 Comenzamos con **r.carve**, una herramienta diseñada para grabar el DEM sin modificarlo sustancialmente,
 822 permitiendo al mismo tiempo configurar la profundidad y la anchura del grabado (GRASS Development
 823 Team, 2022b; Petrasova et al., 2011). Por defecto, la anchura de lecho es equivalente a la resolución del DEM.
 824 La profundidad puede definirse por el usuario, para lo cual nosotros establecimos 100 metros. Pudimos tallar
 825 la red de cursos seleccionados sobre el DEM con esta herramienta, generando un resultado que consideramos
 826 bueno, aunque el proceso ocupó más de 1 hora de tiempo de cómputo. Esta alternativa es recomendada si
 827 resultase imprescindible conservar las propiedades topográficas en el DEM, pero debe tenerse en cuenta que
 828 su rendimiento es muy bajo. En los casos en los que se use un DEM de resolución baja, se recomienda usar
 829 esta alternativa. Sin embargo, a nosotros no nos resultó apropiado este método por razones de rendimiento,
 830 que explicamos a continuación. Para evaluar el rendimiento del DEM tallado, realizábamos un procesamiento
 831 hidrológico abreviado (generación de la acumulación de flujo y extracción de la red con **r.watershed**); si
 832 los productos generados (e.g. red hidrográfica) no nos parecían idóneos, nos veíamos en la necesidad iterar,
 833 editando la red y aplicando el tallado nuevamente. Dado que el complemento **r.carve** era poco eficiente,
 834 preferimos buscar otras opciones de tallado.

```
# Tallar red de cursos seleccionados usando r.carve (ALTERNATIVA DESCARTADA)
# Limpiar red manualmente en QGIS
## Adicionalmente, para mejorar la topología, se puede aplicar
## v.clean directamente en QGIS, o hacerlo en GRASS GIS tras importar
# Aplicar r.carve
# time r.carve --overwrite --verbose raster=dem_pseudo_ortometrico \
#   vector=red_mtn50k_cleaned_largos output=dem_tallado depth=100
# echo "r.carve finalizado" | mail -s "r.carve finalizado" USUARIO@MAIL
## real 97m3.970s
```

835 Posteriormente, probamos el tallado usando álgebra de mapas con herramienta **r.mapcalc** de GRASS GIS
 836 (GRASS Development Team, 2022a; GRASS Development Team, 2022c; Larson et al., 1991; Shapiro y
 837 Westervelt, 1994). Para tallar con álgebra de mapas, primero normalizamos el DEM, generamos una capa
 838 booleana ráster con la red de cursos seleccionados, la restamos al DEM normalizado y luego, para restablecer
 839 los valores originales fuera de las áreas talladas, multiplicamos el ráster resultante de la resta nuevamente por
 840 el rango del DEM (máximo - mínimo). El resultado es un DEM tallado, en el que sólo los píxeles por donde
 841 circula la red quedaron con una profundidad equivalente al rango. Esta alternativa fue la seleccionada por ser
 842 la más eficiente y que menor modificación introdujo en el DEM.

```

# Tallar con álgebra de mapas (ALTERNATIVA ELEGIDA)
# Antes de comenzar, limpiar red manualmente en QGIS
# Para mejorar la topología, se puede aplicar v.clean directamente en QGIS
# Primero, rasterizar red (los pixeles de la red valdrán 1, el resto, nulo)
v.to.rast --overwrite \
    input=red_mtn50k_cleaned_largos type=line use=attr \
    attribute_column=rasterizar \
    output=red_mtn50k_cleaned_largos \
    memory=32000
# La columna "rasterizar" es 0 para cursos que no se rasterizan
# Luego convertir nulos a cero
r.null map=red_mtn50k_cleaned_largos null=0
# A continuación, determinar estadísticas univariantes del DEM
# confirmar que no sufre gran modificación de sus valores extremos
r.univar map=dem_pseudo_ortometrico
# minimum: -51.4456
# maximum: 3102.34
# Finalmente, aplicar el tallado mediante normalización y resta con r.mapcalc
time r.mapcalc --overwrite << EOF
eval(stddem = (dem_pseudo_ortometrico - -51.4456) / (3102.34 - -51.4456), \
      stddemburn = stddem - red_mtn50k_cleaned_largos)
dem_tallado = (stddemburn * (3102.34 - -51.4456)) - 51.4456
EOF
echo "Tallado finalizado" | mail -s "Mensaje sobre tallado" USUARIO@MAIL
## real 1m5.194s
# A continuación, determinar estadísticas univariantes del DEM
# confirmar que no sufre gran modificación de sus valores extremos
r.univar map=dem_pseudo_ortometrico

```

843 Como última alternativa de procesamiento, probamos la herramienta FillBurn, basada en Saunders (2000)
 844 e implementada por Lindsay (2016) en de WBT. FillBurn realiza dos modificaciones a la vez sobre el
 845 DEM; por una parte, graba la red, usando una profundidad por defecto y, por otro, rellena las depresiones.
 846 La herramienta mostró mejor rendimiento que la de GRASS GIS en cuanto a tiempo de cómputo. Tras
 847 tallar la red evaluamos el DEM resultante, y comprobamos que **resultó ser muy diferente al original,**
 848 **especialmente en las áreas con depresiones.** Por esta razón, descartamos este DEM y elegimos usar el
 849 tallado por medio de álgebra de mapas (r.mapcalc) con GRASS GIS en los siguientes pasos de nuestro flujo
 850 de trabajo.

```

# Tallar con FillBurn de WhiteboxTools (ALTERNATIVA DESCARTADA)
# Exportar dem_pseudo_ortometrico a GTiff con compresión LZW
# time r.out.gdal --overwrite --verbose createopt="COMPRESS=LZW,BIGTIFF=YES" \
#     input=dem_pseudo_ortometrico \
#     format=GTiff type=Float64 output=dem_pseudo_ortometrico.tif
# echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
## real 1m0.248s

```

```

# Exportar red_mtn50k_cleaned_largos.gpkg a shapefile
# ogr2ogr(
#     src_datasource_name = paste0('/media/jose/datos/los-palsar-dem-rd/',
#                                   'dem/red_mtn50k_cleaned_largos.gpkg'),
#     dst_datasource_name = paste0('/media/jose/datos/los-palsar-dem-rd/',
#                                   'dem/red_mtn50k_cleaned_largos.shp'),
#     verbose=TRUE)

```

```

# Tallar finalmente
# time ~/WhiteboxTools_linux_amd64/WBT/whitebox_tools \
#     --wd='/media/jose/datos/los-palsar-dem-rd/dem/' \
#     --run=FillBurn --dem='dem_pseudo_ortometrico.tif' \
#     --streams='red_mtn50k_cleaned.shp' --output='dem_tallado.tif' -v

```

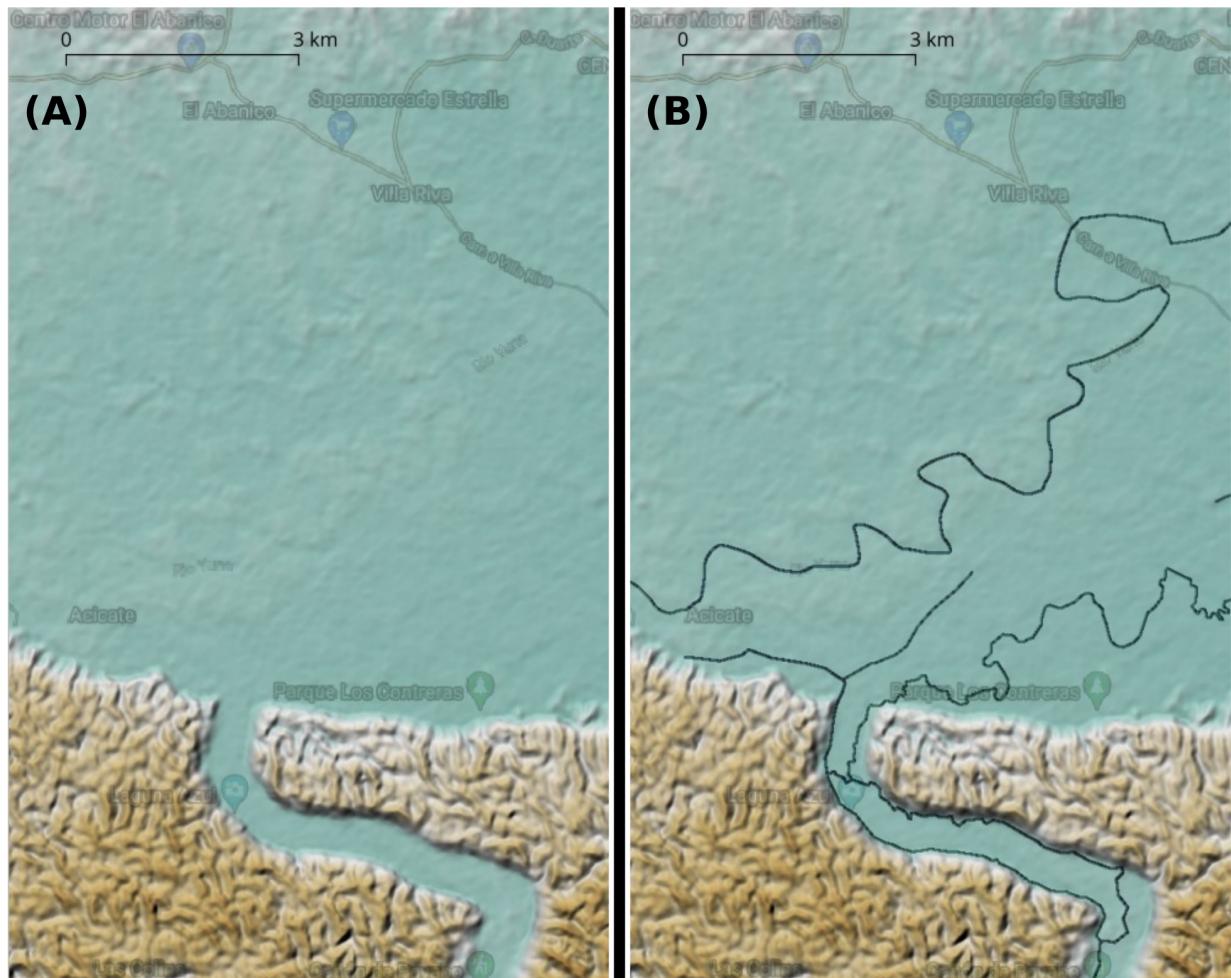


Figura S6: DEM sin aplicación de hidrografía (A), y con aplicación de hidrografía seleccionada o "DEM tallado"(B). El DEM se representa como relieve sombreado y la aplicación se denota como un grabado oscurecido (cañón del río Payabo, Los Haitises, y río Yuna (proximidades de Arenoso, nordeste de República Dominicana)

```
# echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
## real 9m21.980s
# Importar a GRASS GIS
# time r.import --overwrite input=dem_tallado.tif output=dem_tallado
# echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
## real 0m38.519s
```

- 851 A continuación, implementamos algoritmos para superponer depresiones sobre el Modelo Digital de Elevación
 852 (DEM). Este paso es esencial para guiar el flujo de agua a través de las depresiones, en los lugares donde éstas
 853 sean presentes. Es importante tener en cuenta que sólo se deben superponer aquellas depresiones que tengan
 854 la capacidad de capturar la escorrentía superficial, como los ponores o pérdidas, ya que son estos elementos
 855 los que condicionarán la hidrología en su entorno. El proceso de superposición de depresiones es fundamental
 856 para obtener límites de cuencas y redes de drenaje coherentes.
- 857 Para generar un conjunto de depresiones, utilizamos la capa de litologías de la República Dominicana,
 858 proporcionada por Mollat et al. (2004). A partir de este recurso, identificamos y separamos las calizas que
 859 presentaban un grado de karstificación suficiente, basándonos en nuestra experiencia de campo. Además,
 860 creamos una capa de depresiones empleando el complemento `r.geomorphon` y utilizando el DEM como

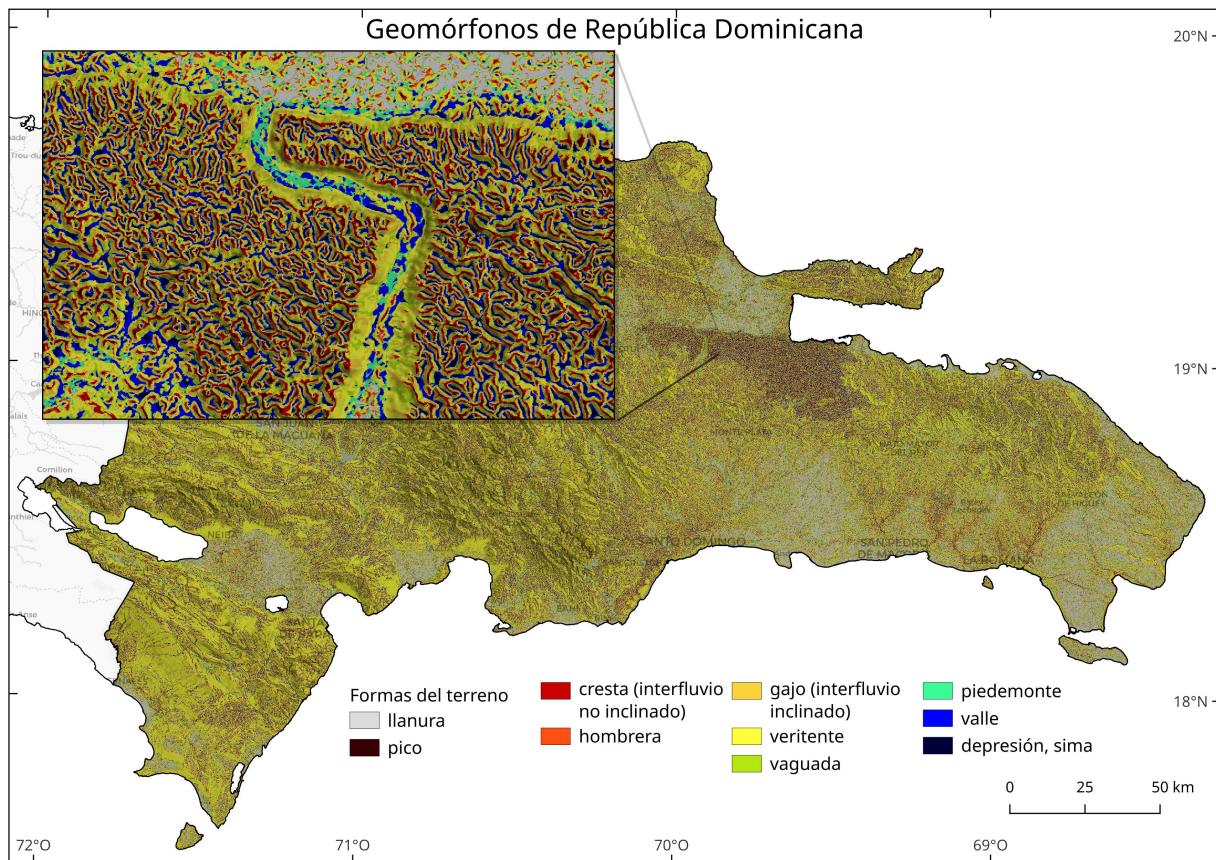


Figura S7: "Geomórfonos" de República Dominicana generados a partir de DEM ALOS PALSAR. En cartela, detalle del cañón del río Payabo

861 insumo, según el método propuesto por Jasiewicz y Stepinski (2013). También digitalizamos manualmente
 862 algunas depresiones cuya ubicación ya conocíamos a partir de nuestra experiencia en el terreno. Finalmente,
 863 realizamos una intersección de las tres fuentes de datos para producir una capa exhaustiva que refleja las
 864 depresiones capaces de capturar el flujo superficial.

865 No obstante, nuestro resultado debe tomarse con cautela en el relieve kárstico. Como bien es sabido, no
 866 todas las calizas representadas en la geología dominicana están lo suficientemente karstificadas como para
 867 desarrollar depresiones. Por esta razón, usamos la capa de calizas a discreción, y sólo conservamos aquellos
 868 afloramientos de calizas en los que, desde nuestro conocimiento de terreno, no se evidenciaba escorrentía
 869 superficial. Asimismo, reservamos aquellas calizas donde encontramos evidencia de depresiones en la topografía
 870 detallada y en imágenes satelitales. No obstante, gran parte de este trabajo se realizó manualmente, por lo
 871 que nuestra colección de dolinas tiene suficiente precisión, pero no es exhaustiva. Además, es virtualmente
 872 imposible identificar todas las depresiones que funcionan como pérdidas en imágenes satelitales o en mapas
 873 topográficos y geológicos. Finalmente, un elemento adicional complica aún más las cosas en los relieves
 874 kársticos: muchas pérdidas no ocurren a través de una depresión topográficamente visible, pues gran parte de
 875 la infiltración se produce a través de fracturas en la roca, pasando al endokarst y a la zona vadosa de manera
 876 "silenciosa", sin que veamos desde el aire la típica morfología deprimida (e.g. dolina).

```
# Crear geomórfonos
# WBT
# time ~/WhiteboxTools_linux_amd64/WBT/whitebox_tools \
#   -r=Geomorphons -v --wd='/media/jose/datos/los-palsar-dem-rd/dem/' \
#   --dem=dem_pseudo_ortometrico.tif -o=geomorfones.tif --search=25 \
#   --threshold=0 --tdist=0.0 --forms
# echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
```

```

## real 6m52.298s #MUY EFICIENTE. Se prefirió la versión de GRASS
## para garantizar flujo de trabajo dentro de la base de datos.
# GRASS GIS
time r.geomorphon \
--overwrite --verbose \
elevation=dem_pseudo_ortometrico forms=geomorfonos search=25
echo "r.geomorphon finalizado" | mail -s "Mensaje sobre r.geomorphon" USUARIO@MAIL
## real 33m16.508s #MUY LENTO

# Extraer depresiones desde geomorfonos
r.mapcalc --overwrite \
expression="'depresiones_geomorfonos' = if(geomorfonos == 10, 1, null())"

# Importar depresiones manualmente digitalizadas a base de datos de GRASS GIS
v.import --overwrite input=depresiones_digitalizadas.gpkg \
output=depresiones_digitalizadas

# Convertir depresiones digitalizadas manualmente a ráster
v.to.rast --overwrite input=depresiones_digitalizadas \
type=area use=val output=depresiones_digitalizadas

# Importar la capa de calizas con depresiones en RD (de Mapa Geológico 250K)
v.import --overwrite input=calizas_con_depresiones.gpkg output=calizas_con_depresiones

# Convertir la capa de calizas con depresiones a ráster
v.to.rast --overwrite input=calizas_con_depresiones type=area \
use=val output=calizas_con_depresiones

# Adjuntar depresiones digitalizadas manualmente con calizas
r.mapcalc --overwrite \
expression="'depresiones_geomorfonos_calizas' = \
'depresiones_geomorfonos' * 'calizas_con_depresiones'"

# Unir todas las depresiones en un único mapa
r.patch --overwrite input=depresiones_geomorfonos_calizas,depresiones_digitalizadas \
output=depresiones_todas

```

877 **Suplemento metodológico para la subsección “Procesamiento de hidrología computacional”**

878 Las técnicas de hidrología computacional han experimentado una considerable transformación desde su origen
879 en el siglo pasado hasta la actualidad, un proceso evolutivo al que han contribuido múltiples entidades
880 y personas de manera directa (Ehlschlaeger, 1989; Freeman, 1991; Holmgren, 1994; Larson et al., 1991;
881 McCool et al., 1987; Metz et al., 2011; Moore et al., 1991; Quinn et al., 1991; Weltz et al., 1988). De manera
882 particular, en las últimas dos décadas, se han realizado avances que han expandido el alcance y profundidad
883 de la hidrología computacional como disciplina, abriendo nuevas fronteras de conocimiento y posibilitando
884 abordajes más sofisticados y detallados de los fenómenos hídricos. En este proceso, GRASS GIS ha jugado
885 un papel fundamental, pues no solo ha mantenido activo calendario de lanzamiento de versiones, sino que
886 también ha ampliado, gracias a comunidad, el número de herramientas de forma significativa.

887 Para realizar análisis de cuencas y redes de drenaje en GRASS GIS, el complemento por excelencia es
888 **r.watershed** (GRASS Development Team, 2022d), el cual ofrece la posibilidad de crear mapas de acumulación
889 de flujo usando algoritmos avanzados, y facilita también la tarea de extraer *talwegs* y redes de drenaje, y
890 delimitar cuencas. Alternativamente, en los casos en los que existe especial interés por el análisis de redes
891 de drenaje y la jerarquía hidrográfica, se utiliza la familia de complementos **r.stream*** (Jasiewicz y Metz, 2011).
892 Dentro de esta familia se encuentran **r.stream.extract** para generar la red, **r.stream.order** para calcular
893 su jerarquía (requiere de los subproductos generados para la herramienta anterior), y **r.stream.basins** para
894 crear cuencas hidrográficas en función de la jerarquía. En este sentido, debemos elegir apropiadamente entre
895 **r.watershed** o la familia **r.stream*** según nuestras necesidades y objetivos, o usar ambos si nos interesan
896 resultados combinados, pero tomando las debidas precauciones.

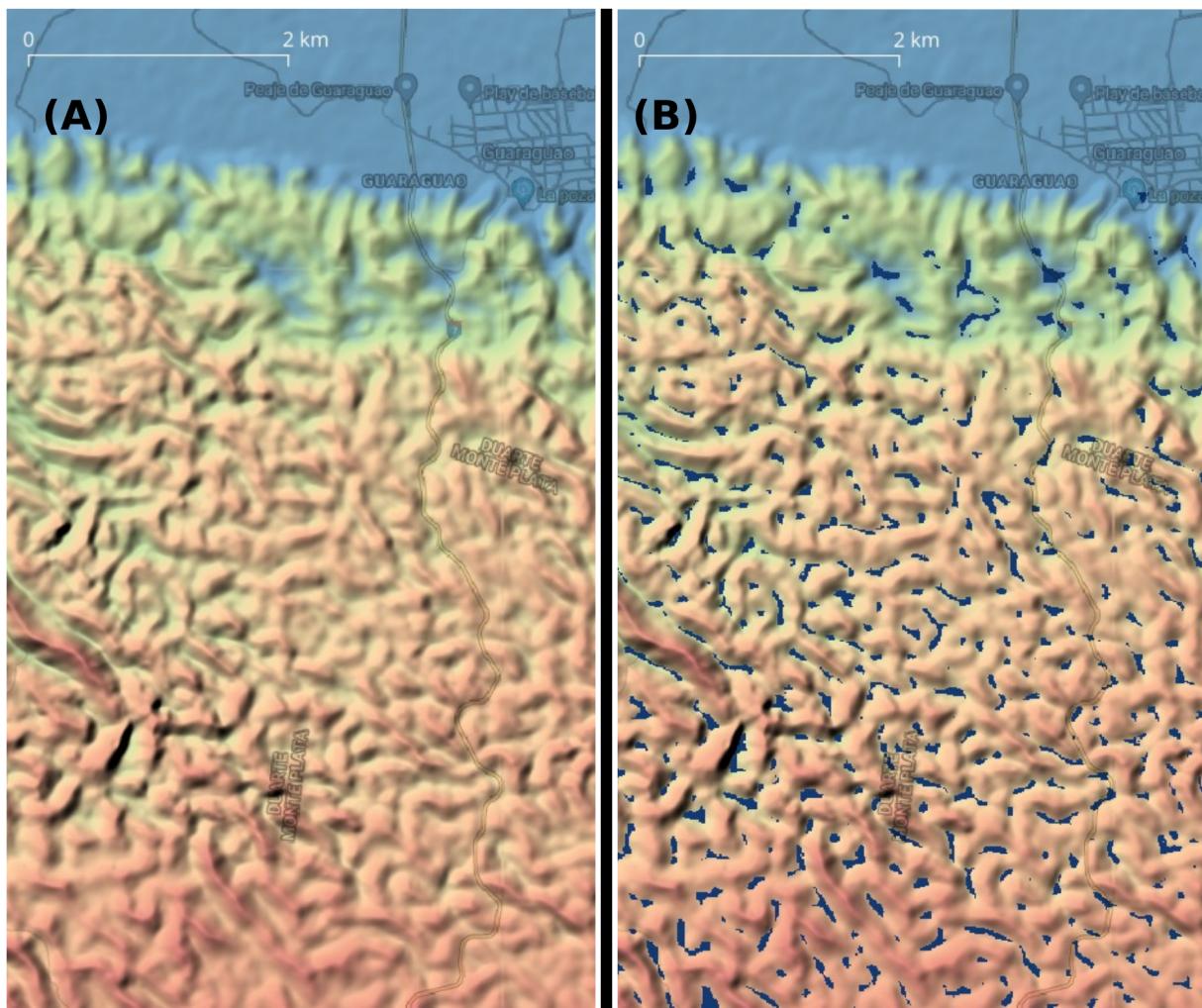


Figura S8: DEM ALOS PALSAR representado como mapa hipsométrico (rojo y marrón representan terreno elevado, verde y azul claro terreno bajo) sobre relieve sombreado, mostrando el área de Guaraguao, Los Haitises, al sur del río Yuna (noroeste de República Dominicana). (A) sin mostrar depresiones, (B) mostrando depresiones en tonalidad azul oscuro

- 897 Ambos complementos necesitan de dos mapas derivados para generar productos hidrológicos, los cuales
 898 pueden ser generados por ellos mismos; estos son el mapa de la red propiamente (**stream_rast**), y el de
 899 dirección de drenaje (**direction**). En este sentido, debe evitarse combinar mapas generados por algoritmos
 900 distintos para mantener la consistencia (por ejemplo, se desaconseja generar **stream_ras** con **r.watershed**
 901 y **direction** con **r.stream***, y viceversa), por lo que se recomienda generar ambos mapas por medio del
 902 mismo algoritmo.
- 903 Considerando que nuestro objetivo principal es la jerarquía de red, podíamos iniciar con **r.stream.extract**
 904 para generar los insumos para **r.stream.order**. Pero dado que este último requiere el mapa de acumulación
 905 flujo, el cual sólo es producido por **r.watershed**, generamos primero este mapa. Por lo tanto, sólo usamos
 906 **r.watershed** para obtener el mapa de acumulación que necesitamos en la aplicación de la familia **r.stream.***.
- 907 Previo al inicio de los análisis hidrológicos, aplicamos una máscara ajustada a la línea de costa y los límites
 908 fronterizos del país para evitar que las redes extraídas se extiendan al mar, y creamos una zona de influencia
 909 en el límite fronterizo para permitir la salida y entrada de flujo a través de este. Posteriormente, extrajimos
 910 el mapa de acumulación de flujo.

```

# Importar máscara
v.import --overwrite input=mascara-1km-solo-en-frontera.gpkg \
    output=mascara_1km_solo_en_frontera
# Fijar máscara
r.mask -r
r.mask vector=mascara_1km_solo_en_frontera

# Acumulación de flujo
time r.watershed --overwrite --verbose elevation=dem_tallado \
    depression=depresiones_todas accumulation=rwshed_acum \
    threshold=180 stream=rwshed_talwegs \
    memory=32000
echo "r.watershed finalizado" | mail -s "Mensaje sobre r.watershed" USUARIO@MAIL
## real 10m14.295s
# El umbral 180 se usó en la extracción de una red de muestra, como forma de
# previsualizar una hidrografía inicial, no para generar la red definitiva.
# Dependiendo de la aplicación deseada, otras salidas del addon son:
# drainage=rwshed_direccion_drenaje \
# basin=rwshed_cuencas \
# half_basin=rwshed_hemicuenna \
# tci=rwshed_tci spi=rwshed_spi \
# length_slope=rwshed_longitud_vertiente \
# slope_steeplness=rwshed_empinamiento \
# retention=rwshed_retencion_flujo \
# max_slope_length=rwshed_max_longitud_vertiente \

```

911 Usando como insumos el DEM y el mapa de acumulación producido por `r.watershed`, obtuvimos la red
 912 hidrográfica utilizando `r.stream.extract`. Esta etapa requirió la evaluación de umbrales de acumulación
 913 óptimos a través de inspección visual. El umbral de acumulación es un área de debate en hidrología
 914 computacional. Nos enfocamos en la evaluación de criterios para la extracción de *talwegs* en un sentido amplio,
 915 sin considerarlos como cursos fluviales permanentes. Reconocemos que la determinación de la permanencia
 916 fluvial requeriría un análisis detallado de las características individuales de cada cuenca, incluyendo aspectos
 917 como la pendiente, tamaño, litología y clima.

918 Siguiendo las mejores prácticas, realizamos diversas ejecuciones del complemento `r.stream.extract` usando
 919 varios umbrales para identificar la red hidrográfica más adecuada en nuestra área de interés (Freeman,
 920 1991; Jasiewicz y Metz, 2011; Marchesini et al., 2021). Para seleccionar un umbral de acumulación óptimo,
 921 consideramos cuatro criterios: consistencia con estudios similares, suficiente densidad de red, evitar una
 922 generalización excesiva de la red, y prevenir una red demasiado densa que incluya áreas sin características
 923 hidrológicas mínimas. Dado que nuestro DEM tiene una resolución espacial de 12.5 m, examinamos diferentes
 924 umbrales para obtener una red hidrográfica adecuada. En `r.stream.extract`, optamos por los umbrales de
 925 acumulación de 180, 540 y 900 celdas, equivalentes a 3, 8 y 14 hectáreas de superficie, respectivamente. Estos
 926 umbrales están en línea con los utilizados en estudios que consultamos, donde se evaluaron áreas propensas a
 927 inundaciones y cuencas de captación (Freeman, 1991; Marchesini et al., 2021).

928 El código necesario para generar las distintas redes evaluadas lo implementamos mediante un bucle `for` en
 929 Bash para mayor eficiencia y consistencia en el procesamiento. Hicimos que el bucle iterara automáticamente
 930 sobre los tres umbrales de acumulación, usando los valores de umbral como iterador (`i={180..900..360}`),
 931 debe leerse como “itera desde 180 a 900 en incrementos de 360 enteros”, resultando en los valores 180, 540 y
 932 900), el cual pasamos como argumento del parámetro `threshold`. Finalmente, para cada red generada con
 933 los distintos umbrales, calculamos la longitud de cursos fluviales, actualizamos la base de datos de GRASS
 934 GIS y generamos un archivo de texto resumen que posteriormente importamos a R para obtener estadísticos
 935 básicos.

```

# Extraer redes de drenaje para tres umbrales de acumulación distintos
# En bucle
for i in `echo {180..900..360}`; \
    do echo -e "\nTRABAJANDO EL UMBRAL DE ACUMULACIÓN $i ...\\n"; \
    time r.stream.extract --overwrite elevation=dem_tallado accumulation=rwshed_acum \
        depression=depresiones_todas threshold=$i \

```

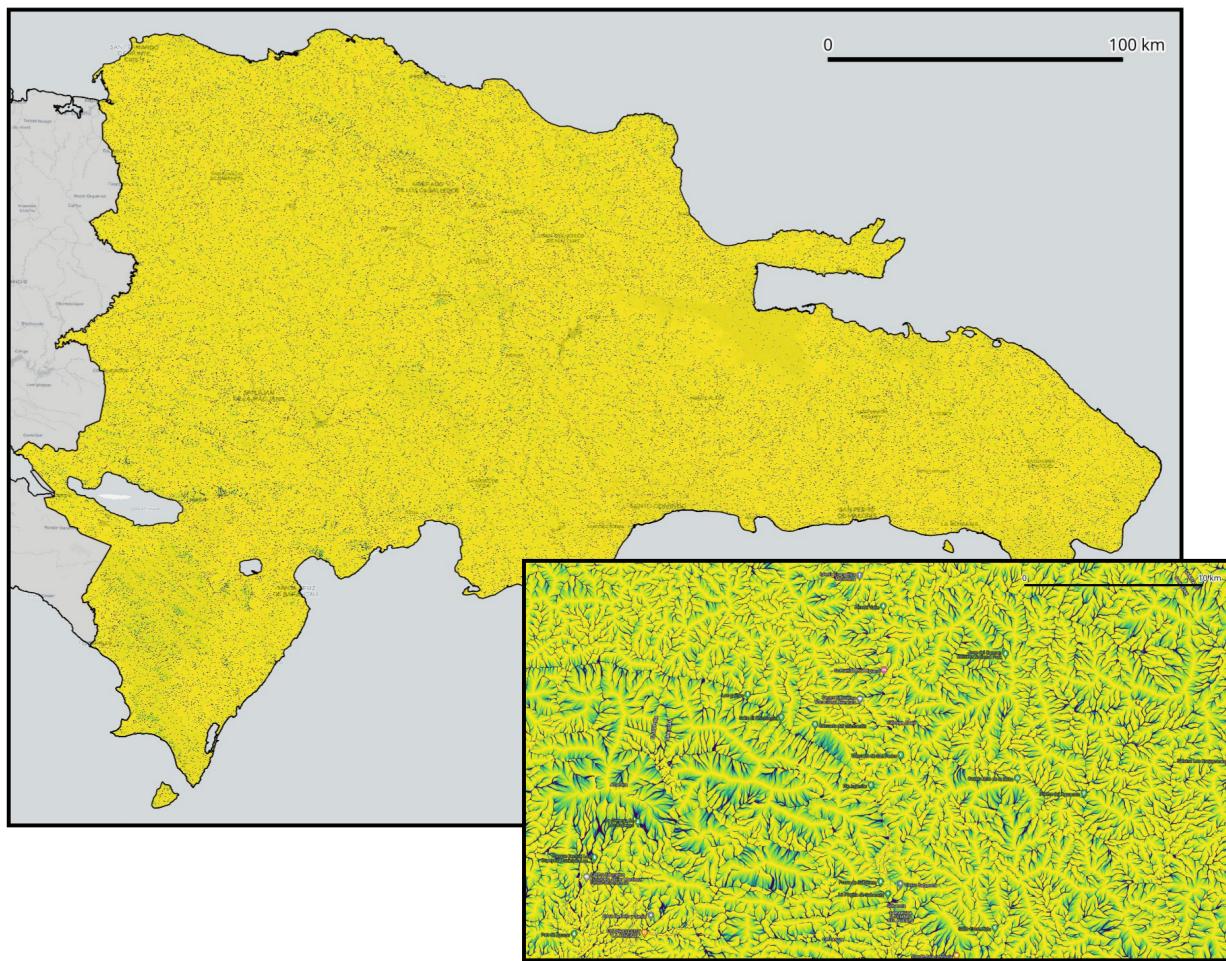


Figura S9: Mapa de acumulación de flujo generado con ‘r.watershed’. En cartela, detalle del mapa en la cuenca del río Yaque del Sur.

```

stream_vector=rstream_talwegs_umbral_$i stream_raster=rstream_talwegs_umbral_$i \
direction=rstream_direccion_umbral_$i memory=32000; \
echo -e "r.stream.extract umbral $i finalizado" |\
mail -s "Mensaje sobre r.stream.extract" USUARIO@MAIL; \
done
## real 11m28.455s
## real 11m26.908s
## real 11m30.074s
# Único umbral, para testing
# time r.stream.extract --overwrite elevation=dem_tallado accumulation=rwshe_acum \
# depression=depresiones_todas threshold=64 \
# stream_vector=rstream_talwegs_umbral_64 stream_raster=rstream_talwegs_umbral_64 \
# direction=rstream_direccion_umbral_64 memory=32000
# echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
## real 11m46.930s
# Calcular estadísticos, y pasar a archivo
for i in `echo {180..900..360}`; \
do v.to.db -p option=length map=rstream_talwegs_umbral_$i > \
stats_length_rstream_talwegs_umbral_$i.txt;
done

```

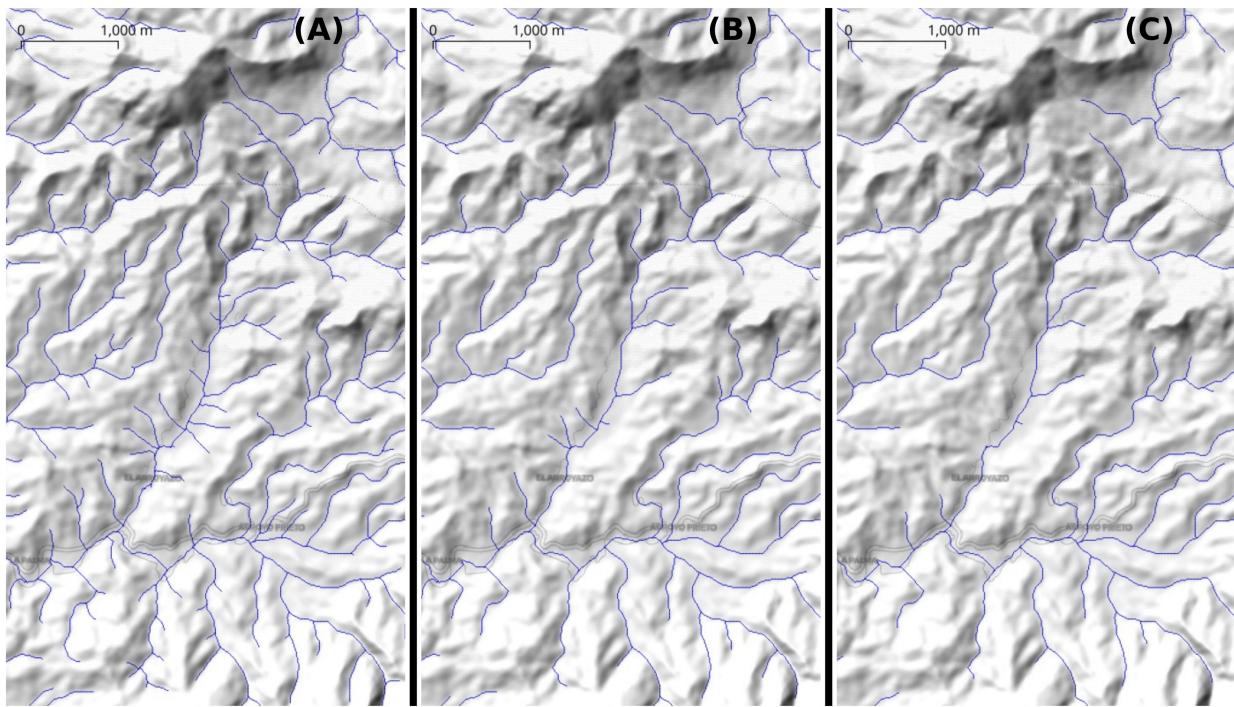


Figura S10: Red de drenaje extraída para tres umbrales de acumulación: (A) 180 celdas, equivalente a 3 ha; (B) 540 celdas, equivalente a 8 ha; (C) 900 celdas, equivalente a 14 ha. La imagen de fondo es un relieve sombreado a partir de DEM ALOS PALSAR, mostrando el área de El Arroyazo en la reserva científica Ébano Verde (provincia La Vega, cordillera Central de República Dominicana)

```

stats_rstream_talwegs <- sapply(as.character(c(180, 540, 900)), function(x)
  read_delim(paste0(dem_proc_dir, '/', 'stats_length_rstream_talwegs_umbral_', x, '.txt')),
  progress = F, show_col_types = F), simplify = F)
n_rstream_talwegs <- stats_rstream_talwegs %>%
  map(~ .x %>% filter(!cat==1) %>% nrow) %>% unlist
length_rstream_talwegs <- stats_rstream_talwegs %>%
  map(~ .x %>% filter(!cat==1) %>% pull(length) %>% sum/1000) %>% unlist
  
```

936 Evaluamos los resultados y recopilamos los estadísticos esenciales de cada red formada con los distintos
 937 umbrales. Para los umbrales de 180, 540 y 900 celdas, se obtuvieron **420010, 192566 y 130278 segmentos**
 938 correspondientemente, acumulando **138476, 98203 y 82054 kilómetros** de longitud en cada caso (estos
 939 valores excluyen una pequeña fracción del total fuera de la máscara). Para cada una de las redes, evaluamos el
 940 grado de alineación con nuestros criterios de selección de la red óptima, tras lo cual elegimos la red generada
 941 con el umbral de acumulación de 540 celdas. Sin embargo, mantuvimos las restantes en la base de datos y
 942 les aplicamos todos los subsiguientes algoritmos de análisis de hidrología computacional, hasta alcanzar los
 943 resultados finales.

944 Posteriormente, calculamos el orden jerárquico de la red hidrográfica, proceso que repetimos para cada uno
 945 de los umbrales de acumulación que definimos previamente, es decir, 180, 540 y 900 celdas. Al igual que
 946 en casos anteriores, utilizamos un bucle en Bash para iterar automáticamente sobre los tres umbrales de
 947 acumulación; en este caso, los valores del índice se correspondían con los sufijos de los mapas de entrada (_\$i).
 948 El núcleo del bucle, en este caso, contiene la ejecución del complemento **r.stream.order** de GRASS GIS.
 949 Este complemento se invoca con una serie de argumentos que especifican los mapas de entrada y salida que
 950 se deben usar en el cálculo. De manera específica, le proporcionamos el mapa de *talwegs* o cursos (parámetro
 951 **stream_rast**), el mapa de dirección de drenaje (**direction**), el mapa de elevación (**elevation**), y el mapa
 952 de acumulación (**accumulation**), todos correspondientes al umbral de acumulación que está siendo procesado
 953 en cada iteración. Adicionalmente, especificamos los nombres de los mapas de salida que contienen el orden

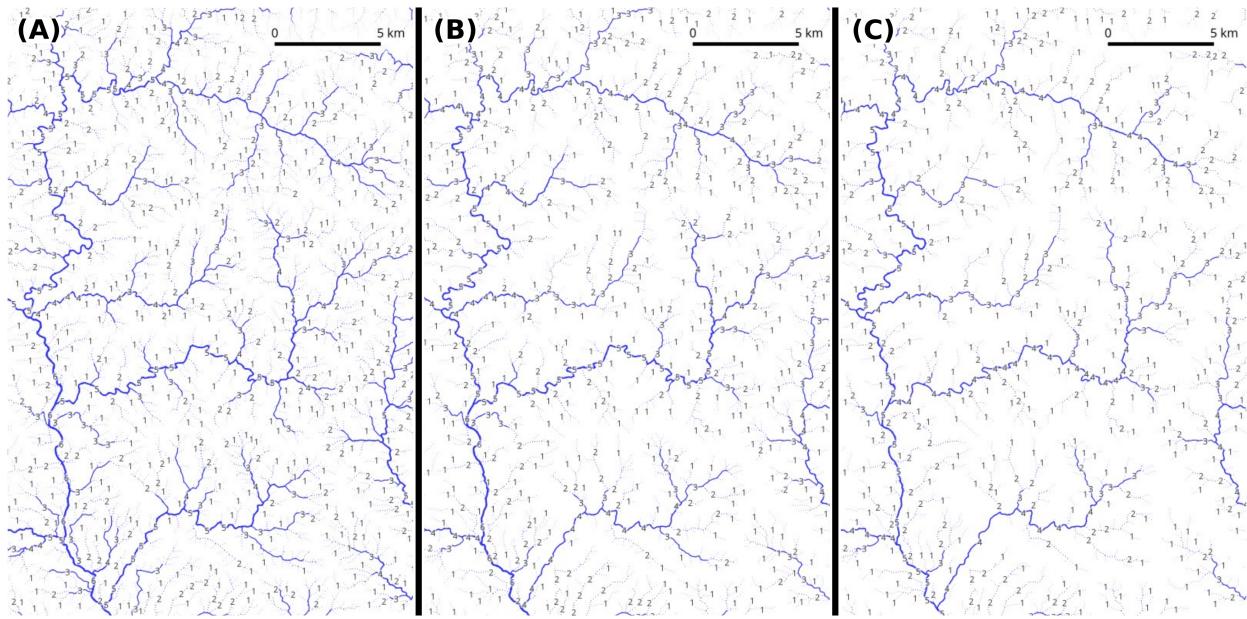


Figura S11: Orden de red de Strahler para redes de drenaje generadas a partir de tres umbrales de acumulación: (A) 180 celdas, equivalente a 3 ha; (B) 540 celdas, equivalente a 8 ha; (C) 900 celdas, equivalente a 14 ha. El área mostrada corresponde al río San Juan, afluente del río Yaque del Sur (vertiente sur de la cordillera Central de República Dominicana)

954 de red según los métodos de Strahler y Horton (argumentos `strahler` y `horton`) (Horton, 1945; Strahler, 955 1957), así como el mapa de topología (`topo`) y el vectorial de salida (`stream_vect`).

```
# Extraer orden de red en bucle
for i in `echo {180..900..360}`; \
  do echo -e "\nTRABAJANDO EL UMBRAL DE ACUMULACIÓN $i ...\\n"; \
    time r.stream.order --overwrite stream_rast=rstream_talwegs_umbral_$i \
      direction=rstream_direccion_umbral_$i \
      elevation=dem_tallado accumulation=rwshed_acum \
      stream_vect=rstream_orden_de_red_umbral_$i \
      strahler=rstream_orden_strahler_de_red_umbral_$i \
      horton=rstream_orden_horton_de_red_umbral_$i \
      topo=topologia_orden_umbral_$i memory=32000; \
    echo -e "r.stream.order umbral de acumulación $i finalizado" \\ \
      mail -s "Mensaje sobre r.stream.order" USUARIO@MAIL; \
done
## real 1m34.983s
## real 1m18.662s
## real 1m14.986s
# Aplicación de algoritmo con un único umbral, sólo para pruebas
# time r.stream.order --overwrite \
#   stream_rast=rstream_talwegs direction=rstream_direccion \
#   elevation=dem_tallado accumulation=rushed_acum stream_vect=order.todos \
#   topo=topologia_orden memory=32000
# echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
```

956 Corregimos la topología con `v.clean`, pero sólo para la red generada con el umbral de acumulación de 540
 957 celdas. Eliminamos los cursos con longitud 0 metros y actualizamos la longitud de cada curso en el campo
 958 `length` usando el complemento `v.to.db`.

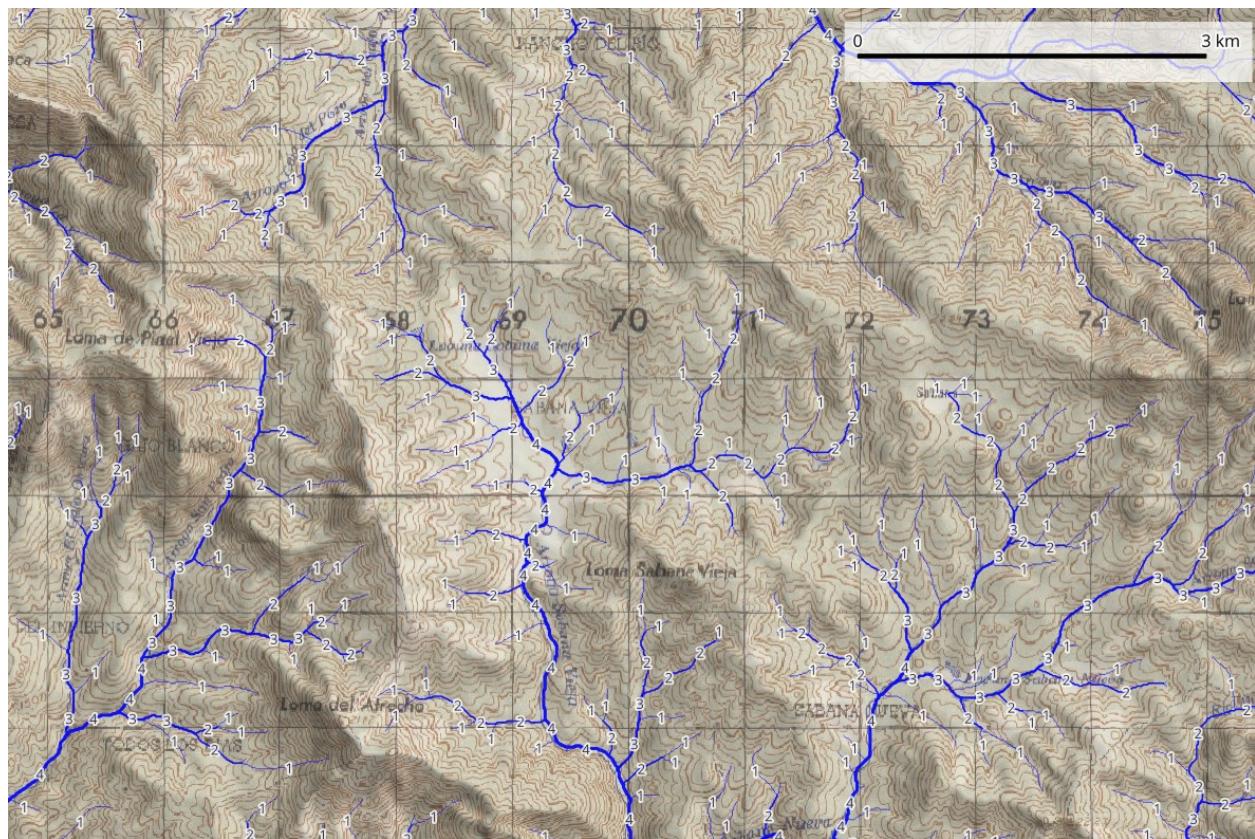


Figura S12: Orden de red de Strahler en el área del pico de la Viuda y Sabana Vieja, provincia San Juan (vertiente sur de la cordillera Central de República Dominicana). Esta red fue generada usando un umbral de acumulación de 180 celdas, equivalente a 3 ha. De fondo, mapa topográfico nacional escala 1:50,000 y relieve sombreado

```
v.clean --overwrite layer=1 \
    input=rstream_orden_de_red_umbral_540 \
    output=rstream_orden_de_red_umbral_540_cleaned \
    tool=rmline
v.to.db --overwrite option=length type=line columns=area \
    map=rstream_orden_de_red_umbral_540_cleaned
```

959 Para completar la caracterización de las redes de drenaje, empleamos dos enfoques distintos: exploración visual
 960 y análisis estadístico. Para la exploración visual, usamos el mapa de la red y lo desplegamos en QGIS. Para la
 961 obtención de resultados analíticos, usamos el addon **r.stream.stats**, con el que calculamos los estadísticos
 962 de las redes jerarquizadas—longitud de tramos, área drenada, pendientes, razón de bifurcación—creadas con
 963 el addon **r.stream.order**. Mostramos a continuación las instrucciones necesarias para obtener los estadísticos
 964 mediante **r.stream.stats**. El archivo de texto resultante lo utilizamos en los análisis estadísticos posteriores
 965 en una sesión de R.

```
# Salida resumen
r.stream.stats --overwrite -o \
    stream_rast=rstream_orden_strahler_de_red_umbral_540 \
    direction=rstream_direccion_umbral_540 \
    elevation=dem_pseudo_ortometrico \
    output=stats_rstream_order_strahler_red_umbral_540_horton.txt \
    memory=32000
# Salida desagregada
r.stream.stats --overwrite \
```

```

stream_rast=rstream Orden_strahler_de_red_umbral_540 \
direction=rstream_direccion_umbral_540 \
elevation=dem_pseudo_ortometrico \
output=stats_rstream_order_strahler_red_umbral_540.txt \
memory=32000

```

966 A continuación, delimitamos cuencas y subcuencas según la jerarquía de red, con independencia de si tratara
 967 de cuencas tributarias o no, para lo cual usamos el complemento **r.stream.basins** especificando la opción
 968 (*flag*) **-c**, que utiliza una secuencia única de categorías (en nuestro caso, órdenes) para delimitar las cuencas
 969 en lugar de flujos de entrada. En este caso, construimos un bucle **for** doble, anidando el orden de red dentro
 970 del umbral de acumulación. Así, para cada uno de los mapas de redes hidrográficas según los tres umbrales
 971 de acumulación, delimitamos las cuencas de cada uno de los órdenes de Strahler disponibles. Al utilizar el
 972 criterio orden de red, las unidades delimitadas por este procedimiento incluyen tanto cuencas completas como
 973 subcuencas (tributarias), por lo que la mayoría contiene redes de drenaje tributarias (ríos que desembocan en
 974 otros ríos).

```

# Delimitar cuencas según jerarquía
# En bucle
time for i in `echo {180..900..360}`; \
  do for j in `echo {1..8..1}`; \
    do echo -e "\nTRABAJANDO EL UMBRAL DE ACUMULACIÓN $i, orden $j...\n"; \
      r.stream.basins -c --overwrite direction=rstream_direccion_umbral_$i \
        stream_rast=rstream Orden_strahler_de_red_umbral_$i cats=$j \
        basins=rstream_cuencas_strahler_umbral_${i}_orden_$j memory=32000; \
      done; \
      echo -e "r.stream.basins umbral de acumulación $i finalizado" |\
        mail -s "Mensaje sobre r.stream.basins" USUARIO@MAIL; \
    done
## real 17m42.238s

```

975 Posteriormente, delimitamos las cuencas con desembocadura en mares, lagos, lagunas o en pérdidas kársticas.
 976 En esta sección aplicamos el mismo complemento que en el paso anterior (**r.stream.basins**) en bucle doble
 977 anidado, pero en esta ocasión especificamos la opción **-l**. Es decir, delimitamos las cuencas completas, cuya
 978 red desemboca en el mar (exorreicas), o en lagos, lagunas y pérdidas del karst (endorreicas), y excluimos las
 979 subcuencas de redes tributarias (eg. red cuyo curso principal desemboca en otro río). Por lo tanto, se trata de
 980 cuencas propiamente en la acepción más formal del término, que significa que no existe—o no se conoce ni se
 981 puede detectar con información disponible—prolongación del drenaje superficial fuera de ellas.

```

# Delimitar cuencas terminales
# En bucle
time for i in `echo {180..900..360}`; \
  do for j in `echo {1..8..1}`; \
    do echo -e "\nTRABAJANDO EL UMBRAL DE ACUMULACIÓN $i, orden $j...\n"; \
      r.stream.basins -lc --overwrite direction=rstream_direccion_umbral_$i \
        stream_rast=rstream Orden_strahler_de_red_umbral_$i cats=$j \
        basins=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_${i}_orden_$j memory=32000; \
      done; \
      echo -e "r.stream.basins umbral de acumulación $i finalizado" |\
        mail -s "Mensaje sobre r.stream.basins" USUARIO@MAIL; \
    done
## real 16m16.808s

```

982 Como último paso en la producción de resultados, convertimos las cuencas a modelo de datos vectorial,
 983 pero para evitar agrandar la base de datos innecesariamente, elegimos sólo las cuencas generadas para el
 984 umbral de 540 celdas. Los vectoriales resultantes nos permitieron un mejor manejo de los datos para análisis
 985 y representación de la cuencas. Describimos el procedimiento detallado a continuación.

986 Comenzamos la vectorización ejecutando un bucle para convertir cada capa ráster de cuencas terminales
 987 correspondiente a cada orden de red (desde 1 a 8) en un mapa vectorial de tipo área. Para realizar esta
 988 conversión, utilizamos el complemento **r.to.vect** de GRASS GIS, añadiendo también una nueva columna

989 llamada **strahler** a la tabla de atributos de cada capa vectorial, que luego actualizamos con el valor del orden
 990 de red Strahler correspondiente. Después de procesar las cuencas de cada orden, fusionamos todas las capas
 991 vectoriales en una sola utilizando el complemento **v.patch**. Esto produjo una única capa vectorial conteniendo
 992 información sobre todas las cuencas terminales para todos los órdenes Strahler. Es importante aclarar que sólo
 993 fueron propiamente clasificadas como polígonos con de orden de red, aquellas las áreas del ráster que contaban
 994 con categorías asignadas (e.g. píxeles con valor 1 a 8), es decir, aquellas a las que el algoritmo **r.stream.basins**
 995 asignó un orden de red debidamente. Las áreas que formaban el fondo (e.g. píxeles con valor cero), que
 996 corresponden a espacios con drenaje hacia depresiones sin pertenencia a jerarquía alguna, conforman la capa
 997 “0” del mapa vectorial generado (**rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned 0**).
 998 Por esta razón, el mapa vectorial de cuencas generado, presenta espacios vacíos; si hiciera falta recuperar
 999 dichos espacios, bastaría con cargar la referida capa “0”, tomando en consideración que sus elementos no
 1000 cuentan con atributos aprovechables.

1001 Luego, limpiamos y preparamos los datos para el análisis. Primero, corregimos la topología y actualizamos el
 1002 área de cada cuenca usando el complemento **v.clean**. Eliminamos las áreas inferiores a 4000 m² (cuencas
 1003 espurias) para mejorar la calidad de los datos. Posteriormente, eliminamos los registros con un valor de área
 1004 nulo (artefactos). Estas etapas de limpieza y preparación son críticas para garantizar la precisión y relevancia
 1005 de nuestros resultados.

1006 Finalmente, seleccionamos las filas válidas—las que tenían un valor de categoría distinto de -1—de la tabla
 1007 de atributos de nuestra capa vectorial final, y exportamos estos datos a un archivo de texto. Este archivo de
 1008 texto contiene estadísticas del área para cada cuenca terminal según orden Strahler, lo cual nos proporcionó
 1009 información valiosa para nuestro análisis posterior.

```
# Cuencas y subcuenca según orden
time for i in `echo {1..8..1}`; \
  do echo -e "\nTRABAJANDO EL ORDEN $i...\n"; \
    r.to.vect --overwrite input=rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_$i \
      output=rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_$i type=area; \
    v.db.addcolumn rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_$i \
      columns="strahler int"; \
    v.db.update rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_$i \
      col=strahler value=$i where="strahler IS NULL"; \
    # Calcular estadísticos, y pasar a archivo
    ## Preparación de fuentes (corrección de topología >
    ##                         actualización de área >
    ##                         eliminar registros)
    v.clean --overwrite layer=1 \
      input=rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_$i \
      output=foo \
      tool=rmarea threshold=4000
    v.to.db --overwrite option=area type=centroid columns=area \
      map=foo
    v.db.droprow --overwrite \
      input=foo \
      output=rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_$i where="area IS NULL"
    g.remove -f type=vector \
      name=foo
done
## real 19m7.443s

# Limpiando las cuencas de órdenes 2 y 3 de menos de 60,000 m2
for i in `echo {2..3..1}`; \
  do v.db.droprow --overwrite \
    input=rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_$i \
    output=foo \
    where="area <= 6e4";
    g.rename --overwrite \
      vector=foo,rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_$i; \
```

```

g.remove -f type=vector name=foo; \
done

# Cuencas terminales
time for i in `echo {1..8..1}`; \
do echo -e "\nTRABAJANDO EL ORDEN $i...\n"; \
r.to.vect --overwrite input=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_orden_$i \
output=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_orden_$i type=area; \
v.db.addcolumn rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_orden_$i \
columns="strahler int"; \
v.db.update rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_orden_$i \
col=strahler value=$i where="strahler IS NULL"; \
done
# Tiempo estimado: 3m

# Unir cuencas terminales
v.patch -e --overwrite \
input=`g.list type=v pattern='rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_orden_*' \
separator=comma` \
output=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos

# Corregir topología, excluir espurias, calcular estadísticos, y pasar a archivo
## Corrección de topología
v.clean --overwrite layer=1 input=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos \
output=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned \
tool=rmarea threshold=4000
## Actualización de área
v.to.db --overwrite option=area type=centroid columns=area \
map=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned
## Eliminar registros
v.db.droprow --overwrite rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned \
output=foo where="area IS NULL"
## Renombrar mapa a original
g.rename --overwrite \
vector=foo,rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned
## Eliminar temporal
g.remove -f type=vector name=foo
## Excluir cuencas strahler>=4 y area<=1e6
v.db.droprow --overwrite rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned \
output=foo \
where="strahler >= 4 and area <= 1e6"
## Renombrar mapa a original
g.rename --overwrite \
vector=foo,rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned
## Eliminar temporal
g.remove -f type=vector name=foo
## Generar tabla
v.db.select --overwrite rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned \
where='cat!=1' > stats_area_rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos.txt

# Generar salidas GPKG y SHP para cuencas terminales
## Exportar el mapa 'rstream_orden_de_red_umbral_540_cleaned' a GeoPackage
v.out.ogr --overwrite \
input=rstream_orden_de_red_umbral_540_cleaned \
output=gpkg-shp/rstream_orden_de_red_umbral_540_cleaned.gpkg \

```

```

type=line \
format=GPKG
## Exportar el mapa 'rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned'
## a GeoPackage
v.out.ogr --overwrite \
input=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned \
output=gpkg-shp/rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned.gpkg \
type=area \
format=GPKG
## Exportar el mapa 'rstream_orden_de_red_umbral_540_cleaned' a Shapefile
## Nota: algunos valores de área de objetos no se transfieren bien al formato SHP
ogr2ogr -f "ESRI Shapefile" \
gpkg-shp/rstream_orden_de_red_umbral_540_cleaned.shp \
gpkg-shp/rstream_orden_de_red_umbral_540_cleaned.gpkg
## Exportar el mapa 'rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned'
## a Shapefile
## Nota: algunos valores de área de objetos no se transfieren bien al formato SHP
ogr2ogr -f "ESRI Shapefile" \
gpkg-shp/rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned.shp \
gpkg-shp/rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned.gpkg

# Generar salidas GPKG y SHP para cuencas y subcuencas
## Exportar mapas 'rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_$i' a GeoPackage
for i in `echo {1..8..1}`; \
do echo -e "\nTRABAJANDO EL ORDEN $i...\n"; \
v.out.ogr --overwrite \
input=rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_$i \
output=gpkg-shp/rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_$i.gpkg \
type=area \
format=GPKG
done

```

```

stats_rstream_cuencas_540 <- read_delim(
  paste0(dem_proc_dir, '/'),
  'stats_area_rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos.txt'),
  progress = F, show_col_types = F) %>%
  rename(`Orden de red (Strahler)` = strahler)
stats_rstream_cuencas_540_estadisticos <- stats_rstream_cuencas_540 %>%
  group_by(`Orden de red (Strahler)`) %>%
  summarise(`Número de cuencas` = n(),
            `Área promedio (km$^2$)` = mean(area),
            `Área promedio (km$^2$), error est.` = sd(area)/sqrt(length(area)),
            `Área total (km$^2$)` = sum(area))
rstream_cuencas_540_por_orden_tabla <- stats_rstream_cuencas_540_estadisticos %>%
  mutate_at(vars(starts_with("Área")), list(~./1000000)) %>%
  mutate(across(where(is.numeric), ~ signif(.x, digits = 4))) %>%
  mutate(`Área promedio (km$^2$) (error est.)` = paste0(
    `Área promedio (km$^2$)`, ',',
    `Área promedio (km$^2$), error est.`, ')')
)) %>%
  select(-`Área promedio (km$^2$)`, -`Área promedio (km$^2$), error est.`) %>%
  adorn_totals(,,,, matches('Número|total'))
rstream_cuencas_540_por_orden_p <- stats_rstream_cuencas_540_estadisticos %>%
  ggplot + aes(x = `Orden de red (Strahler)`, y = `Número de cuencas`) +
  geom_line() + ylab('Número de cuencas (log2)') +
  scale_y_continuous(trans='log2')

```

```
theme_bw() +
theme(text = element_text(size = 18))
```

1010 4.1. Suplemento para la sección “Resultados”

1011 Realizamos análisis estadísticos de las cuencas terminales. Se necesita descargar el comprimido con los datos
 1012 del estudio, colocar el directorio `gpkg-shp` en el directorio raíz de este repo. Como medida de seguridad,
 1013 excluimos cuencas con orden de red cuatro o mayor y con área menor 1^2 . Posteriormente, generamos un
 1014 nuevo objeto de cuencas de orden cuatro o mayor para análisis focalizados, así como objetos de cuencas y
 1015 subcuencas de todos los órdenes, y obtuvimos estadísticos básicos (la asimetría y la curtosis son G_1 y G_2 ,
 1016 respectivamente, del trabajo de Joanes y Gill (1998)).

```
# Cuencas terminales
cuencas <- st_read(
  dsn = 'gpkg-shp/rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned.gpkg',
  quiet = T)
cuencas4mas <- cuencas[cuencas$strahler >= 4, ]
# Cuencas y subcuencas
cuencas_subcuencas <- sapply(as.character(1:8), function(x) {
  st_read(
    dsn = paste0('gpkg-shp/rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_', x, '.gpkg'),
    quiet = T)
  }, USE.NAMES = T, simplify = F)
cuencas_sub_areas_ordenes <- map(cuencas_subcuencas,
  ~ .[['area']] %>% st_drop_geometry %>%
    pull(area) %>% as_tibble %>%
    mutate(`Área (kilómetros cuadrados)` = value/1e6,
          `Área (hectáreas)` = value/1e4) %>%
    rename(`Área (metros cuadrados)` = value)) %>%
  bind_rows(.id = 'Orden de red')
cuencas_sub_areas_ordenes_r <- cuencas_sub_areas_ordenes %>%
  group_by(`Orden de red`) %>%
  summarise(describe(`Área (kilómetros cuadrados)`, type = 2)) %>%
  select(-`vars`, -trimmed, -mad, -se) %>%
  select(`Orden de red`, `Número` = n, `Media (km${^2}$)` = mean,
        `Mediana (km${^2}$)` = median, `Desv. estándar (km${^2}$)` = sd,
        `Mínimo (km${^2}$)` = min, `Máximo (km${^2}$)` = max,
        `Rango (km${^2}$)` = range, `Sesgo` = skew,
        `Curtosis` = kurtosis)
cuencas_sub_areas_ordenes_p <- cuencas_sub_areas_ordenes %>%
  mutate(`tamaño` = scales::rescale(as.numeric(`Orden de red`), to = c(1, 10))) %>%
  ggplot +
  aes(x = `Orden de red`, y = `Área (kilómetros cuadrados)`) +
  geom_jitter(alpha = 0.2, height = 0, width = 0.05
              , aes(color = `Orden de red`, fill = `Orden de red`, size = `tamaño`))
  ) +
  geom_violin(alpha = 0.6, width = 0.8, color = "transparent", fill = "gray"
              , aes(color = `Orden de red`))
  ) +
  geom_boxplot(alpha = 0, width = 0.3, color = "#808080") +
  scale_y_continuous(trans = 'log2', labels = decimales_y_enteros) +
  scale_size_continuous(range = c(1,3)) +
  theme_bw() +
  theme(legend.position = 'none', text = element_text(size = 18))
png('figuras/cuencas-subcuencas-areas-ordenes-boxplot.png',
  width = 3500, height = 2400, res = 450)
cuencas_sub_areas_ordenes_p
invisible(dev.off())
```

1017 Obtuvimos los mapas de cuencas y subcuencas para cada orden con el paquete `tmap`. Primero, extrajimos
 1018 los límites del país hacia el directorio `gpkg-shp` para disponer de un contexto en los mapas generados a
 1019 continuación.

```
# Generar GPKG de país
v.out.ogr --overwrite \
  input=mascara \
  output=gpkg-shp/mascara.gpkg \
  type=area \
  format=GPKG
```

1020 Importamos la máscara, y generamos los campos necesarios para realizar el panel de mapas de las cuencas y
 1021 subcuencas de cada orden (8 mapas). Para ello, a partir de la lista de objetos `sf` conteniendo las cuencas y
 1022 subcuencas, generamos un objeto único y convertimos de metros a kilómetros cuadrados. Posteriormente,
 1023 generamos el objeto de panel de mapas con `tmap`.

```
# Máscara
mascara <- st_read('gpkg-shp/mascara.gpkg')
```

```
## 1024 ## Reading layer 'mascara' from data source
##   1025 '/media/jose/datos/alo-palsar-dem-rd/dem/gpkg-shp/mascara.gpkg'
##     1026 using driver 'GPKG'
## Simple feature collection with 5 features and 17 fields
## Geometry type: POLYGON
## Dimension: XY
## Bounding box: xmin: 182215.8 ymin: 1941044 xmax: 571429.3 ymax: 2205216
## Projected CRS: WGS 84 / UTM zone 19N
```

```
# Objeto sf de las cuencas de todos los órdenes
cuencas_sub_areas_ordenes_sf <- map(cuencas_subcuencas, ~.[`area`]) %>%
  mutate(`Área (kilómetros cuadrados)` = area/1e6,
        `Área (hectáreas)` = area/1e4) %>%
  rename(`Área (metros cuadrados)` = area)) %>%
  bind_rows(.id = 'Orden de red')
# Objeto sf de los linderos de las cuencas, en objeto de tipo MULTILINESTRING
cuencas_sub_areas_ordenes_lines_sf <- cuencas_sub_areas_ordenes_sf %>%
  select(orden = `Orden de red`) %>%
  mutate(grosor = ifelse(orden %in% 1:3, 0, 0.1)) %>%
  mutate(orden = paste('Orden', orden)) %>%
  st_cast('MULTILINESTRING')
# Mapa en tmap
cuencas_sub_areas_ordenes_tm <- cuencas_sub_areas_ordenes_sf %>%
  select(orden = `Orden de red`, `km cuad.` = `Área (kilómetros cuadrados)`) %>%
  mutate(grosor = ifelse(orden %in% 1:2, 0.0001, 0.1)) %>%
  mutate(orden = paste('Orden', orden)) %>%
  tm_shape() +
  tm_fill(col='km cuad.', palette = "YlOrBr", style = 'quantile') +
  tm_facets(by = "orden", ncol = 2, nrow = 4, free.coords = FALSE, free.scales = TRUE) +
  tm_shape(cuencas_sub_areas_ordenes_lines_sf) +
  tm_lines(lwd = 'grosor', col = 'grey80', legend.lwd.show = F) +
  tm_facets(by = "orden", ncol = 2, nrow = 4, free.coords = FALSE, free.scales = TRUE) +
  tm_layout(panel.label.size = 2.5, legend.stack = "horizontal",
            legend.title.size = 2, legend.text.size = 1.5) +
  tm_shape(shp = mascara) +
  tm_borders(col = 'black', lwd = 0.8)
```

1032 El bloque de código a continuación no se reproduce durante el tejido, pues la exportación del mapa a formato
 1033 PNG consume varios minutos de cómputo, lo cual retardaría innecesariamente el tejido. Se recomienda
 1034 ejecutarlo manualmente cuando se necesite actualizar el panel de mapas de las cuencas y subcuencas según
 1035 órdenes generado por `tmap`.

```

# Mapa en PNG
tmap_save(
  tm = cuencas_sub_areas_ordenes_tm,
  filename = "figuras/cuencas-subcuenca-areas-ordenes.png",
  width = 3000, height = 4200, dpi = 200)

1036 Visualizamos la red a partir del archivo fuente correspondiente (nombre raíz
1037 rstream_orden_de_red_umbral_540_cleaned), localizado en el directorio gpkg-shp del conjunto de
1038 datos suplementarios (existen dos versiones idénticas en formatos GeoPackage y Shapefile). También
1039 probamos con el mapa del mismo nombre desde la base de datos de GRASS GIS en QGIS, lo cual resultó ser
1040 más eficiente. Adicionalmente, cargamos los estadísticos hortonianos y desagregados de la red, generados con
1041 el addon r.stream.stats, a la sesión de R, para posteriormente explorar patrones a escala nacional y según
1042 órdenes de red.

redes_ord_nombres_columnas <- c(
  'Orden de red', 'Número de cursos', 'Longitud promedio (km)',
  'Área promedio (km$^2$)', 'Pendiente promedio, celda a celda (m/m)',
  'Gradiente promedio, nacimiento a desembocadura (m/m)',
  'Diferencia de elevación promedio (m)',
  'Longitud total (km)', 'Área total (km$^2$)')
)

# Horton
redes_ord_horton <- read.csv(
  file = 'estadisticos/stats_rstream_order_strahler_red_umbral_540_horton.txt',
  skip = 1, header = TRUE) %>%
  setNames(redes_ord_nombres_columnas)
# Razón de bifurcación a partir de promedio
redes_ord_horton_rb_prom <- with(
  data = redes_ord_horton,
  expr = mean(`Número de cursos`[-length(`Número de cursos`)])/
    `Número de cursos`[-1]))
# Razón de bifurcación a partir de coeficientes de regresión
redes_ord_horton_rb_regr <- 1/10^lm(log10(`Número de cursos`) ~ `Orden de red`,
  data = redes_ord_horton)$coefficients[[2]])
# Globales
redes_res <- extraer_rstream_stats(
  archivo = 'estadisticos/stats_rstream_order_strahler_red_umbral_540.txt',
  inicio = 3, fin = 5, dos_filas = T) %>%
  setNames(c(
    'Orden máximo', 'Número total de cursos', 'Longitud total de cursos',
    'Área total (km$^2$)', 'Densidad de drenaje (km/km$^2$)', 'Frecuencia de cursos (num/km$^2$)'))
)
redes_res_dd <- redes_res$`Densidad de drenaje (km/km$^2$)`-
# Según órdenes: promedios de longitud, área,
# pendiente/gradiante y diferencia de elevación
redes_ord_long_area_pend_ele <- extraer_rstream_stats(
  archivo = 'estadisticos/stats_rstream_order_strahler_red_umbral_540.txt',
  inicio = 16, fin = 25, dos_filas = T) %>%
  setNames(redes_ord_nombres_columnas[c(1,3:7)])
# Según órdenes: desviaciones estándar de longitud,
# área, pendiente/gradiante y diferencia de elevación
redes_ord_long_area_pend_ele_desv <- extraer_rstream_stats(
  archivo = 'estadisticos/stats_rstream_order_strahler_red_umbral_540.txt',
  inicio = 27, fin = 36, dos_filas = T) %>%
  setNames(c(
    redes_ord_nombres_columnas[1],
    paste(redes_ord_nombres_columnas[c(3:7)], '($\\sigma$)'))))
# Según órdenes: totales de número de cursos, longitud y área
redes_ord_totales_num_long_area <- extraer_rstream_stats(

```

```

archivo = 'estadisticos/stats_rstream_order_strahler_red_umbral_540.txt',
inicio = 38, fin = 47, dos_filas = F) %>%
setNames(c(
  redes_ord_nombres_columnas[1:2],
  redes_ord_nombres_columnas[8:9])
)
# Unir estadísticos según órdenes
redes_ord_final <- Reduce(function(x, y) merge(x, y, by = "Orden de red"),
                           list(redes_ord_long_area_pend_ele,
                                redes_ord_long_area_pend_ele_desv,
                                redes_ord_totales_num_long_area))

# Razones, cocientes, ratios (bifurcación, longitud, pendiente, densidad de drenaje, frecuencia)
redes_ord_razones <- extraer_rstream_stats(
  archivo = 'estadisticos/stats_rstream_order_strahler_red_umbral_540.txt',
  inicio = 48, fin = 57, dos_filas = F) %>%
setNames(
  c(
    redes_ord_nombres_columnas[1],
    'Razón de bifurcación',
    paste('Razón de',
          tolower(
            gsub(' promedio| \\\(.*$|, celda.*$|, nacimiento.*$', '',
                 redes_ord_nombres_columnas[3:6]))),
    'Densidad de drenaje (km/km$^2$)',
    'Frecuencia de cursos'
  )
)
asignar_valores_df_a_objetos(
  df = redes_ord_razones %>%
    select(matches('orden|bifurca|densidad')),
  nombre_dataset = 'razones',
  agrupar_por = 'Orden de red',
  forzar = T)

```

1043 A continuación, generamos tablas y gráficos relevantes de las variables de red.

```

# Primero calculamos los errores estándar de cada variable
redes_ord_final_con_ee <- redes_ord_final %>%
  inner_join(
    redes_ord_final %>%
      select(matches("Orden de red|Número de cursos|sigma")) %>%
      pivot_longer(
        cols = -c(`Número de cursos`, `Orden de red`),
        names_to = c("variable", ".value"),
        names_pattern = "(.)(\\(\\$\\\\\\sigma\\$\\))") %>%
      mutate(
        se = `($\\sigma$)` / sqrt(`Número de cursos`)) %>%
      pivot_wider(
        id_cols = c(`Orden de red`, `Número de cursos`),
        names_from = variable,
        values_from = se,
        names_glue = "{variable} (error est.)") %>%
      relocate(`Número de cursos`, `Longitud total (km)``,
               `Área total (km$^2$)`, .after = 'Orden de red')
  # Luego generamos una tabla sólo con promedios y errores estándar
  redes_ord_final_promedios_ee <- redes_ord_final_con_ee %>%
    select(matches('Orden|Número|total|promedio|error est.'),
           -matches('sigma'))

```

```

# Generar objetos resumen para RMD
asignar_valores_df_a_objetos(
  df = redes_ord_final_promedios_ee %>%
    select(matches('orden|numero|promedio.*\\$|promedio.*\\$\\$')), 
  nombre_dataset = 'redes_ord_final_promedios_ee',
  forzar = T)

1044 ## Sin agrupamiento especificado. Devolviendo resultados por filas

## Borrar objetos RR_* (sólo para uso interactivo)
# rm(list = grep('RR_*', ls(), value = T))

# Finalmente una tabla resumen reorganizada
redes_ord_final_promedios_ee_r <- redes_ord_final_promedios_ee %>%
  select(matches('Orden|promedio|error est.')) %>%
  rename_with(.cols = matches('m\\$|2\\$\\$'), ~ paste0(., ' (promedio)')) %>%
  pivot_longer(
    cols = `Orden de red`,
    names_to = c(".value", "medida"),
    names_pattern = "(.*)" \\((.*)_\\$"
  ) %>%
  pivot_longer(
    cols = -c(`Orden de red`, `medida`),
    names_to = 'variable',
    values_to = 'valor') %>%
  pivot_wider(names_from = 'medida', values_from = 'valor') %>%
  mutate(`Orden de red` = as.factor(`Orden de red`))
# Tabla totales
redes_ord_final_totales_tabla <- redes_ord_final_promedios_ee %>%
  select(`Orden de red`, `Número de cursos`,
    `Longitud total (km)` %>%
  mutate(`Orden de red` = factor(`Orden de red`)) %>%
  adorn_totals()
redes_ord_final_totales_tabla_total_cursos <- with(
  redes_ord_final_totales_tabla,
  `Número de cursos`[`Orden de red` == "Total"])
redes_ord_final_totales_tabla_total_longitud <- with(
  redes_ord_final_totales_tabla,
  `Longitud total (km)`[`Orden de red` == "Total"])
redes_ord_final_totales_tabla_total_cursos_1a4 <- sum(with(
  redes_ord_final_totales_tabla,
  `Número de cursos`[`Orden de red` %in% 1:4]))
redes_ord_final_totales_tabla_total_longitud_1a4 <- sum(with(
  redes_ord_final_totales_tabla,
  `Longitud total (km)`[`Orden de red` %in% 1:4]))
redes_ord_final_totales_orden_max <- max(
  as.integer(redes_ord_final_promedios_ee$`Orden de red`))
# Tabla promedios
redes_ord_final_promedios_ee_r_tabla <- redes_ord_final_promedios_ee_r %>%
  mutate(`Promedio (error est.)` = paste0(
    signif(promedio, 2), ' (',
    signif(`error est.`, 1), ')')) %>%
  select(-promedio, -`error est.`) %>%
  mutate(variable = gsub(
    ' promedio|, celda a celda|, nacimiento a desembocadura', ' ', variable)) %>%
  pivot_wider(

```

```

names_from = 'variable',
values_from = 'Promedio (error est.)')
# Gráfico
redes_ord_final_promedios_ee_r_p <- redes_ord_final_promedios_ee_r %>%
  mutate(variable = factor(
    x = variable,
    levels = c(
      "Longitud promedio (km)",
      "Área promedio (km$^2$)",
      "Pendiente promedio, celda a celda (m/m)",
      "Gradiente promedio, nacimiento a desembocadura (m/m)",
      "Diferencia de elevación promedio (m)"
    ),
    labels = c(
      "Longitud~(km)",
      "Área~(km$^2$)",
      "atop('Pendiente', 'celda a celda (m/m)'),",
      "atop('Gradiente desde nacimiento', 'a desembocadura (m/m)'),",
      "Diferencia-de-elevación~(m)"
    )))
  %>%
ggplot + aes(x=`Orden de red`, y = promedio) +
  geom_errorbar(
    aes(ymin = promedio - `error est.`, ymax = promedio + `error est.`),
    colour = "grey30", width = .3) +
  geom_point(size=2, shape=21, fill="white") +
  facet_wrap(~ variable, scales = 'free_y', nrow = 1,
             labeller = label_parsed) +
  ylab('valor') +
  theme_bw()
png('figuras/variables-de-redes-segun-ordenes.png', width = 3000, height = 1000, res = 300)
redes_ord_final_promedios_ee_r_p
invisible(dev.off())

```

1045 También calculamos los cursos más largos de ríos dominicanos seleccionados con el complemento `r.accumulate`.
 1046 Como criterio de selección, elegimos ríos de orden seis o mayores, de forma general, pero también incluimos
 1047 otros de orden cinco y uno de orden cuatro, para garantizar mayor representatividad en el territorio
 1048 dominicano. De los ríos seleccionados, digitalizamos sus desembocaduras manualmente, observando el mapa
 1049 de dirección de flujo y la red extraída con `r.stream.extract`. Este paso nos permitió elegir un punto idóneo
 1050 de desembocadura, pues el algoritmo `r.accumulate` no admite puntos fuera de la red ni puntos sin flujo
 1051 dirigido. Este proceso podíamos hacerlo automáticamente, pero preferimos la edición manual, dado que nos
 1052 permitió recorrer la red íntegramente, y porque nos permitió elegir sitios de desembocadura personalizados
 1053 para asegurar extraer cursos representativos.

```

# Importar desembocaduras
v.import --overwrite input=desembocaduras-rios-grandes.gpkg \
  output=desembocaduras_rios_grandes
# Generar cursos más largos
time r.accumulate --overwrite \
  direction=rstream_direccion_umbral_540 \
  outlet=desembocaduras_rios_grandes \
  outlet_id_column=cat id_column=lfp_id \
  longest_flow_path=cursos_mas_largos
# real 0m33.792s
# Actualizar base de datos con la longitud de los cursos
v.to.db --overwrite option=length type=line columns=longitud \
  map=cursos_mas_largos
# Obtener los nombres de los cursos desde el mapa de desembocaduras
# mediante unión a través de los campos cat-lfp_id
v.db.join \

```

```

map=cursos_mas_largos column=lfp_id \
other_table=desembocaduras_rios_grandes other_column=cat subset_columns=nombre

# Generar salidas GPKG y SHP para cursos más largos y sus desembocaduras
## Exportar el mapa 'cursos_mas_largos' a GeoPackage
v.out.ogr --overwrite \
    input=cursos_mas_largos \
    output=gpkg-shp/cursos_mas_largos.gpkg \
    type=line \
    format=GPKG
## Exportar el mapa 'cursos_mas_largos' a Shapefile
## Nota: algunos valores de área de objetos no se transfieren bien al formato SHP
ogr2ogr -f "ESRI Shapefile" \
    gpkg-shp/cursos_ = .shp \
    gpkg-shp/cursos_mas_largos.gpkg
## Exportar el mapa 'desembocaduras_rios_grandes' a GeoPackage
v.out.ogr --overwrite \
    input=desembocaduras_rios_grandes \
    output=gpkg-shp/desembocaduras_rios_grandes.gpkg \
    type=point \
    format=GPKG
## Exportar el mapa 'cursos_mas_largos' a Shapefile
## Nota: algunos valores de área de objetos no se transfieren bien al formato SHP
ogr2ogr -f "ESRI Shapefile" \
    gpkg-shp/desembocaduras_rios_grandes.shp \
    gpkg-shp/desembocaduras_rios_grandes.gpkg

```

- 1054 Importamos los cursos más largos generados a R, eliminando a su vez los duplicados.

```

# Cursos más largos
cursos_mas_largos <- st_read(
  dsn = 'gpkg-shp/cursos_mas_largos.gpkg',
  quiet = T)
# Eliminar duplicados
cursos_mas_largos_sindup <- cursos_mas_largos[!duplicated(cursos_mas_largos$lfp_id),]

```

- 1055 A continuación, recuperamos los atributos de las cuencas a las que pertenecen los cursos más largos seleccionados. Para esto fue necesario quitar algunos nodos en las puntas de los cursos más largos con la función personalizada `quitar_puntas`, para asegurarnos de que los cursos se inscribían íntegramente en las cuencas.

```

# Crear una copia
cursos_mas_largos_sin_puntas <- cursos_mas_largos_sindup

# Recorremos cada línea en el objeto sf
for (i in seq_len(nrow(cursos_mas_largos_sin_puntas))) {
  # Extraer la línea actual
  linea_actual <- cursos_mas_largos_sin_puntas[i,]

  # Quitar los nodos
  linea_modificada <- quitar_puntas(st_geometry(linea_actual), n = 500)

  # Actualizar la línea en el objeto sf
  st_geometry(cursos_mas_largos_sin_puntas)[i] <- linea_modificada
}

```

- 1058 Posteriormente, realizamos la correspondiente unión espacial y generamos un objeto de cursos más largos completo, que incluye la información original y la de las cuencas en las que se inscriben. Exportamos a formato GeoPackage el objeto con información de cuencas.

```
# Unión espacial con cuencas para obtener sus atributos
cursos_mas_largos_sin_puntas_cuencas <- st_join(
  x = cursos_mas_largos_sin_puntas,
  y = cuencas4mas %>% select(-value, -label) %>% rename(id_cuenca = cat),
  join = st_covered_by)

# Objeto completo con datos de cuenca
cursos_mas_largos_completo <- cursos_mas_largos_sindup %>%
  inner_join(cursos_mas_largos_sin_puntas_cuencas %>% st_drop_geometry()) %>%
  mutate(`nombre_y_strahler` = paste0(nombre, ' (orden ', strahler, ')'))
st_geometry(cursos_mas_largos_completo) <- 'geometry'
st_write(
  obj = cursos_mas_largos_completo, delete_dsn = T,
  dsn = 'gpkg-shp/cursos_mas_largos_con_info_cuencas.gpkg')
```

```
1061 ## Deleting source 'gpkg-shp/cursos_mas_largos_con_info_cuencas.gpkg' using driver 'GPKG'
1062 ## Writing layer 'cursos_mas_largos_con_info_cuencas' to data source
1063 ##   'gpkg-shp/cursos_mas_largos_con_info_cuencas.gpkg' using driver 'GPKG'
1064 ## Writing 35 features with 8 fields and geometry type Line String.
```

```
# Generar mapa
cursos_mas_largos_completo_p <- cursos_mas_largos_completo %>%
  mutate(etiqueta = str_replace(nombre_y_strahler, "\\\(o", "\n\\(o")) %>%
  mutate(etiqueta = str_replace(etiqueta, 'Macabónrito', 'Macaboncito')) %>%
  mutate(etiqueta = str_wrap(nombre_y_strahler, width = 15)) %>%
  ggplot + aes() +
  geom_sf(data = mascara, fill = 'transparent',
         color = 'grey50', lwd = 0.6) +
  geom_sf(color = 'blue', lwd = 0.6) +
  # ggsflabel::geom_sf_label_repel(
  #   aes(label = etiqueta), fontface = 'bold', colour = 'grey30',
  #   size = 3, fill = alpha("white", 0.7), max.overlaps = 15,
  #   force = 50, seed = 60) +
  ggsflabel::geom_sf_text_repel(
    aes(label = etiqueta), fontface = 'bold', colour = alpha('black', 0.7),
    size = 3, bg.colour = alpha("white", 0.3), bg.r = .2, max.overlaps = 15,
    force = 40, seed = 60) +
  theme_bw() +
  theme(plot.title = element_text(size = 11)) +
  ggspatial::annotation_scale(style = 'ticks')
png('figuras/cursos-mas-largos.png',
  width = 3500, height = 2400, res = 300)
cursos_mas_largos_completo_p
invisible(dev.off())
# Tabla
cursos_mas_largos_completo_tabla <- cursos_mas_largos_completo %>%
  st_drop_geometry() %>%
  arrange(desc(longitud)) %>%
  mutate(longitud = signif(longitud/1000, digits = 4)) %>%
  select(Nombre = nombre, `Longitud (km)` = longitud, `Orden máximo` = strahler)
# Generar objetos resumen para RMD
asignar_valores_df_a_objetos(
  df = cursos_mas_largos_completo_tabla,
  nombre_dataset = 'clargos',
  agrupar_por = 'Nombre', forzar = T)
## Borrar objetos RR_* (sólo para uso interactivo)
# rm(list = grep('RR_*', ls(), value = T))
```

1065 Informe de la sesión de R

```

sessionInfo()

1066 ## R version 4.3.0 (2023-04-21)
1067 ## Platform: x86_64-pc-linux-gnu (64-bit)
1068 ## Running under: Ubuntu 20.04.3 LTS
1069 ##
1070 ## Matrix products: default
1071 ## BLAS:    /usr/lib/x86_64-linux-gnublas/libblas.so.3.9.0
1072 ## LAPACK:  /usr/lib/x86_64-linux-gnulapack/liblapack.so.3.9.0
1073 ##
1074 ## locale:
1075 ## [1] LC_CTYPE=es_DO.UTF-8      LC_NUMERIC=C
1076 ## [3] LC_TIME=es_DO.UTF-8      LC_COLLATE=es_DO.UTF-8
1077 ## [5] LC_MONETARY=es_DO.UTF-8   LC_MESSAGES=es_DO.UTF-8
1078 ## [7] LC_PAPER=es_DO.UTF-8     LC_NAME=C
1079 ## [9] LC_ADDRESS=C             LC_TELEPHONE=C
1080 ## [11] LC_MEASUREMENT=es_DO.UTF-8 LC_IDENTIFICATION=C
1081 ##
1082 ## time zone: America/Santo_Domingo
1083 ## tzcode source: system (glibc)
1084 ##
1085 ## attached base packages:
1086 ## [1] stats      graphics   grDevices utils      datasets   methods    base
1087 ##
1088 ## other attached packages:
1089 ## [1] spanish_0.4.2      ggsflabel_0.0.1    ggrepel_0.9.3
1090 ## [4] janitor_2.2.0       tmap_3.3-3        scales_1.2.1
1091 ## [7] e1071_1.7-13       gdalUtilities_1.2.4 lubridate_1.9.2
1092 ## [10]forcats_1.0.0       stringr_1.5.0     dplyr_1.1.2
1093 ## [13]purrrr_1.0.1       readr_2.1.4      tidyverse_2.0.0
1094 ## [16]tibble_3.2.1       ggplot2_3.4.2    tidyverse_2.0.0
1095 ## [19]kableExtra_1.3.4    sf_1.0-12       raster_3.6-20
1096 ## [22]sp_1.6-0          psych_2.3.3
1097 ##
1098 ## loaded via a namespace (and not attached):
1099 ## [1] DBI_1.1.3          mnormt_2.1.1     tmaptools_3.1-1  s2_1.1.4
1100 ## [5] conflicted_1.2.0   rlang_1.1.1      magrittr_2.0.3   snakecase_0.11.0
1101 ## [9] compiler_4.3.0     png_0.1-8       systemfonts_1.0.4 vctrs_0.6.2
1102 ## [13]rvest_1.0.3        crayon_1.5.2    pkgconfig_2.0.3  wk_0.7.3
1103 ## [17]fastmap_1.1.1     lwgeom_0.2-13   leafem_0.2.0    labeling_0.4.2
1104 ## [21]utf8_1.2.3        rmarkdown_2.21   tzdb_0.4.0      bit_4.0.5
1105 ## [25]xfun_0.39         cachem_1.0.8    jsonlite_1.8.4  terra_1.7-29
1106 ## [29]parallel_4.3.0    R6_2.5.1        stringi_1.7.12  RColorBrewer_1.1-3
1107 ## [33]reticulate_1.30   stars_0.6-2    Rcpp_1.0.10     knitr_1.42
1108 ## [37]base64enc_0.1-3   Matrix_1.4-0    timechange_0.2.0 tidyselect_1.2.0
1109 ## [41]rstudioapi_0.14   dichromat_2.0-0.1 abind_1.4-5    yaml_2.3.7
1110 ## [45]codetools_0.2-18 lattice_0.20-45  leafsync_0.1.0  withr_2.5.0
1111 ## [49]evaluate_0.21    units_0.8-2    proxy_0.4-27   xml2_1.3.4
1112 ## [53]pillar_1.9.0     KernSmooth_2.23-20 rticles_0.25  generics_0.1.3
1113 ## [57]vroom_1.6.3      hms_1.1.3       munsell_0.5.0   class_7.3-20
1114 ## [61]glue_1.6.2       tools_4.3.0     webshot_0.5.4   XML_3.99-0.14
1115 ## [65]grid_4.3.0       crosstalk_1.2.0 colorspace_2.1-0 nlme_3.1-155
1116 ## [69]ggspatial_1.1.8   cli_3.6.1      fansi_1.0.4    viridisLite_0.4.2
1117 ## [73]svglite_2.1.1    gtable_0.3.3   digest_0.6.31  classInt_0.4-9
1118 ## [77]htmlwidgets_1.6.2 farver_2.1.1   memoise_2.0.1   htmltools_0.5.5
1119 ## [81]lifecycle_1.0.3   leaflet_2.1.2  httr_1.4.6    bit64_4.0.5

```

1120 **Referencias**

- 1121 Anderson, R. S. y Anderson, S. P. (2010). *Geomorphology: the mechanics and chemistry of landscapes*.
 1122 Cambridge University Press.
- 1123 ASF DAAC. (2014). *PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_high_res*. <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA>
- 1124 Aziz, K. M. A. y Rashwan, K. S. (2022). Comparison of different resolutions of six free online DEMs with
 1125 GPS elevation data on a new 6th of October City, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(20), 1585.
<https://doi.org/10.1007/s12517-022-10845-5>
- 1126 Barreto, S. B., Knowles, L. L., Mascarenhas, R., Affonso, P. R. A. de M. y Batalha-Filho, H. (2022). Drainage
 1127 rearrangements and in situ diversification of an endemic freshwater fish genus from north-eastern Brazilian
 1128 rivers. *Freshwater Biology*, 67(5), 759-773. <https://doi.org/10.1111/fwb.13879>
- 1129 Bishop, P. (1995). Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. *Progress in Physical
 1130 Geography: Earth and Environment*, 19(4), 449-473. <https://doi.org/10.1177/030913339501900402>
- 1131 Burn, D. H. (1997). Hydrological information for sustainable development. *Hydrological Sciences Journal*,
 1132 42(4), 481-492. <https://doi.org/10.1080/02626669709492048>
- 1133 Charlton, R. (2010). *Fundamentals of fluvial geomorphology* (Repr). Routledge.
- 1134 CIDIAT y INDRHI. (1992). *Control de Inundaciones en la cuenca del Río Yaque del Sur*. Instituto Nacional
 1135 de Recursos Hidráulicos (INDRHI).
- 1136 Culler, R. C., Hadley, R. F. y Schumm, S. A. (1961). *Hydrology of the upper Cheyenne River basin: Part
 1137 A. Hydrology of stock-water reservoirs in upper Cheyenne River basin; Part B. Sediment sources and
 1138 drainage-basin characteristics in upper Cheyenne River basin*. <https://doi.org/10.3133/wsp1531>
- 1139 Dal Pai, M. O., Salgado, A. A. R., Sordi, M. V. de, Carvalho Junior, O. A. de y Paula, E. V. de.
 1140 (2023). Comparing morphological investigation with χ index and Gilbert metrics for analysis of drai-
 1141 nage rearrangement and divide migration in inland plateaus. *Geomorphology*, 423, 108554. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108554>
- 1142 Ehlschlaeger, C. R. (1989). *Using the A^T search algorithm to develop hydrologic models from digital elevation
 1143 data*. 275281.
- 1144 Forte, A. M. y Whipple, K. X. (2018). Criteria and tools for determining drainage divide stability. *Earth and
 1145 Planetary Science Letters*, 493, 102-117. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.026>
- 1146 Foucault, A. y Raoult, J. F. (1985). *Diccionario de Geología*. MASSON. <https://books.google.com.do/books?id=x5FDPQAACAAJ>
- 1147 Freeman, T. G. (1991). Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computers &
 1148 Geosciences*, 17(3), 413-422. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(91\)90048-I](https://doi.org/10.1016/0098-3004(91)90048-I)
- 1149 GADM. (2022). *GADM*. Available online: <https://gadm.org/index.html> (accessed on abril, 2023).
- 1150 García, J. H. G. y Ojeda, A. O. (2011). Clasificación geomorfológica de cursos fluviales a partir de sistemas
 1151 de información geográfica (SIG). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 56, 373-396.
- 1152 GDAL/OGR contributors. (2022). *GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library*. Open Source
 1153 Geospatial Foundation. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5884351>
- 1154 Google; Airbus, CNES; Airbus, Landsat; Copernicus; Maxar Technologies; U.S. Geological Survey. (2023).
 1155 *Google Maps*. <https://www.google.com/maps/>
- 1156 GRASS Development Team. (2022a). *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software,
 1157 Version 8.0.2*. Open Source Geospatial Foundation. <https://grass.osgeo.org>
- 1158 GRASS Development Team. (2022b). *r.carve*. Generates stream channels. Takes vector stream data, transforms
 1159 it to raster and subtracts depth from the output DEM. *GRASS GIS manual*. <https://grass.osgeo.org/grass82/manuals/r.carve.html>
- 1160 GRASS Development Team. (2022c). *r.mapcalc* - Raster map calculator. *GRASS GIS manual*. <https://grass.osgeo.org/grass82/manuals/r.mapcalc.html>
- 1161 GRASS Development Team. (2022d). *r.watershed* - Calculates hydrological parameters and RUSLE factors.
<https://grass.osgeo.org/grass82/manuals/r.watershed.html>
- 1162 GRASS Development Team. (2023). *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software,
 1163 Version 8.2.0*. Open Source Geospatial Foundation. <https://grass.osgeo.org>
- 1164 Gutiérrez Elorza, M. (2009). *Geomorfología* (Última reimpr). Pearson-Prentice Hall.
- 1165 Halcrow-COR Ing. S.A. (2002). *Estudio de Vulnerabilidad de las Grandes Presas*. Instituto Nacional de
 1166 Recursos Hidráulicos (INDRHI).
- 1167 Harkins, N., Kirby, E., Heimsath, A., Robinson, R. y Reiser, U. (2007). Transient fluvial incision in the
 1168 headwaters of the Yellow River, northeastern Tibet, China. *Journal of Geophysical Research*, 112(F3),
 1169 F03S04. <https://doi.org/10.1029/2006JF000570>

- 1177 Hernaiz Huerta, P. P. y Andrés, P.-E. (2002). Estructura del cinturón de pliegues y cabalgamientos de Peralta,
 1178 República Dominicana. *Acta geológica hispánica*, 37(2), 183-205. <https://raco.cat/index.php/ActaGeologica/article/view/75740>
- 1179
 1180 Hijmans, R. J. (2023). *raster: Geographic Data Analysis and Modeling*. <https://CRAN.R-project.org/package=raster>
- 1181 Holmgren, P. (1994). Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: An
 1182 empirical evaluation. *Hydrological Processes*, 8(4), 327-334. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360080405>
- 1183 Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*, 13(1), 350.
 1184 <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>
- 1185 Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach
 1186 to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275-370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56%5B275:EDOSAT%5D2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56%5B275:EDOSAT%5D2.0.CO;2)
- 1187 INDRHI. (1996). *Estadísticas del Agua en la República Dominicana*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos
 1188 (INDRHI).
- 1189 INDRHI. (2012). *Plan Hidrológico Nacional, República Dominicana*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos
 1190 (INDRHI).
- 1191 INDRHI. (2019). *Inventario de Estaciones Hidrometeorológicas. Informe Final*. Instituto Nacional de Recursos
 1192 Hidráulicos.
- 1193 INDRHI y AQUATER. (2000). *Estudio Hidrogeológico Nacional de la República Dominicana, Fase I. Memoria
 1194 de Proyecto, 7 volúmenes*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI).
- 1195 INDRHI y EPTISA. (2000). *Estudio Hidrogeológico Nacional de la República Dominicana, Fase II*. Instituto
 1196 Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI).
- 1197 Instituto Cartográfico Militar (ICM). (1989). *Serie E733 de mapas topográficos escala 1:50,000*. Instituto
 1198 Cartográfico Militar.
- 1199 Instituto Geográfico Nacional. (2022). *Medición por Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) de los
 1200 Tres Picos Más Altos De Las Antillas*. Disponible en línea. Accedido a través de <https://www.ign.gob.do/index.php/noticias/item/448-medicion-por-sistema-global-de-navegacion-por-satelite-gnss-de-los-tres-picmas-altos-de-las-antillas>.
- 1201 Izzo, M., Rosskopf, C. M., Aucelli, P. P. C., Maratea, A., Méndez, R. E., Pérez, C. y Segura, H. (2010). A New
 1202 Climatic Map of the Dominican Republic Based on the Thornthwaite Classification. *Physical Geography*,
 1203 31, 455-472.
- 1204 Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A. y Guevara, E. (2008). Hole-filled SRTM for the globe Version 4. *available
 1205 from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database* (<http://srtm.cgiar.org/>), 15(25-54), 5.
- 1206 Jasiewicz, J. y Metz, M. (2011). A new GRASS GIS toolkit for Hortonian analysis of drainage networks.
 1207 *Computers & Geosciences*, 37(8), 1162-1173. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.03.003>
- 1208 Jasiewicz, J. y Stepinski, T. F. (2013). Geomorphons — a pattern recognition approach to classification and
 1209 mapping of landforms. *Geomorphology*, 182, 147-156. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005>
- 1210 JAXA/METI y ASF DAAC. (2015). *ALOS PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_high_res. Includes
 1211 material de JAXA/METI 2010*. Disponible en línea. Accedido a través de ASF DAAC <https://ASF.alaska.edu/>. DOI: <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA> (accessed on abril, 2023).
- 1212 Joanes, D. N. y Gill, C. A. (1998). Comparing measures of sample skewness and kurtosis. *Journal of the
 1213 Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, 47(1), 183-189. [https://doi.org/10.1111/1467-9884.00122](https://doi.org/10.1111/1467-

 1214 -9884.00122)
- 1215 Larson, M., Shapiro, M. y Tweddle, S. (1991). Performing map calculations on GRASS data: r.mapcalc program
 1216 tutorial. *US Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Laboratory*. https://grass.osgeo.org/uploads/grass/history_docs/mapcalc.pdf.
- 1217 Le, T. D. N. (2019). Climate change adaptation in coastal cities of developing countries: characterizing types
 1218 of vulnerability and adaptation options. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25,
 1219 739-761.
- 1220 Lenderking, H. L., Robinson, S. y Carlson, G. R. (2020). Climate change and food security in Caribbean small
 1221 island developing states: challenges and strategies. *International Journal of Sustainable Development &
 1222 World Ecology*, 28, 238-245.
- 1223 Lindsay, J. B. (2016). The practice of DEM stream burning revisited: The Practice of DEM Stream Burning
 1224 Revisited. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(5), 658-668. <https://doi.org/10.1002/esp.3888>
- 1225 Lindsay, J. B. (2018). *WhiteboxTools user manual*. Available online: https://www.whiteboxgeo.com/manual/wbt_book/intro.html (accessed on abril, 2023).
- 1226 Lindsay, J. B., Francioni, A. y Cockburn, J. M. H. (2019). LiDAR DEM Smoothing and the Preservation of
 1227 Drainage Features. *Remote Sensing*, 11(16), 1926. <https://doi.org/10.3390/rs11161926>

- 1236 Lohmann, H. (2016). Comparing vulnerability and adaptive capacity to climate change in individuals of
 1237 coastal Dominican Republic. *Ocean & Coastal Management*, 132, 111-119.
- 1238 Mackay, E. A. y Spencer, A. J. (2017). The future of Caribbean tourism: competition and climate change
 1239 implications. *Worldwide Hospitality and Tourism Themes*, 9, 44-59.
- 1240 Maneerat, P. y Bürgmann, R. (2022). Geomorphic expressions of active tectonics across the Indo-Burma Range.
 1241 *Journal of Asian Earth Sciences*, 223, 105008. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2021.105008>
- 1242 Marchesini, I., Salvati, P., Rossi, M., Donnini, M., Sterlacchini, S. y Guzzetti, F. (2021). Data-driven flood
 1243 hazard zonation of Italy. *Journal of Environmental Management*, 294, 112986. <https://doi.org/10.101>
 1244 6/j.jenvman.2021.112986
- 1245 Martínez-Batlle, J.-R. (2019). *Drainage rearrangement as a driver of geomorphological evolution during the*
 1246 *Upper Pleistocene in a small tropical basin*. <https://doi.org/10.31223/OSF.IO/PFZVQ>
- 1247 Martínez-Batlle, J. R. (2012). *Sierra de Bahoruco Occidental, República Dominicana: estudio biogeomorfológico*
 1248 *y estado de conservación de su parque nacional* [Tesis doctoral, Universidad de Sevilla; Available online:
 1249 <http://hdl.handle.net/11441/15199> (accedido en Julio, 2023)]. <http://hdl.handle.net/11441/151>
 1250 99
- 1251 Martínez-Batlle, J.-R. (2019b). Drainage Rearrangement as a Driver of Geomorphological Evolution During
 1252 the Upper Pleistocene in a Small Tropical Basin. *Journal of Geography and Geology*, 11(2), 1. <https://doi.org/10.5539/jgg.v11n2p1>
- 1254 Martínez-Batlle, J.-R. (2019a). Drainage Rearrangement as a Driver of Geomorphological Evolution During
 1255 the Upper Pleistocene in a Small Tropical Basin. *Journal of Geography and Geology*, 11(2), 1. <https://doi.org/10.5539/jgg.v11n2p1>
- 1257 Martínez-Batlle, J.-R. y Izzo-Gioiosa, M. (2023). *Datos del estudio "Generación de red hidrográfica densa de*
 1258 *República Dominicana a partir de modelo digital de elevaciones de resolución media"*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.8146391>
- 1260 McCool, D. K., Brown, L. C., Foster, G. R., Mutchler, C. K. y Meyer, L. D. (1987). Revised Slope Steepness
 1261 Factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*, 30(5), 1387-1396. <https://doi.org/10.13031/2013.30576>
- 1263 Metz, M., Mitasova, H. y Harmon, R. S. (2011). Efficient extraction of drainage networks from massive,
 1264 radar-based elevation models with least cost path search. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2),
 1265 667-678. <https://doi.org/10.5194/hess-15-667-2011>
- 1266 Mishra, A. K. y Coulibaly, P. (2009). Developments in hydrometric network design: A review. *Reviews of*
 1267 *Geophysics*, 47(2), RG2001. <https://doi.org/10.1029/2007RG000243>
- 1268 Mishra, A. K. y Coulibaly, P. (2010). Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds. *Journal of*
 1269 *Hydrology*, 380(3-4), 420-437. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.015>
- 1270 Mollat, H., Wagner, B. M., Cepek, P. y Weiss, W. (2004). *Mapa Geológico de la República Dominicana*
 1271 1 : 250.000. *Texto Explicativo*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- 1272 Moore, I. D., Grayson, R. B. y Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological,
 1273 geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3-30. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- 1275 Musher, L. J., Giakoumis, M., Albert, J., Del-Rio, G., Rego, M., Thom, G., Aleixo, A., Ribas, C. C., Brumfield,
 1276 R. T., Smith, B. T. y Cracraft, J. (2022). River network rearrangements promote speciation in lowland
 1277 Amazonian birds. *Science Advances*, 8(14), eabn1099. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abn1099>
- 1278 NASA JPL. (2013). *NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 3 arc second [Data set]*. <https://doi.org/10.5067/MEaSUREs/SRTM/SRTMGL3.003>
- 1280 NASA LP DAAC. (2000). *SRTM 1 Arc-Second Global*. <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- 1281 National Aeronautics and Space Administration y United States Geological Survey. (2009). *ASTER GDEM*.
 1282 <https://lpdaac.usgs.gov/>.
- 1283 Ngula Niipele, J. y Chen, J. (2019). The usefulness of alos-palsar dem data for drainage extraction in
 1284 semi-arid environments in The Iishana sub-basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 21, 57-67.
 1285 <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.11.003>
- 1286 O'Brien, J. (2023). *gdalUtilities: Wrappers for 'GDAL' Utilities Executables*. <https://CRAN.R-project.org/package=gdalUtilities>
- 1288 OCHA. (2022). *Humanitarian Data Exchange (OCHA)*. Available online: <https://data.humdata.org/dataset/cod-ab-dom> (accessed on abril, 2023).
- 1290 OEA y INDRHI. (1994). *Plan Nacional de Ordenamiento de los Recursos Hídricos (PNORHI)*. Instituto
 1291 Nacional de Recursos Hídricos (INDRHI).
- 1292 Oficina Nacional de Estadística (ONE). (2018). *División territorial de República Dominicana*. Available online:
 1293 <https://www.one.gob.do/media/s5gd100n/divisi%C3%B3n-territorial-2020-t.pdf> (accessed on
 1294 abril, 2023).

- 1295 OpenStreetMap contributors. (2017). *Planet dump retrieved from https://planet.osm.org* . Available online:
 1296 <https://www.openstreetmap.org> (accessed on abril, 2023).
- 1297 Pebesma, E. (2018). Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *The R Journal*,
 1298 10(1), 439-446. <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>
- 1299 Pebesma, E. y Bivand, R. (2023). *Spatial Data Science: With applications in R* (p. 352). Chapman and
 1300 Hall/CRC. <https://r-spatial.org/book/>
- 1301 Pedraza Gilsanz, J. de. (1996). *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*. Ed. Rueda.
- 1302 Pereira de Oliveira, G., Carlos de Barros Corrêa, A., Azevedo Cavalcanti Tavares, B. de y Araujo Monteiro,
 1303 K. de. (2023). The influence of cenozoic magmatism on drainage rearrangement processes of the northeast
 1304 sector of the Borborema Highlands, northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 121,
 1305 104124. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104124>
- 1306 Pérez Estañín, A., Hernáiz Huerta, P. P., Lopera Caballero, E., Joubert, M., Contreras, F., Escuder Viruete,
 1307 J., Díaz de Neira, J. A., Monthel, J., García Senz, J., Urien, P., et al. (2007). Geología de la República
 1308 Dominicana: de la construcción de arcos-isla a la colisión arco-continento. *Boletín geológico y minero*,
 1309 118(2), 157-173.
- 1310 Petrasova, A., Petras, V., Jeziorska, J., White, C. H. C., Reckling, W., Millar, G., Grokhowsky, N., Paulukonis,
 1311 A., Montgomery, K., Coffer, M., Harmon, B., Cepero, K., Starek, M., Hardin, N. L. E., Paris, P., Russ, E.,
 1312 Weaver, K., Fogelman, B., Leo, M. di y Stopkova, E. (2011). *GeoInformation Science and Environmental
 1313 Modeling*. <http://fatra.cnr.ncsu.edu/~hmitaso/>
- 1314 QGIS Development Team. (2021). *QGIS Geographic Information System, Version 3.26.2*. QGIS Association.
 1315 <https://www.qgis.org>
- 1316 Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P. y Planchon, O. (1991). The prediction of hillslope flow paths for
 1317 distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5(1), 59-79.
 1318 <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050106>
- 1319 R Core Team. (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical
 1320 Computing. <https://www.R-project.org/>
- 1321 Rodríguez, H. y Febrillet, J. F. (2006). Potencial hidrogeológico de la República Dominicana. *Boletín Geológico
 1322 y Minero*, 117.
- 1323 Roson, R. (2013). A Modeling Framework to Assess the Economic Impact of Climate Change in the Caribbean.
 1324 *Cepal Review*, 111, 23-36.
- 1325 Saunders, W. (2000). Preparation of DEMs for use in environmental modeling analysis. *Hydrologic and
 1326 Hydraulic Modeling Support. Redlands, CA: ESRI*, 2951.
- 1327 Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2004). *Atlas de los Recursos Naturales de la
 1328 República Dominicana*. Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- 1329 SERCITEC y INDRHI. (2002). *Control de Inundaciones de la cuenca del Río Yaque del Norte*. Instituto
 1330 Nacional de Recursos Hídricos (INDRHI).
- 1331 Shapiro, M. y Westervelt, J. (1994). *r.mapcalc: An algebra for GIS and image processing*. US Army Corps of
 1332 Engineers, Construction Engineering Research Laboratories.
- 1333 Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American
 1334 Geophysical Union*, 38(6), 913-920. <https://doi.org/10.1029/tr038i006p00913>
- 1335 Tennekes, M. (2018). tmap: Thematic Maps in R. *Journal of Statistical Software*, 84(6), 1-39. <https://doi.org/10.18637/jss.v084.i06>
- 1337 Van Rossum, G. y Drake, F. L. (2009). *Python 3 Reference Manual*. CreateSpace.
- 1338 Weltz, M. A., Renard, K. G. y Simanton, J. R. (1988). Revised Universal Soil Loss Equation for Western
 1339 Rangelands^1. *Estrategias de Clasificación Y Manejo de Vegetación Silvestre Para la Producción de
 1340 Alimentos en Zonas Áridas*, 150, 104.
- 1341 Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L. D., François, R., Grolemund, G., Hayes, A.,
 1342 Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T. L., Miller, E., Bache, S. M., Müller, K., Ooms, J., Robinson,
 1343 D., Seidel, D. P., Spinu, V., ... Yutani, H. (2019). Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source
 1344 Software*, 4(43), 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- 1345 Xie, Y. (2014). knitr: A Comprehensive Tool for Reproducible Research in R. En V. Stodden, F. Leisch, y R.
 1346 D. Peng (Eds.), *Implementing Reproducible Computational Research*. Chapman; Hall/CRC.
- 1347 Xie, Y. (2015). *Dynamic Documents with R and knitr* (2nd ed.). Chapman; Hall/CRC. <https://yihui.org/knitr/>
- 1348 Xie, Y. (2023). *knitr: A General-Purpose Package for Dynamic Report Generation in R*. <https://yihui.org/g/knitr/>
- 1349 Zhu, H. (2021). *kableExtra: Construct Complex Table with 'kable' and Pipe Syntax*. <https://CRAN.R-project.org/package=kableExtra>