
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

27 de julio de 2023

Resumen

¹ El resumen se colocará aquí.

² **Keywords** modelo digital de elevaciones · análisis hidrológico · procesamiento de datos geoespaciales ·
³ hidrología computacional

⁴ 1. Introducción

⁵ El agua es un recurso crítico, que impulsa la economía y sostiene la vida. A nivel global, pero especialmente
⁶ en países que comparten islas pequeñas, como República Dominicana (RD), la administración eficaz de este
⁷ recurso es esencial (Izzo et al., 2010; Le, 2019; Lenderking et al., 2020; Lohmann, 2016; Mackay y Spencer,
⁸ 2017; Roson, 2013). Sin embargo, la gestión eficiente de los recursos hídricos puede verse limitada por la
⁹ falta de información precisa y completa sobre la red hidrográfica. En este contexto, las fuentes actuales de
¹⁰ información geográfica, a pesar de su valor, presentan limitaciones en cuanto a su resolución, cobertura y
¹¹ consistencia.

¹² La red hidrográfica de RD digitalizada a partir del mapa topográfico nacional a escala 1:50,000 (“MTN-50k”)
¹³ (Instituto Cartográfico Militar (ICM), 1989) ofrece una cobertura extensa pero carece de los detalles necesarios
¹⁴ para apoyar el análisis hidrológico. Por otro lado, los estudios técnicos y multitemáticos de ámbito subnacional
¹⁵ desarrollados por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI) de RD y otras entidades y autores,
¹⁶ aunque son valiosas fuentes de información, utilizan metodologías diversas, lo que limita la consolidación
¹⁷ de una red hidrográfica coherente a nivel nacional (CIDIAT y INDRHI, 1992; Halcrow-COR Ing. S.A.,
¹⁸ 2002; INDRHI, 1996, 2012; INDRHI y AQUATER, 2000; INDRHI y EPTISA, 2000; Martínez-Batlle, 2019;
¹⁹ Martínez-Batlle, 2019; OEA y INDRHI, 1994; Rodríguez y Febrillet, 2006; Secretaría de Estado de Medio
²⁰ Ambiente y Recursos Naturales, 2004; SERCITEC y INDRHI, 2002)

²¹ Adicionalmente, las redes hidrográficas derivadas de modelos digitales de elevaciones de baja resolución, como
²² el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de 3 arco-segundos, normalmente presentan artefactos de
²³ difícil depuración, además de que la longitud de los canales es siempre más corta que la verdadera, resultando
²⁴ en redes poco densas (Jarvis et al., 2008; NASA JPL, 2013; NASA LP DAAC, 2000; National Aeronautics
²⁵ and Space Administration y United States Geological Survey, 2009). Por otro lado, el DEM SRTM de 1
²⁶ arco-segundo (~30 metros) garantiza la precisión mientras aumenta el detalle de elevación y parece ser una de
²⁷ las fuentes más consistentes actualmente (Aziz y Rashwan, 2022). No obstante, nosotros hemos generado
²⁸ productos hidrográficos con SRTM-DEM de 30 metros, y notamos que el nivel de detalle de la red es bastante
²⁹ mejorable, sobre todo en áreas de montaña.

30 Desde 2014, Alaska Satellite Facility (ASF) inició la creación de productos ALOS-PALSAR corregidos
 31 radiométricamente en función del terreno (RTC), con el objetivo de mejorar la geometría y la radiometría—
 32 coeficiente de retrodispersión por unidad de superficie del frente de onda incidente, también conocido como
 33 *gamma-nought*, γ^0 —de las imágenes generadas por el sensor PALSAR (radar de apertura sintética, banda L,
 34 con distintas polarizaciones y modos de barrido) montado a bordo del satélite ALOS de la Agencia Espacial
 35 Japonesa (JAXA) (ASF DAAC, 2014; JAXA/METI y ASF DAAC, 2015). ALOS fue lanzado en 2006, pero
 36 luego de cinco años de servicio, perdió energía y cesó la comunicación con el centro de control, aunque aún
 37 permanece en órbita.

38 Para obtener los productos RTC, denominados propiamente como “*Hi-Res Terrain Corrected*” o “ALOS
 39 PALSAR RTC”, ASF requirió de datos globales de elevación de la máxima resolución posible, para lo cual
 40 empleó de forma preferente (según territorios) el SRTM de 1 arco-segundo. En el proceso fue necesario ajustar
 41 el espaciado de píxeles del DEM fuente (~30 metros) para hacerlo coincidir con el espaciado de píxel de las
 42 imágenes ALOS PALSAR (~ 12.5 metros) usando una función de remuestreo (*up-sampling*), obteniéndose así
 43 un DEM de 12.5 metros (ASF DAAC, 2014; JAXA/METI y ASF DAAC, 2015).

44 A pesar de que ASF advirtió que este DEM se empleó únicamente para realizar la corrección radiométrica
 45 del terreno del producto derivado de ALOS-PALSAR, y que no debería ser utilizado como fuente de elevación
 46 precisa (ASF DAAC, 2014), lo cierto es que en países donde no se dispone de DEM de mediana o alta
 47 resolución, se vuelve crucial indagar en el potencial de cada nuevo producto disponible. Por esta razón,
 48 tras varias pruebas iniciales en las que extrajimos redes de drenaje y elementos del relieve a partir de este
 49 DEM, comprobamos que la red hidrográfica obtenida tenía mucho mayor detalle que las redes generadas con
 50 cualquier otra fuente disponible. Dado que la elevación precisa no es crucial en nuestras aplicaciones, vimos
 51 un alto potencial en este DEM para realizar aplicaciones de hidrología computacional, en concreto para la
 52 extracción de redes densas con énfasis en áreas de montaña.

53 El propósito de este artículo es ofrecer nuevos datos para superar las limitaciones de las redes hidrográficas
 54 existentes, desarrollando una red densa de ríos, arroyos y cañadas—canales, talwegs—with énfasis en áreas
 55 montañosas—donde las fuentes actualmente disponibles suelen mostrar una red dispersa—, utilizando como
 56 fuente el DEM servido con los productos ALOS PALSAR RTC de 12.5 metros de resolución espacial. Nuestro
 57 segundo objetivo es optimizar el DEM, reduciendo el ruido y asegurando su precisión hidrológica, a la vez que
 58 mantenemos los elementos morfológicos significativos del terreno. El tercer objetivo, no menos importante,
 59 es sistematizar el protocolo de procesamiento con una metodología explícita, generando una base de código
 60 abierto basada en software libre para el procesamiento de datos de elevación e hidrología computacional, que
 61 ofrezca a personas interesadas, especialmente a estudiantes, una referencia didáctica que pueda aplicarse a
 62 fuentes de elevación similares.

63 Nuestro trabajo tiene potencial para suprir las demandas de información sobre hidrografía de resolución fina,
 64 que es un aspecto crucial en muchos estudios de modelación, análisis de riesgos, morfometría de cuencas,
 65 entre otros. De manera particular, la hidrografía densa generada por nosotros es idónea para mejorar la
 66 red estaciones hidrométricas del país, la cual es limitada y afronta diversos desafíos de densidad de puntos
 67 y de operación, un común denominador en este tipo de redes globalmente. Nos enfocamos en la utilidad
 68 de una hidrografía sistemáticamente generada, no necesariamente en las métricas precisas, pues el modelo
 69 digital de elevaciones usado tiene error, y la información de terreno necesaria para conducir el flujo en
 70 áreas llanas, es insuficiente. Asimismo, nuestro trabajo también podría contribuir a aportar información
 71 para acciones de conservación, planificación y gestión de los recursos hídricos a nivel nacional (Burn, 1997;
 72 INDRHI, 2019; Mishra y Coulibaly, 2009; Mishra y Coulibaly, 2010). Además, los datos generados pueden ser
 73 de gran valor para un amplio rango de aplicaciones, incluyendo la planificación del uso del suelo, el diseño de
 74 infraestructuras, la gestión de cuencas hidrográficas y la modelización de escorrentía y erosión. A medida
 75 que nos enfrentamos a los impactos del cambio climático y a la creciente escasez de agua, esperamos que
 76 este trabajo sirva como una contribución significativa para la gestión de los recursos hídricos en la República
 77 Dominicana (Izzo et al., 2010; Le, 2019; Lenderking et al., 2020; Lohmann, 2016; Mackay y Spencer, 2017;
 78 Roson, 2013).

79 Notas sobre terminología

80 La terminología utilizada para describir los distintos componentes de los sistemas fluviales es un tema de
 81 continuo debate en el campo de la geomorfología fluvial. Este debate suele estar intrínsecamente ligado a la
 82 escala de análisis empleada; al variar la escala, incrementándola o reduciéndola, los criterios empleados para
 83 delimitar las definiciones de los elementos morfológicos, tienden a desdibujarse y/o a resultar inconsistentes
 84 (García y Ojeda, 2011). Seleccionar el término apropiado para describir la unidad topográficamente deprimida

- 85 por donde fluye o por donde podría circular el agua de escorrentía, es un desafío nada despreciable. Este
 86 reto se intensifica cuando el idioma introduce distintas connotaciones para términos similares, y donde
 87 la traducción podría prestarse a confusión—tal como ocurre con *channel* y canal en inglés y español,
 88 respectivamente—(Anderson y Anderson, 2010; Charlton, 2010; Gutiérrez Elorza, 2009; Pedraza Gilsanz,
 89 1996).
- 90 La resolución de las discrepancias en la terminología supera el alcance del presente trabajo, por lo decidimos
 91 fijar los términos utilizados en el artículo de manera convencional. En este estudio, empleamos los términos
 92 *talweg* y canal de forma indistinta para referirnos a la unidad topográficamente deprimida por la que fluye,
 93 o podría fluir, la corriente. En geomorfología, utilizamos la voz germánica *talweg* para referirnos a la línea
 94 imaginaria que traza la parte más baja de un valle, razón por la cual también la hemos incluido entre
 95 los términos genéricos usados (Foucault y Raoult, 1985). Es importante remarcar que nuestra definición
 96 convencional no siempre se refiere a un curso fluvial permanente, pues la circulación del agua es influenciada
 97 por múltiples factores. Asimismo, cabe destacar que, a esta unidad geomorfológica en sus distintas variantes
 98 hidrodinámicas y dimensionales, también se le conoce con múltiples nombres en República Dominicana
 99 (en orden de mayor a menor “importancia”), como son río, arroyo o cañada, denominaciones que también
 100 incorporamos en la redacción.
- 101 Finalmente, en nuestro en este trabajo también adoptamos los términos curso, drenaje o corriente, espe-
 102 cialmente cuando destacamos la presencia de un flujo ya sea permanente, semipermanente o intermitente.
 103 Además, para el análisis hortoniano de los sistemas fluviales, nos referimos al sistema interconectado de
 104 canales, cursos, corrientes o drenajes con las denominaciones “red de drenajes” o “red hidrográfica”.

105 2. Materiales y métodos

106 2.1. Obtención y Preprocesamiento del DEM

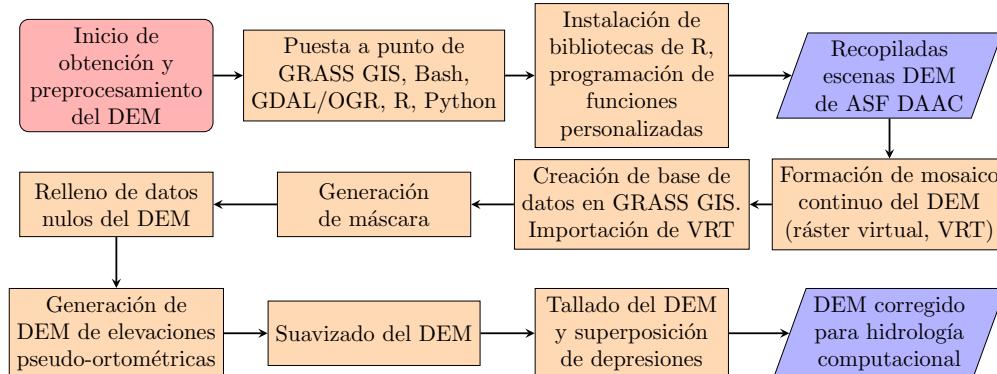


Figura 1: Resumen gráfico de la obtención y preprocesamiento del DEM

- 107 Iniciamos nuestro estudio valorando diversas herramientas para el procesamiento de los datos (Figura
 108 1). Debido a la gran variedad de complementos que ofrece, junto con su alto rendimiento y la calidad
 109 de los resultados que proporciona, decidimos utilizar GRASS GIS v8.2.0 para realizar la mayor parte
 110 del preprocesamiento del DEM (GRASS Development Team, 2023). La implementación de su interfaz de
 111 línea de comandos (e.g. interfaz basada en texto), en nuestro caso Bash, garantizó la reproducibilidad de
 112 nuestros procedimientos. Nos auxiliamos también de la biblioteca GDAL/OGR, WhiteboxTools el entorno de
 113 programación estadística R y el lenguaje de programación Python (GDAL/OGR contributors, 2022; Lindsay,
 114 2018; R Core Team, 2023; Van Rossum y Drake, 2009). Nuestro enfoque de reproducibilidad asegura que, sin
 115 importar la fuente de datos empleada, el seguimiento del flujo de trabajo es viable, manteniendo la integridad
 116 y coherencia del proceso de análisis, sin menoscabo de la calidad del resultado final.
- 117 Asimismo, para facilitar nuestra labor, utilizamos una serie de bibliotecas de R, además de funciones
 118 personalizadas escritas por nosotros para agilizar y optimizar las tareas de limpieza y representación de datos
 119 y mapas (Hijmans, 2023; O'Brien, 2023; Pebesma, 2018; Pebesma y Bivand, 2023; Wickham et al., 2019; Xie,
 120 2014, 2015, 2023; Zhu, 2021). El código reproducible usado en el estudio se puede consultar en la sección

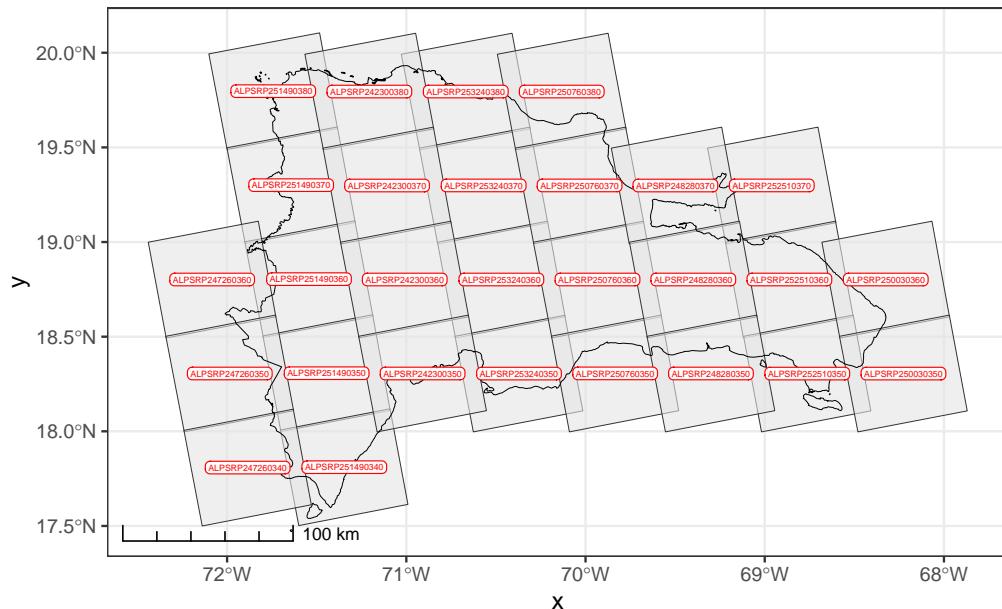


Figura 2: Mapa índice de las 28 escenas usadas en la formación del DEM de República Dominicana, superponiendo las huellas (polígono de área con datos) de las escenas ALOS PALSAR RTC sobre el límite costero e internacional del país

- 121 Información suplementaria, así como los repositorios creados al efecto, donde incluimos el código escrito y las
 122 direcciones para acceder a los datos fuentes, entre otras utilidades.
- 123 Nos centramos en la fuente de datos, que en nuestro caso es el modelo digital de elevaciones (DEM) servido
 124 con los productos *Hi-Res Terrain Corrected* de Alaska Satellite Facility (ASF) (ASF DAAC, 2014). Este
 125 producto se descarga desde el Centro de Archivo Activo Distribuido del Alaska Satellite Facility o ASF
 126 DAAC—una de las instalaciones temáticas de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los
 127 Estados Unidos, NASA—en forma de escenas o “cuadros” (*tiles*), contenido dos imágenes de retrodispersión
 128 γ^0 (ca. 70x58 km cada una), una por cada polaridad, y el modelo digital de elevaciones remuestreado con el
 129 que ASF realizó la corrección radiométrica de terreno (ca. 80x70 km), objeto de nuestro estudio.
- 130 Cabe señalar que en un estudio de Aziz y Rashwan (2022), se evaluó la precisión del DEM comparándolo con
 131 otras fuentes de elevación, encontrándose un rendimiento relativamente bajo en varias pruebas. Sin embargo,
 132 en el trabajo se utilizó el DEM sin preprocesar, lo cual seguramente afectó el detectado bajo rendimiento.
 133 Consideramos que, a pesar de los resultados de su comparativa, la alta resolución del DEM lo convierte en
 134 una excelente opción para la extracción de redes de drenaje, siempre que se apliquen filtros apropiados (Ngula
 135 Niipele y Chen, 2019). Además, ASF señaló en su documentación (ASF DAAC, 2014; JAXA/METI y ASF
 136 DAAC, 2015) que el DEM usado en la RTC no es una fuente confiable de elevación, por lo que el resultado
 137 obtenido por Aziz y Rashwan (2022) era más bien el esperado.
- 138 Para conformar un mosaico continuo del DEM de República Dominicana, seleccionamos y descargamos más de
 139 40 escenas únicas de ALOS-PALSAR desde el ASF DAAC (JAXA/METI y ASF DAAC, 2015), minimizando
 140 la redundancia espacial y eligiendo las versiones más recientes, conservando sólo 28 escenas distintas (Figura
 141 2 y Tabla S1). Después, extrajimos los DEM correspondientes de los archivos comprimidos y transformamos
 142 aquellos proyectos en el huso 18N al 19N del sistema UTM. Posteriormente, creamos un mosaico continuo
 143 (“sin costuras”) usando el formato de ráster virtual.
- 144 Posteriormente, creamos una base de datos, con su correspondiente localización, en GRASS GIS, nuestro
 145 software principal por su eficiencia. Ocasionalmente recurrimos a otras herramientas como WhiteboxTools y
 146 QGIS, siempre con el objetivo de optimizar el uso de los recursos de hardware para obtener los resultados
 147 necesarios de manera rápida (GRASS Development Team, 2023; Lindsay, 2018; QGIS Development Team,
 148 2021). Complementariamente, generamos una máscara de país en QGIS, fusionando el límite oficial de la
 149 Oficina Nacional de Estadística con fuentes en línea como GADM, OCHA y OpenStreetMap, y excluyendo
 150 superficies de lagos naturales y embalses para facilitar el análisis de cuencas endorreicas; este paso fue realizado
 151 de forma semimanual. Posteriormente, importamos tanto el ráster virtual como la máscara a la base de datos

152 de GRASS GIS (Figura S1). Inmediatamente, aplicamos la máscara a la región activa para enfocar los análisis
 153 sólo dentro del área de interés. (GADM, 2022; OCHA, 2022; Oficina Nacional de Estadística (ONE), 2018;
 154 OpenStreetMap contributors, 2017; QGIS Development Team, 2021).

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

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

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

186 2.2. Procesamiento de hidrología computacional

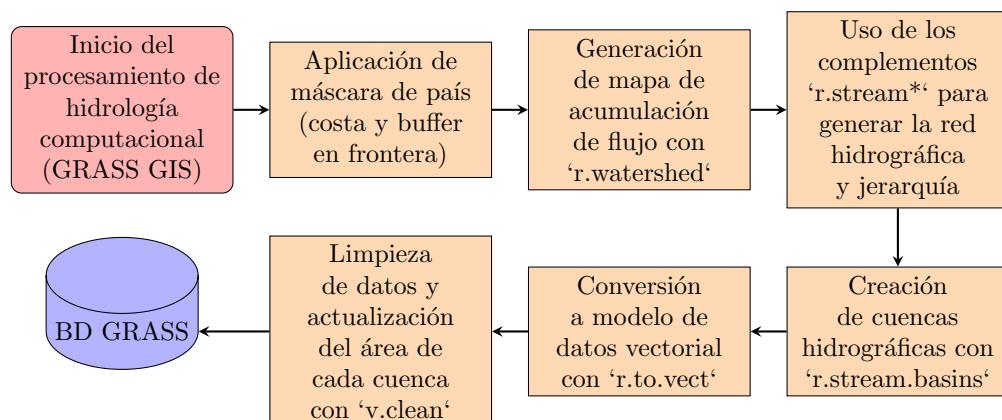


Figura 3: Resumen gráfico del procesamiento de hidrología computacional

187 El avance en las técnicas de procesamiento de hidrología computacional ha permitido estudios cada vez más
 188 sofisticados de fenómenos hídricos, impulsado por las actualizaciones y herramientas disponibles hoy en día,

entre las cuales destacan las de GRASS GIS (Ehlschlaeger, 1989; Freeman, 1991; Holmgren, 1994; Larson et al., 1991; McCool et al., 1987; Metz et al., 2011; Moore et al., 1991; Quinn et al., 1991; Weltz et al., 1988). Por su potencial y múltiples complementos disponibles, todo el procesamiento de hidrología computacional lo desarrollamos en GRASS GIS (Figura 3).

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

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

Para determinar la red hidrográfica óptima de alta densidad de República Dominicana, realizamos una inspección visual de los tres resultados generados a partir de los umbrales de acumulación elegidos (Figura S11). Tras evaluar las redes, seleccionamos la obtenida con el umbral de 540 celdas, por ajustarse a nuestros criterios de selección. Sin embargo, para preservar la reproducibilidad de nuestros resultados y facilitar eventuales aplicaciones futuras, decidimos conservar todos las redes en la base de datos, incluyendo las originadas a partir de los umbrales de 180 y 900 celdas. En concreto, la red generada con el umbral 180 celdas, presenta un buen ajuste con las vaguadas topográficas marcadas en el mapa topográfico (Figura S12).

A continuación, con el complemento **r.stream.order** de GRASS GIS, calculamos la jerarquía de la red hidrográfica para cada uno de los umbrales de acumulación previamente establecidos (180, 540 y 900 celdas), utilizando un bucle en Bash para automatizar el proceso. Este análisis permitió obtener la jerarquía de la red hidrográfica de acuerdo a los métodos de Strahler y Horton, ofreciendo información útil para nuestros objetivos (Horton, 1945; Strahler, 1957).

Utilizando el complemento **r.stream.basins** de GRASS GIS, delimitamos las cuencas y subcuencas según la jerarquía de red para cada uno de los tres umbrales de acumulación. Este proceso permitió la delimitación de unidades que incluyen, de forma indiferenciada, tanto cuencas como subcuencas con redes de drenaje tributarias. Posteriormente, aplicamos el mismo complemento para delimitar las cuencas que desembocan en el mar, lagos, lagunas o pérdidas del karst, excluyendo las subcuencas tributarias (e.g. cuencas sin prolongación de drenaje superficial fuera de ellas).

Finalizamos el procesamiento de hidrología computacional seleccionando solo las cuencas generadas para el umbral de 540 celdas y las convertimos en un modelo de datos vectorial utilizando el complemento **r.to.vect** de GRASS GIS. Este procedimiento incluyó la creación y actualización de una nueva columna **strahler** en la tabla de atributos de cada capa vectorial para indicar el correspondiente orden de red. Despues de procesar y fusionar todas las cuencas de cada orden en una única capa vectorial con **v.patch**, procedimos a limpiar y preparar los datos para el análisis. Este paso, que incluyó la corrección de topología, la actualización del área de cada cuenca con **v.clean**, la eliminación de áreas espurias y artefactos, resultó crítico para garantizar la precisión de nuestros resultados. Finalmente, seleccionamos los datos válidos y los exportamos a un archivo de texto, lo que nos proporcionó valiosas estadísticas del área para cada cuenca con desembocadura en mares, lagos o en pérdidas kársticas, según el orden Strahler para nuestro análisis posterior.

3. Resultados

La base de datos de cuencas hidrográficas delimitadas y la red de drenaje extraída usando el umbral de acumulación de 540 celdas (~8 ha), se ajustó bien a nuestros criterios óptimos de selección. El modelo de red

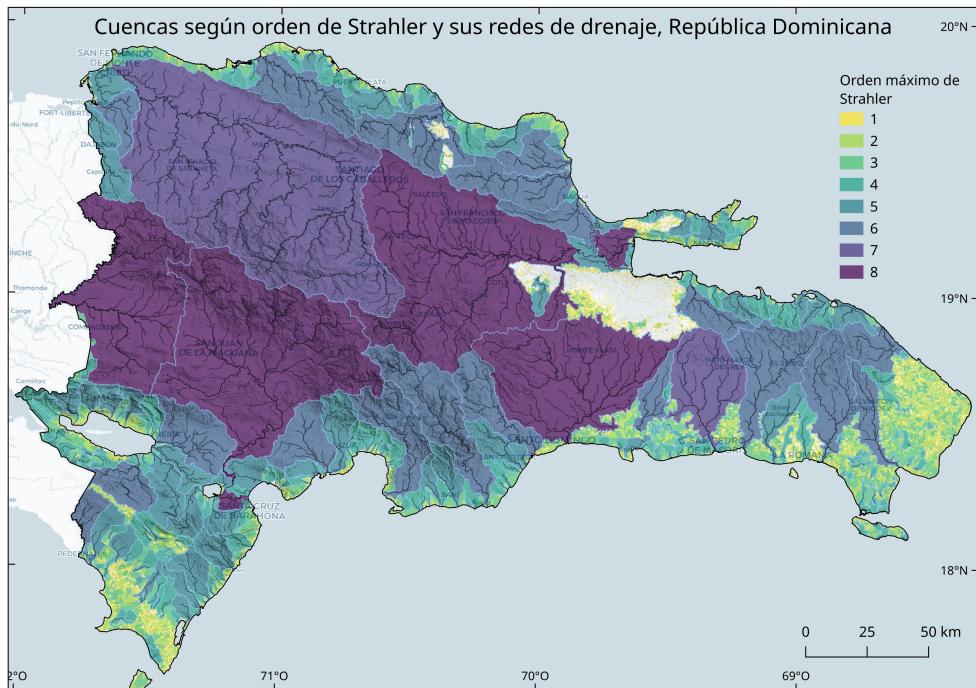


Figura 4: Cuencas según orden de Strahler de República Dominicana, y sus correspondientes redes de drenaje (sólo mostrando los cursos de orden 4 o superior). El umbral de acumulación usado para extraer la red fue de 540 celdas (aprox. 8 ha).

hidrográfica y la delimitación de cuencas demostró coherencia, suficiente detalle y una diversidad sustancial a lo largo del territorio dominicano, especialmente en las áreas de montaña, proporcionando una representación hidrográfica precisa sin atenuar patrones de variabilidad. Presentamos a continuación los principales hallazgos, en forma de resúmenes estadísticos, de las cuencas y sus redes de drenaje.

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

En el caso de las cuencas que desembocan en mares, lagos, lagunas o en pérdidas kársticas, en total delimitamos 6941 cuencas hidrográficas (Figura 4). Predominan cuencas de gran tamaño y anchura en los valles del Cibao y de San Juan, así como en la periferia de la plataforma kárstica sudoriental. Por otro lado, las cuencas medianas y de forma alargada con forma ligeramente ensanchada en cabecera, tienden a concentrarse a lo largo del borde meridional de la Cordillera Central y en el karst de la plataforma sudoriental. Las cuencas más pequeñas, en cambio, se distribuyen de manera más uniforme a través de los sistemas kársticos y zonas costeras. Entre todas las cuencas delimitadas, se alcanzó una jerarquía de red máxima de ocho, condición que sólo se observó en tres cuencas específicas: Yaque del Sur, Yuna y Ozama.

La cuenca más extensa, correspondiente al río Yaque del Norte, cubre una superficie de 6986 km², aunque sólo alcanzó orden máximo de siete, seguida de las cuencas de los ríos Yuna (4873 km²) y Yaque del Sur (4614 km²), ambas con orden máximo de ocho (en la siguiente sección, discutimos sobre la discrepancia entre las superficies de cuencas obtenidas por nosotros y los tamaños publicados en referencias existentes). El tamaño promedio de las cuencas es de 7 km² y desviación estándar de 129 km², reflejando la diversidad de las cuencas hidrográficas presentes en el país.

La mitad de las cuencas delimitadas tiene 0.36 km² o menos de superficie, el 25 % de las cuencas más grandes apenas supera los 0.85 km² y, de hecho, el 5 % más grande sólo alcanza 5.6 km² o más. Por lo tanto, la distribución de las cuencas por tamaño presenta sesgo a la derecha (sesgo calculado, 39.8), con un importante número de cuencas pequeñas y pocas grandes, un patrón bastante común en este tipo de conjunto de datos.

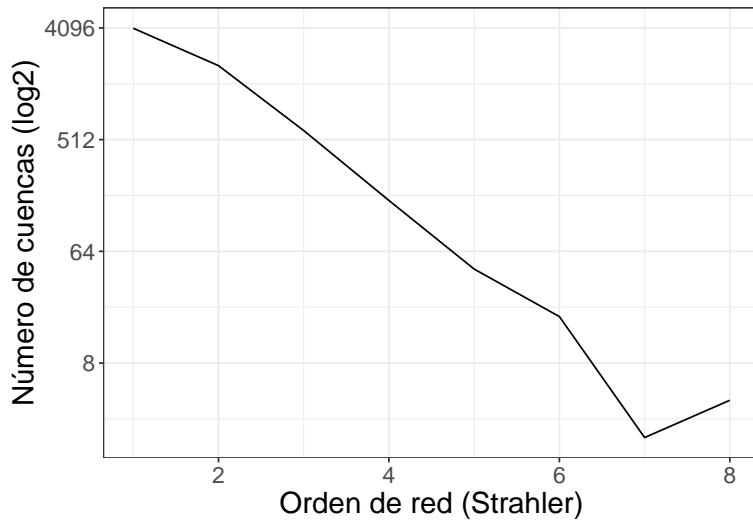


Figura 5: Número de cuencas por órdenes de red de Strahler para el umbral de acumulación 540 celdas (~ 8 hectáreas)

Tabla 1: Relación entre orden de red de Strahler y número de cuencas para el umbral de acumulación 540 celdas (~ 8 hectáreas)

Orden de red (Strahler)	Número de cuencas	Área promedio	Área total
1	4070	263837.3	1073817672
2	2029	956249.8	1940230776
3	606	3911578.6	2370416619
4	165	21414857.6	3533451511
5	46	111125189.5	5111758717
6	19	517463997.1	9831815945
7	2	3979801647.7	7959603295
8	4	3708474023.0	14833896092

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

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

274 Contabilizamos 235 cuencas de orden cuatro y mayor, lo que representa un 3.39 % del total nacional. Sin
 275 embargo, este pequeño porcentaje representa, en términos de superficie, el 88.5 % del área total de cuencas. En
 276 este subconjunto encontramos un tamaño mínimo de 2.37 km^2 , promedio de 176 km^2 y desviación estándar
 277 de 129 km^2 . La mitad de las cuencas de orden cuatro y mayor 25.68 km^2 o menos de superficie y, aunque este
 278 subconjunto de cuencas tiene mejor distribución, el sesgo a la derecha persiste (sesgo calculado 7.23).

279 3.2. Cuencas y subcuencas

280 Analizando las cuencas considerando sólo el orden de su red,

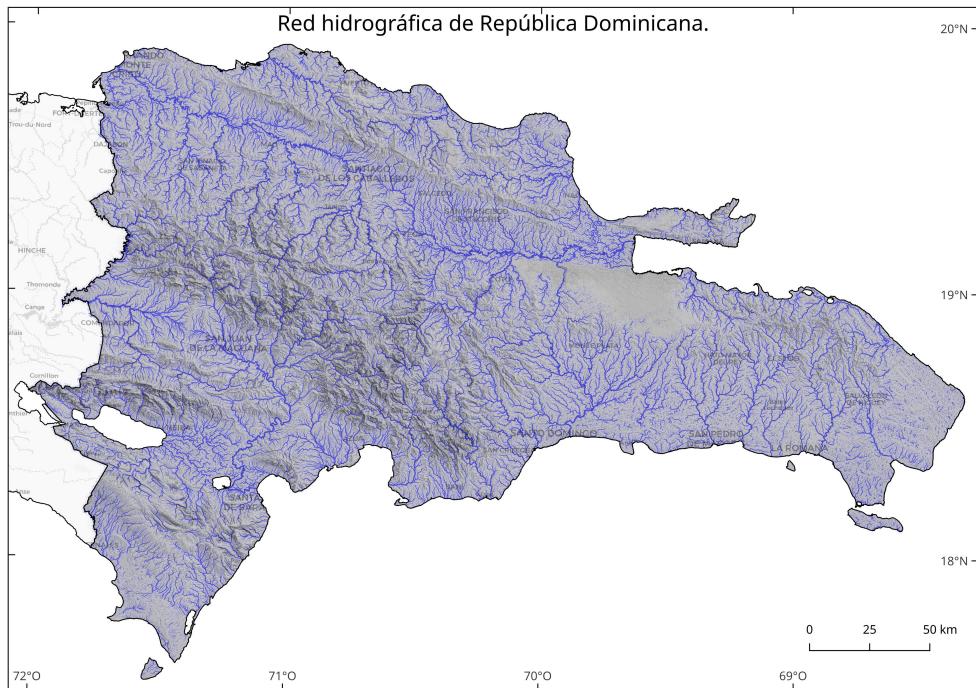


Figura 6: Representación de la red hidrográfica dominicana simbolizando el grosor de los segmentos en función de su orden de red (método de Strahler). El orden máximo alcanzado fue de 8. Esta red fue generada usando un umbral de acumulación de 540 celdas (~8 ha)

281 3.3. Red de drenaje

282 La longitud total de *talwegs* obtenidos es de ### kilómetros, con el río más largo extendiéndose por ###
 283 kilómetros. Este nivel de detalle en la cartografía de ríos y corrientes supera significativamente a los modelos
 284 previos existentes, permitiendo una mejor comprensión y análisis de los patrones de flujo de agua en la
 285 República Dominicana (Figura 6).

286 En cuanto a la jerarquía de la red, se observó un rango desde ### (la menor jerarquía) hasta ### (la
 287 mayor jerarquía), lo que indica una diversidad significativa en la configuración de las corrientes de agua. Esta
 288 jerarquía hidrográfica proporciona información valiosa para comprender la estructura y el funcionamiento de
 289 las cuencas.

290 Además, la inclusión de las redes generadas con los umbrales de 180 y 900 celdas en la base de datos añade
 291 un nivel adicional de detalle y versatilidad, ofreciendo diversas opciones para futuros estudios o aplicaciones
 292 que requieran diferentes niveles de resolución. Cabe mencionar que la red generada con un umbral de 180
 293 celdas resultó en la mayor cantidad de cuencas hidrográficas identificadas, mientras que la red generada con
 294 el umbral de 900 celdas proporcionó las representaciones más simplificadas de las cuencas.

295 En cuanto a la distribución de cursos según jerarquía hidrográfica, la red generada con el umbral de 8 hectáreas
 296 alcanzó un orden máximo de 8 según los métodos de Strahler y Horton. Tanto la distribución del número de
 297 cursos como la suma de longitudes según órdenes jerárquicos, presentan un relación inversa exponencial.

298 4. Discusión

299 Por el énfasis que hemos puesto en la generación de la red hidrográfica y la detallada metodología, nuestro
 300 trabajo es un artículo de datos y metodológico a la vez.

301 Para lograr una rápida salida del trabajo, dejamos para futuras investigaciones lo siguiente:

- 302 ■ Evaluación de precisión de la elevación.

- 303 ■ Nuestro interés gira en torno a la aplicabilidad de la hidrografía sistemáticamente generada, no
 304 necesariamente a las métricas, pues el modelo digital de elevaciones usado tiene error, y la información
 305 de terreno es insuficiente.
- 306 ■ El drenaje en las áreas de desembocadura, especialmente en los casos de Yuna y Yaque de Sur.
- 307 ■ Morfometría de redes y morfometría de cuencas, para próximos trabajos.
- 308 ■ Mejora de la hidrografía de las áreas llanas (esperaremos mejores fuentes de elevación, e.g. TanDEM-X)
- 309 ■ Las diferencias en cuanto a superficie de las cuencas, e.g. Yuna y Yaque del Sur.
- 310 ■ Análisis hortonianos exhaustivos.
- 311 ■ Segregación de la red teórica y la red circulante.
- 312 ■ Con respecto a la precisión posicional de la red, estimamos que es alta en sistemas montañosos no
 313 kársticos, y moderada en sistemas kársticos. En los sistemas kársticos en particular, nuestro mapa
 314 exhibe un grado ligeramente mayor de incertidumbre debido a la ausencia de un catálogo detallado y
 315 preciso de depresiones, como las dolinas, que en última instancia definen la topología y jerarquización
 316 de la red en estos relieves. Para subsanar esta carencia, generamos nuestro propio inventario de
 317 depresiones a partir del modelo de elevaciones seleccionado, aunque lo aplicamos con prudencia a la
 318 hora de determinar la ubicación de los sumideros reales donde el flujo se infiltra al karst. Es relevante
 319 mencionar que nuestra red podría presentar una precisión reducida en áreas urbanas y llanas, así
 320 como en terrenos con canales de riego. Sin embargo, este factor no impacta la relevancia de nuestro
 321 estudio, dado que se enfoca primordialmente en otros tipos de áreas.
- 322 ■ En relación a las cuencas y redes de drenaje transfronterizas, es importante destacar que sólo se
 323 caracterizaron utilizando información la porción correspondiente al territorio dominicano. Como
 324 resultado, el orden de red máximo obtenido para estas redes podría no reflejar su orden real. Estas
 325 cuencas abarcan las de los ríos Artibonito, Pedernales y Masacre, además de varias cuencas menores
 326 dispersas a lo largo de la frontera. No obstante, una evaluación visual preliminar indica que la
 327 mencionada limitación no interfiere con el propósito de nuestro estudio. Además, en futuros trabajos,
 328 abordaremos estas cuencas de manera integral para proporcionar una visión más completa de su
 329 morfometría.
- 330 ■ Para asegurar que los datos de elevación eran adecuados y precisos en términos de elevación, se
 331 debería validar el DEM con datos de puntos de verificación tomados con GNSS.

332 Declaración de conflicto de intereses

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

335 Disponibilidad de datos, scripts y código

336 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
 337 curación de datos, análisis y visualización están disponibles en esta sección, así como en el repositorio de
 338 GitHub en <https://github.com/geofis/red-hidrografica-densa-rd> y en Zenodo en (RELENAR?).
 339

340 Información suplementaria

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

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

```
conflicted::conflict_prefer("select", "dplyr")
conflicted::conflict_prefer("filter", "dplyr")
library(raster)
library(sf)
library(kableExtra)
library(tidyverse)
library(gdalUtilities)
library(e1071)
source('R/funciones.R')
dem_proc_dir <- 'estadisticos'
figuras <- 'figuras'
```

346 Descargamos 42 escenas ALOS PALSAR RTC, específicamente los *Hi-Res Terrain Corrected*, desde el
 347 Centro de Archivo Activo Distribuido (DAAC) del Alaska Satellite Facility (ASF) (ASF DAAC, 2014), para
 348 posteriormente depurarlas y seleccionar las más idóneas para unirlas en un mosaico creado como ráster virtual.
 349 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
```

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

361 Identificamos las escenas necesarias para cubrir íntegramente la República Dominicana, usando una búsqueda
 362 geográfica mediante polígono delimitador en ASF. Dado que la misión del ALOS-PALSAR ofrece escenas
 363 de distintas fechas para una misma área, las descargamos todas y posteriormente excluimos del análisis las
 364 redundantes, conservando siempre la más reciente. Utilizando el índice de huellas de escenas, escribimos un
 365 pequeño programa para seleccionar las más recientes allí donde hubiese redundancia. Con esto construimos
 366 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

367 En total, para cubrir el territorio de República Dominicana, necesitamos 28 de escenas únicas ALOS PALSAR
 368 RTC. Señalamos en este punto un detalle relevante para el análisis hidrológico. Las escenas correspondientes
 369 a la porción haitiana del río Artibonito, no las procesamos en este estudio, a efectos de agilizar la producción
 370 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') +
  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')
```

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

```
zip_path <- 'alos-palsar-dem-rd/'
sapply(ind_orig_sel$file_name,
       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)))
         )
```

376 Todos los DEM fueron proporcionados por ASF en el sistema de coordenadas Universal Transversal de
 377 Mercator (UTM). Sin embargo, los situados al oeste fueron suministrados en el huso 18N. Identificamos estos
 378 DEM y los transformamos al huso 19N, que es el que corresponde a nuestra área, con el objetivo de generar
 379 un producto continuo. Para realizar esta transformación, empleamos la herramienta `gdalwarp` de la biblioteca
 380 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)})
```

381 A efectos de eficientizar la manipulación del DEM, creamos un ráster virtual (VRT) usando la herramienta
 382 `gdalbuildvrt` de la biblioteca GDAL. Un ráster virtual es básicamente la abstracción de una imagen que
 383 se genera *on the fly*, creado a partir de un índice de tamaño pequeño, en formato XML, que apunta a los
 384 archivos originales sin moverlos ni alterarlos. Tienen las mismas prestaciones que las imágenes guardadas
 385 permanentes guardadas en disco, por lo que con un ráster virtual podemos visualizar un mosaico continuo
 386 o realizar análisis intermedios, o evaluar un producto antes de crearlo de forma definitiva. Se trata de un
 387 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')
```

388 Posteriormente, creamos la base de datos y localización de GRASS GIS usando como fuente de extensión y
 389 resolución el ráster virtual (GRASS Development Team, 2023). Decidimos usar GRASS GIS a partir de este
 390 punto para prácticamente todas las tareas de análisis geoespacial e hidrológico, pues se trata de un software
 391 bastante eficiente en muchos de sus complementos y algoritmos de serie (e.g. relleno de nulos). Sin embargo,
 392 en pasos posteriores, alternamos el flujo de procesamiento con otras herramientas, como WhiteboxTools
 393 (Lindsay, 2018). En todo caso, nuestro criterio fue siempre aprovechar al máximo los recursos de hardware y
 394 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/
```

395 Luego creamos una máscara de país en QGIS (QGIS Development Team, 2021), superponiendo el límite
 396 oficial obtenido desde la página de la Oficina Nacional de Estadística (ONE), y combinándolo con otras
 397 fuentes disponibles en línea, como GADM, Humanitarian Data Exchange (OCHA) y OpenStreetMap (GADM,
 398 2022; OCHA, 2022; Oficina Nacional de Estadística (ONE), 2018; OpenStreetMap contributors, 2017). De la
 399 máscara, eliminamos las superficies de máximas de lagos y lagunas no artificiales, pues nos interesa procesar
 400 las cuencas endorreicas que drenan hacia ellos. No obstante, los embalses no los incluimos en dicha superficie,
 401 dado que necesitamos construir la jerarquía de red ignorando su presencia, es decir, asumiendo como continuos
 402 todos los cursos fluviales. Sobre esta máscara, creamos un área de influencia, para recortar el DEM con un
 403 cierto “acolchado” que nos permitiera analizar sin dificultades las áreas costeras y de frontera. La creación de
 404 esta máscara fue el único paso que realizamos de forma semimanual, pues el resto del flujo de procesamiento
 405 lo realizamos con algoritmo automáticos.

406 Posteriormente, importamos la máscara generada a la base de datos de GRASS y la aplicamos. GRASS opera
 407 de forma eficiente, circunscribiendo la aplicación de los algoritmos al área definida como máscara. Las áreas
 408 fuera de ésta son excluidas, eficientizando los recursos y evitando malgastar tiempo de CPU en áreas que
 409 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
```

410 Importamos el ráster virtual a la base de datos de GRASS GIS con la herramienta `r.import`. Con este paso
 411 generamos un mapa ráster dentro de la base de datos GRASS GIS, el cual es una realización con celdas
 412 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
```

413 A continuación, rellenamos las celdas con valor nulo (sin datos) por medio del eficiente complemento de
 414 GRASS `r.fill.nulls`. Lo configuramos para llenar píxeles nulos usando interpolación *spline* bilineal
 415 con regularización Tykhonov (*spline* es un método de descomposición de curvas en porciones descritas por
 416 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
```

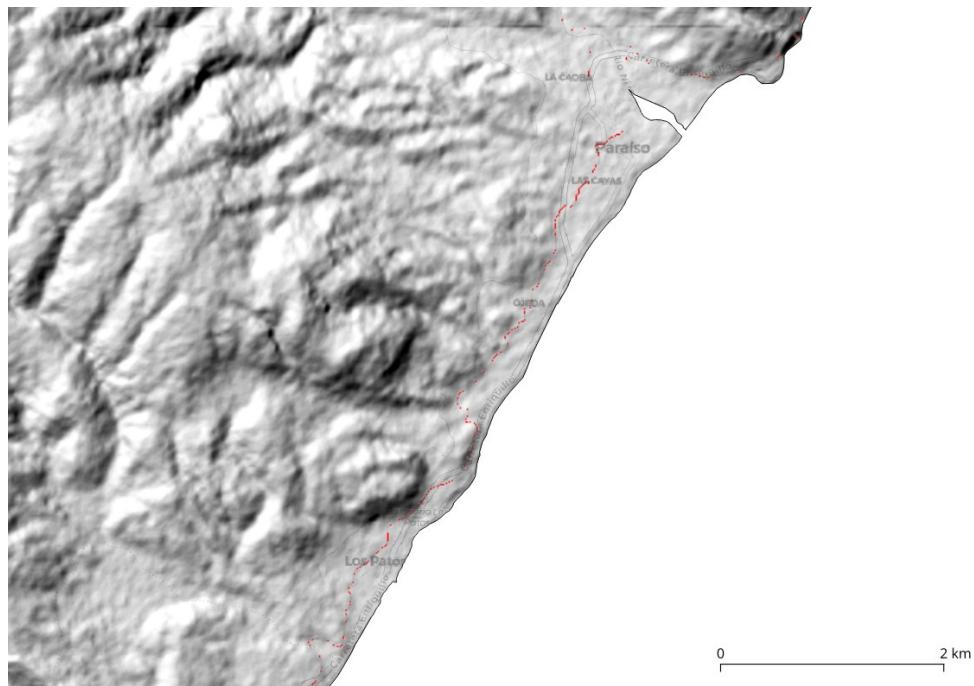


Figura S1: DEM sin procesar, representado como relieve sombreado. Nótese los píxeles sin datos, destacados en color rojo (Los Patos-Ojeda-Paraíso, provincia Barahona, sudoeste de República Dominicana)

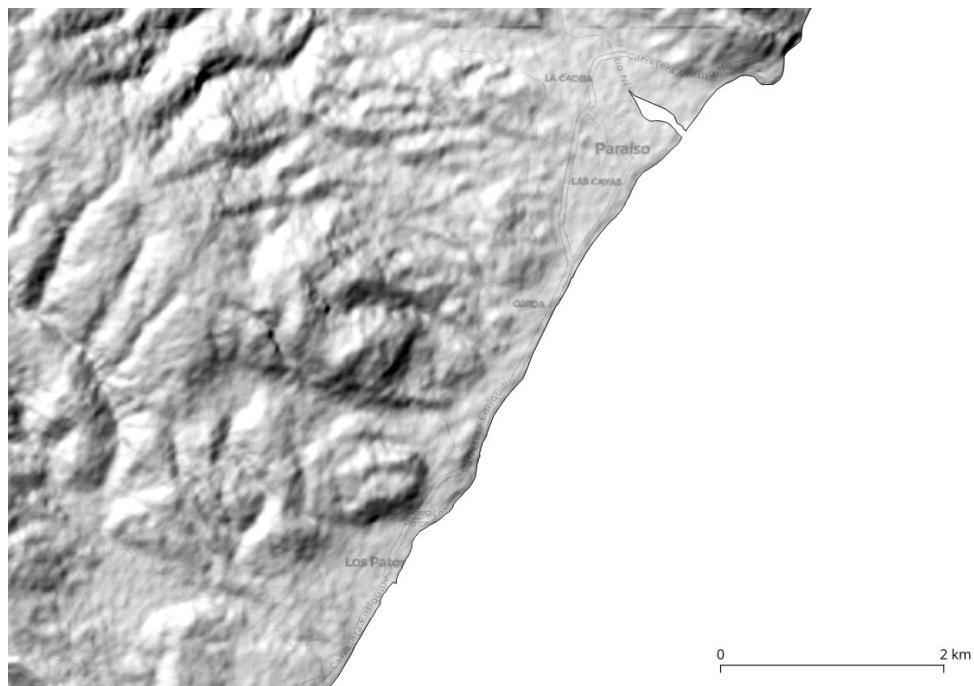


Figura S2: DEM sin procesar, representado como relieve sombreado. Los píxeles sin datos fueron eliminados (Los Patos-Ojeda-Paraíso, provincia Barahona, sudoeste de República Dominicana)

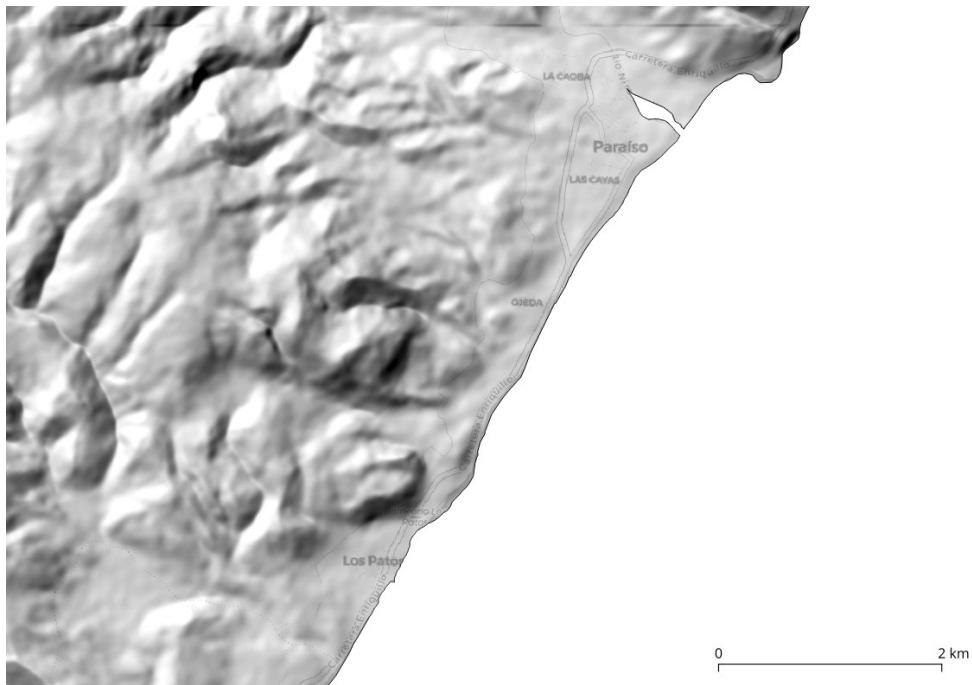


Figura S3: DEM suavizado, representado como relieve sombreado. Nótese la conservación de las morfologías principales y la eliminación del ruido sobre éstas (Los Patos-Ojeda-Paraíso, provincia Barahona, sudoeste de República Dominicana)

417 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
 418 (Lindsay, 2018; Lindsay et al., 2019). Para aplicar esta herramienta, primero exportamos el DEM desde la
 419 base de datos de GRASS GIS a archivo GeoTIFF, y posteriormente aplicamos el suavizado. Finalmente,
 420 importamos el DEM suavizado nuevamente a la base de datos de GRASS GIS para continuar el procesamiento
 421 en dicha aplicación.
 422

```
# 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)
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/los-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
```

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

```
# 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 relleno 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 dem_pseudo_ortometrico
# n: 306462417
# minimum: -51.4456
# maximum: 3102.34
# range: 3153.79
# mean: 403.703
# mean of absolute values: 403.858
# standard deviation: 487.27
# variance: 237432
# variation coefficient: 120.7%
# sum: 123719658638.311
```

429 El resumen estadístico proporcionado por la herramienta **r.univar** de GRASS GIS, usando la máscara
 430 ajustada a los límites costeros e internacional del país, informa que la elevación mínima es -51.5 m, mientras
 431 que la máxima es 3102.34 m, para un rango de casi 3154 m. El valor mínimo probablemente no está bien
 432 recogido, debido a que la máscara empleada podría estar eliminando elevaciones muy bajas en el área
 433 de la Hoya de Enriquillo. La elevación media, considerando tanto los negativos como los positivos, es de

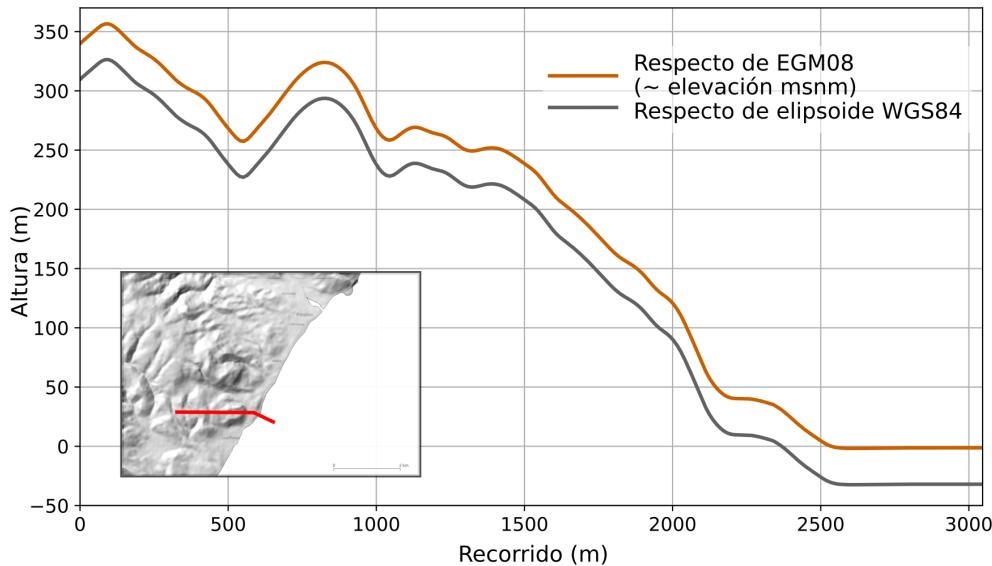


Figura S4: Alturas respecto de geoide EGM08 (~ortométrica) y sobre elipsoide WGS84, de un transecto descendente desde Bahoruco Oriental al Mar Caribe (Los Patos-Ojeda-Paraíso, provincia Barahona, sudoeste de República Dominicana)

434 aproximadamente 404 m, con desviación estándar de 487 m y coeficiente de variación de 121 %. Remarcamos
 435 que, aunque ASF advierte de no usar este modelo para fines de elevación, el valor máximo se ajusta bastante a
 436 la elevación máxima conocida en República Dominicana, que es el pico Duarte (Instituto Geográfico Nacional,
 437 2022).

438 A continuación, efectuamos el procedimiento de tallado o grabado de una red preexistente sobre el DEM,
 439 conocido como *stream burning* (Lindsay, 2016). Con este procedimiento, logramos que los píxeles del DEM
 440 intersectados con el vectorial de la red preexistente, adquieran un valor muy bajo respecto de su entorno,
 441 para asegurar que los algoritmos automáticos de análisis hidrológico dirijan el flujo a través de los lechos
 442 de ríos establecidos. El tallado es particularmente útil, incluso esencial, en áreas planas, ya que ayuda a los
 443 algoritmos automáticos a producir redes hidrográficas más realistas y topológicamente correctas. Sin embargo,
 444 su aplicación requiere de una cuidadosa selección de la red preexistente a tallar. Para crearla, usamos
 445 una red de drenaje de cursos fluviales seleccionados, que incluyó sólo los de gran longitud, comúnmente ríos
 446 permanentes, de lecho ancho y claramente establecidos. Nos apoyamos en imágenes satelitales (Google; Airbus,
 447 CNES; Airbus, Landsat; Copernicus; Maxar Technologies; U.S. Geological Survey, 2023) y, ocasionalmente, en
 448 el MTN-50K (Instituto Cartográfico Militar (ICM), 1989). Complementamos con OpenStreetMap contributors
 449 (2017), ya que este servicio provee información vectorial de fácil acceso y precisa. El resultado consistió en una
 450 red de cursos largos seleccionados de República Dominicana, representada por los ríos Artibonito, Yaque del
 451 Norte, Yuna, Yaque del Sur, varios ríos del extremo meridional de la cordillera Central y del borde sudoriental
 452 del país, así como algunos ríos seleccionados de la cordillera Septentrional.

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

```
# Importar red a GRASS
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
# y número de segmentos (ejecutar en casos de actualización)
```

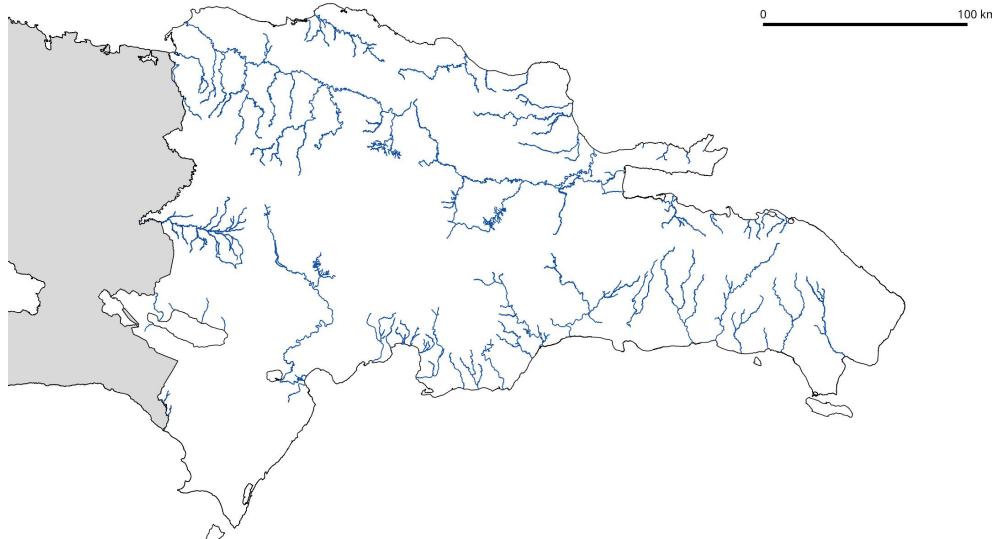


Figura S5: Mapa de la red de cursos largos creada para el estudio a partir de varias fuentes (más detalles, en el texto).

```
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
```

- 458 Finalmente, importamos nuestra red de cursos largos a la base de datos de GRASS GIS y generamos
 459 estadísticas básicas. Se trata de una red compuesta por **1047 segmentos** que suman un total de **4895.88**
 460 **kilómetros** de longitud. Cabe señalar que esta red no tiene valor hidrográfico, pues, como indicamos, ignora
 461 los lagos para garantizar la integridad topológica. Desaconsejamos su uso para otro fin que no sea el grabado
 462 de un DEM.
- 463 El siguiente paso consistió en realizar el *stream burning* (tallado) de la red de cursos largos con distintos
 464 algoritmos sobre el DEM. Probamos las funciones *r.carve* y *r.mapcalc* (álgebra de mapas) de GRASS
 465 GIS, y *FillBurn* de WhiteboxTools (GRASS Development Team, 2022a; Lindsay, 2018). Sin embargo, es
 466 importante señalar que, dependiendo del algoritmo usado, el grabado modifica de forma diferente el DEM.
 467 Además, algunos algoritmos modifican no solamente los píxeles intersectados sino también otros píxeles,
 468 incluso pueden llegar a cambiar los valores en el DEM completo. Nosotros priorizamos un método de grabado
 469 que fuese efectivo pero que a la vez produjese la mínima alteración sobre el DEM.
- 470 Comenzamos con *r.carve*, una herramienta diseñada para grabar el DEM sin modificarlo sustancialmente,
 471 permitiendo al mismo tiempo configurar la profundidad y la anchura del grabado (GRASS Development
 472 Team, 2022b; Petrasova et al., 2011). Por defecto, la anchura de lecho es equivalente a la resolución del
 473 DEM. La profundidad puede definirse por el usuario, para lo cual nosotros establecimos 100 metros. Pudimos
 474 tallar la red de cursos largos sobre el DEM con esta herramienta, generando un resultado que consideramos
 475 bueno, aunque el proceso ocupó más de 1 hora de tiempo de cómputo. Esta alternativa es recomendada si
 476 resultase imprescindible conservar las propiedades topográficas en el DEM, pero debe tenerse en cuenta que
 477 su rendimiento es muy bajo. En los casos en los que se use un DEM de resolución baja, se recomienda usar
 478 esta alternativa. Sin embargo, a nosotros no nos resultó apropiado este método por razones de rendimiento,

479 que explicamos a continuación. Para evaluar el rendimiento del DEM tallado, realizábamos un procesamiento
 480 hidrológico abreviado (generación de la acumulación de flujo y extracción de la red con `r.watershed`); si
 481 los productos generados (e.g. red hidrográfica) no nos parecían idóneos, nos veíamos en la necesidad iterar,
 482 editando la red y aplicando el tallado nuevamente. Dado que el complemento `r.carve` era poco eficiente,
 483 preferimos buscar otras opciones de tallado.

```
# Limpiar red manualmente en QGIS
# Para mejorar la topología, se puede aplicar v.clean directamente en QGIS

# Tallar red de cursos largos
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
```

484 Posteriormente, probamos el tallado usando álgebra de mapas con herramienta `r.mapcalc` de GRASS GIS
 485 (GRASS Development Team, 2022a; GRASS Development Team, 2022c; Larson et al., 1991; Shapiro y
 486 Westervelt, 1994). Para tallar con álgebra de mapas, primero normalizamos el DEM, generamos una capa
 487 booleana ráster con la red de cursos largos, la restamos al DEM normalizado y luego, para restablecer los
 488 valores originales fuera de las áreas talladas, multiplicamos el ráster resultante de la resta nuevamente por el
 489 rango del DEM (máximo - mínimo). El resultado es un DEM tallado, en el que sólo los píxeles por donde
 490 circula la red quedaron con una profundidad equivalente al rango.

```
# Limpiar red manualmente en QGIS
# Para mejorar la topología, se puede aplicar v.clean directamente en QGIS

# Tallar
# Rasterizar red (los píxeles de la red valdrán 1, el resto, nulo)
v.to.rast --overwrite input=red_mtn50k_cleaned_largos type=line use=val \
  output=red_mtn50k_cleaned_largos
# Convertir nulos a cero
r.null map=red_mtn50k_cleaned_largos null=0
# Determinar estadísticas univariantes del DEM
r.univar map=dem_pseudo_ortometrico
# minimum: -51.4456
# maximum: 3102.34

# Aplicar normalización y resta
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
# dem_tallado = stddemburn * dem_pseudo_ortometrico # Alternativa
EOF
echo "Tallado finalizado" | mail -s "Mensaje sobre tallado" USUARIO@MAIL
```

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

```
# 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
```

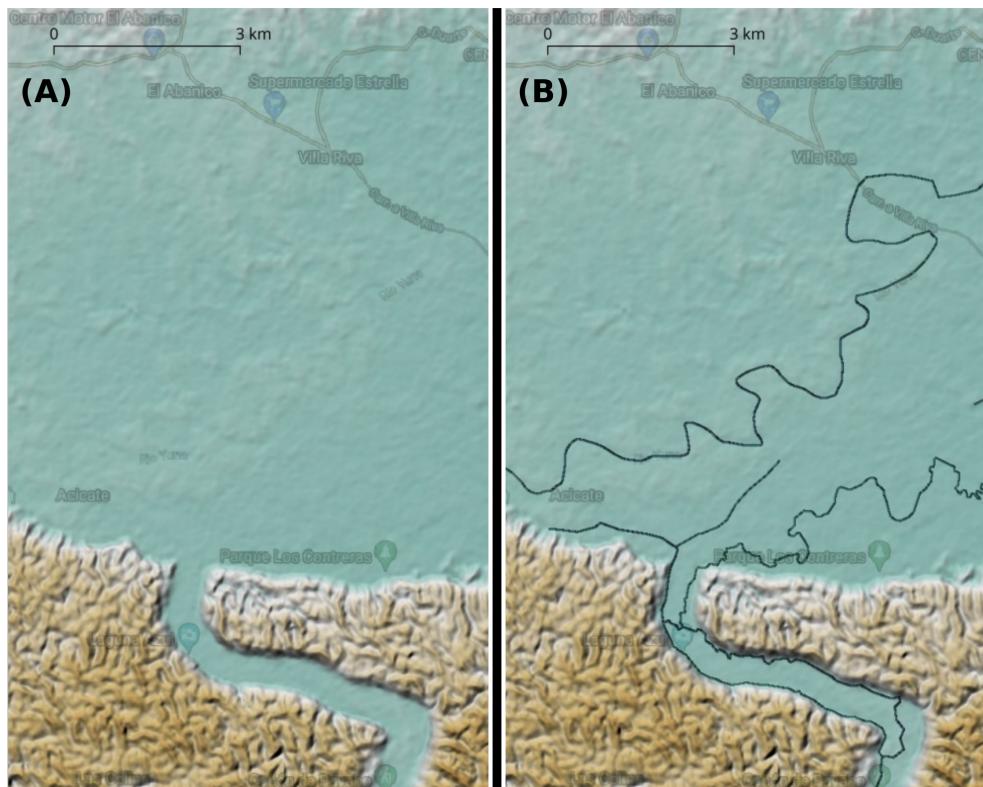


Figura S6: DEM sin aplicación de hidrografía (A), y con aplicación de hidrografía seleccionada (B). El DEM se representa como relieve sombreado y la aplicación se denota como un grabado oscurecido (cañón del río Payabo, Los Haitises, y río Yuna (proximidades de Arenoso, nordeste de República Dominicana)

```
echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
## real 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 con WBT
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
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
```

499 A continuación, implementamos algoritmos para superponer depresiones sobre el Modelo Digital de Elevación
 500 (DEM). Este paso es esencial para guiar el flujo de agua a través de las depresiones, en los lugares donde éstas
 501 sean presentes. Es importante tener en cuenta que sólo se deben superponer aquellas depresiones que tengan

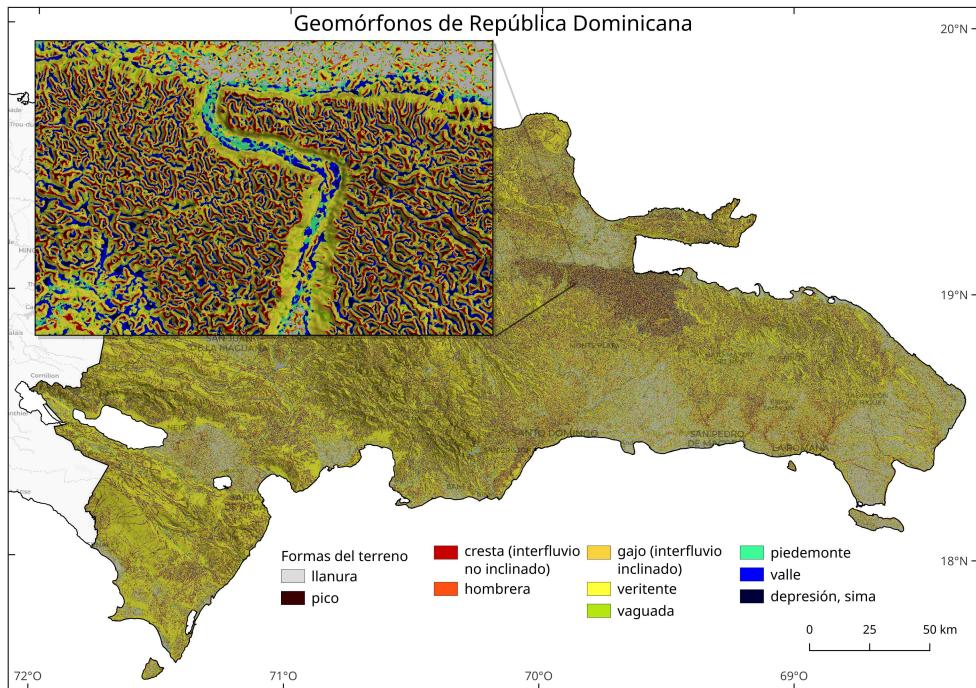


Figura S7: "Geomórfonos" de República Dominicana generados a partir de DEM ALOS PALSAR. En cartela, detalle del cañón del río Payabo

502 la capacidad de capturar la escorrentía superficial, como los ponores o pérdidas, ya que son estos elementos
 503 los que condicionarán la hidrología en su entorno. El proceso de superposición de depresiones es fundamental
 504 para obtener límites de cuencas y redes de drenaje coherentes.

505 Para generar un conjunto de depresiones, utilizamos la capa de litologías de la República Dominicana,
 506 proporcionada por Mollat et al. (2004). A partir de este recurso, identificamos y separamos las calizas que
 507 presentaban un grado de karstificación suficiente, basándonos en nuestra experiencia de campo. Además,
 508 creamos una capa de depresiones empleando el complemento `r.geomorphon` y utilizando el DEM como
 509 insumo, según el método propuesto por Jasiewicz y Stepinski (2013). También digitalizamos manualmente
 510 algunas depresiones cuya ubicación ya conocíamos a partir de nuestra experiencia en el terreno. Finalmente,
 511 realizamos una intersección de las tres fuentes de datos para producir una capa exhaustiva que refleja las
 512 depresiones capaces de capturar el flujo superficial.

513 No obstante, nuestro resultado debe tomarse con cautela en el relieve kárstico. Como bien es sabido, no
 514 todas las calizas representadas en la geología dominicana están lo suficientemente karstificadas como para
 515 desarrollar depresiones. Por esta razón, usamos la capa de calizas a discreción, y sólo conservamos aquellos
 516 afloramientos de calizas en los que, desde nuestro conocimiento de terreno, no se evidenciaba escorrentía
 517 superficial. Asimismo, reservamos aquellas calizas donde encontramos evidencia de depresiones en la topografía
 518 detallada y en imágenes satelitales. No obstante, gran parte de este trabajo se realizó manualmente, por lo
 519 que nuestra colección de dolinas tiene suficiente precisión, pero no es exhaustiva. Además, es virtualmente
 520 imposible identificar todas las depresiones que funcionan como pérdidas en imágenes satelitales o en mapas
 521 topográficos y geológicos. Finalmente, un elemento adicional complica aún más las cosas en los relieves
 522 kársticos: muchas pérdidas no ocurren a través de una depresión topográficamente visible, pues gran parte de
 523 la infiltración se produce a través de fracturas en la roca, pasando al endokarst y a la zona vadosa de manera
 524 "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_tallado.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

# Importa 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

```

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

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

535 Para realizar análisis de cuencas y redes de drenaje en GRASS GIS, el complemento por excelencia es
 536 `r.watershed` (GRASS Development Team, 2022d), el cual ofrece la posibilidad de crear mapas de acumulación
 537 de flujo usando algoritmos avanzados, y facilita también la tarea de extraer *talwegs* y redes de drenaje, y
 538 delimitar cuencas. Alternativamente, en los casos en los que existe especial interés por el análisis de redes
 539 de drenaje y la jerarquía hidrográfica, se utiliza la familia de complementos `r.stream*` (Jasiewicz y Metz, 2011).
 540 Dentro de esta familia se encuentran `r.stream.extract` para generar la red, `r.stream.order` para calcular
 541 su jerarquía (requiere de los subproductos generados para la herramienta anterior), y `r.stream.basins` para
 542 crear cuencas hidrográficas en función de la jerarquía. En este sentido, debemos elegir apropiadamente entre

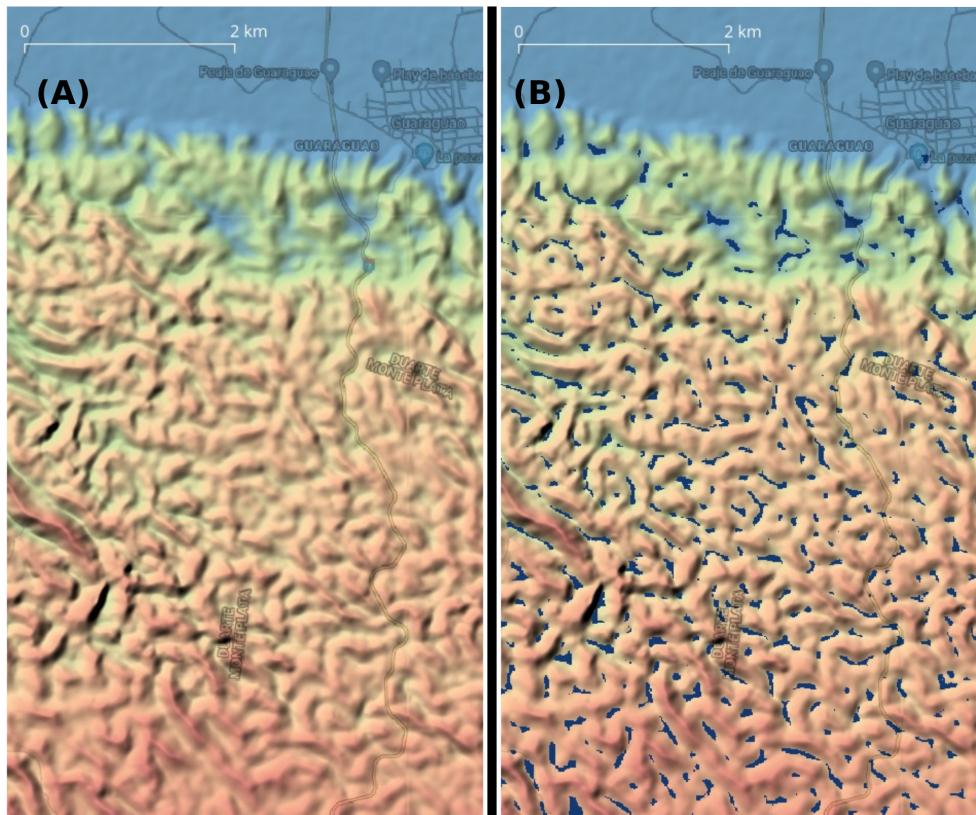


Figura S8: DEM ALOS PALSAR representado como mapa hipsométrico (rojo y marrón representan terreno elevado, verde y azul claro terreno bajo) sobre relieve sombreado, mostrando el área de Guaraguao, Los Haitises, al sur del río Yuna (noroeste de República Dominicana). (A) sin mostrar depresiones, (B) mostrando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

- 543 `r.watershed` o la familia `r.stream*` según nuestras necesidades y objetivos, o usar ambos si nos interesan
 544 resultados combinados, pero tomando las debidas precauciones.
- 545 Ambos complementos necesitan de dos mapas derivados para generar productos hidrológicos, los cuales
 546 pueden ser generados por ellos mismos; estos son el mapa de la red propiamente (`stream_rast`), y el de
 547 dirección de drenaje (`direction`). En este sentido, debe evitarse combinar mapas generados por algoritmos
 548 distintos para mantener la consistencia (por ejemplo, se desaconseja generar `stream_ras` con `r.watershed`
 549 y `direction` con `r.stream*`, y viceversa), por lo que se recomienda generar ambos mapas por medio del
 550 mismo algoritmo.
- 551 Considerando que nuestro objetivo principal es la jerarquía de red, podíamos iniciar con `r.stream.extract`
 552 para generar los insumos para `r.stream.order`. Pero dado que este último requiere el mapa de acumulación
 553 flujo, el cual sólo es producido por `r.watershed`, generamos primero este mapa. Por lo tanto, sólo usamos
 554 `r.watershed` para obtener el mapa de acumulación que necesitamos en la aplicación de la familia `r.stream.*`.
- 555 Previo al inicio de los análisis hidrológicos, aplicamos una máscara ajustada a la línea de costa y los límites
 556 fronterizos del país para evitar que las redes extraídas se extiendan al mar, y creamos una zona de influencia
 557 en el límite fronterizo para permitir la salida y entrada de flujo a través de este. Posteriormente, extrajimos
 558 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 (EJECUTAR SÓLO SI ES ESTRICAMENTE NECESARIO, PUES Tarda MUCHO)
r.mask -r
r.mask vector=mascara_1km_solo_en_frontera
```

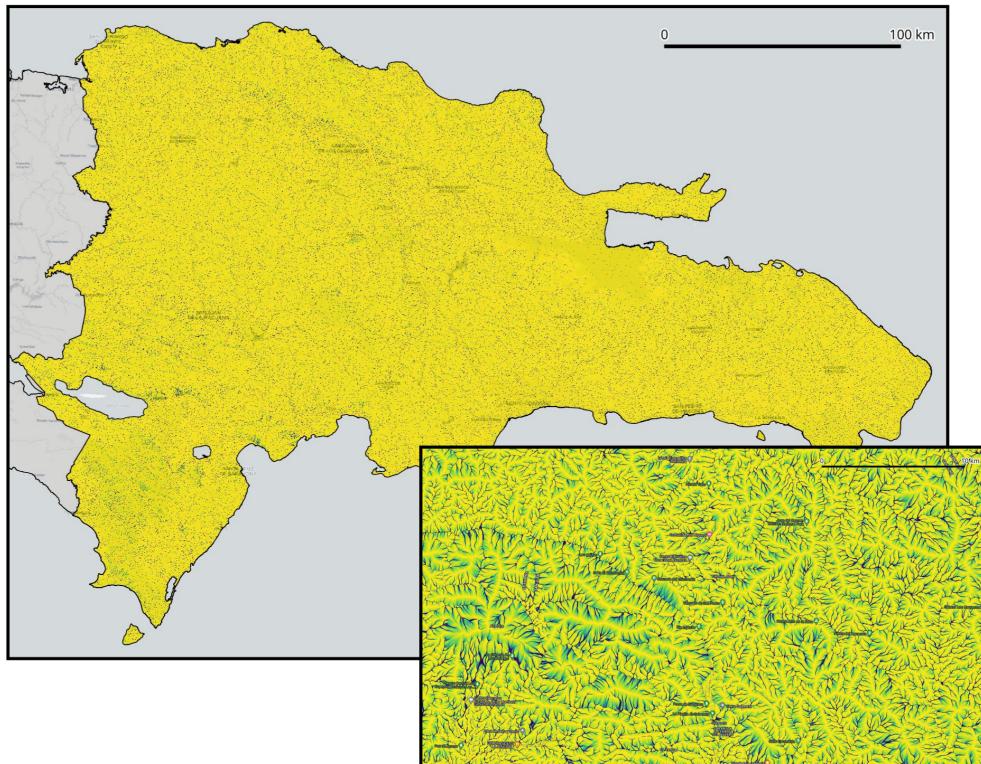


Figura S9: Mapa de acumulación de flujo generado con ‘r.watershed’. En cartela, detalle del mapa en la cuenca del río Yaque del Sur.

```
# Acumulación de flujo
time r.watershed --overwrite --verbose elevation=dem_tallado \
depressions=depresiones_todas accumulation=rwshed_acum \
threshold=180 stream=rwshed_talwegs \
# El umbral 180 se usó en la extracción de una red de muestra, como forma de
# previsualizar una hidrografía inicial y no como red definitiva.
# Otras opciones posibles del addon son las siguientes (útiles en otras aplicaciones):
# 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 \
memory=32000
echo "r.watershed finalizado" | mail -s "Mensaje sobre r.watershed" USUARIO@MAIL
## real 9m47.041s
```

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

566 Siguiendo las mejores prácticas, realizamos diversas ejecuciones del complemento **r.stream.extract** usando
 567 varios umbrales para identificar la red hidrográfica más adecuada en nuestra área de interés (Freeman,
 568 1991; Jasiewicz y Metz, 2011; Marchesini et al., 2021). Para seleccionar un umbral de acumulación óptimo,
 569 consideramos cuatro criterios: consistencia con estudios similares, suficiente densidad de red, evitar una

570 generalización excesiva de la red, y prevenir una red demasiado densa que incluya áreas sin características
 571 hidrológicas mínimas. Dado que nuestro DEM tiene una resolución espacial de 12.5 m, examinamos diferentes
 572 umbrales para obtener una red hidrográfica adecuada. En `r.stream.extract`, optamos por los umbrales de
 573 acumulación de 180, 540 y 900 celdas, equivalentes a 3, 8 y 14 hectáreas de superficie, respectivamente. Estos
 574 umbrales están en línea con los utilizados en estudios que consultamos, donde se evaluaron áreas propensas a
 575 inundaciones y cuencas de captación (Freeman, 1991; Marchesini et al., 2021).

576 El código necesario para generar las distintas redes evaluadas lo implementamos mediante un bucle `for` en
 577 Bash para mayor eficiencia y consistencia en el procesamiento. Hicimos que el bucle iterara automáticamente
 578 sobre los tres umbrales de acumulación, usando los valores de umbral como iterador (`i={180..900..360}`,
 579 debe leerse como “itera desde 180 a 900 en incrementos de 360 enteros”, resultando en los valores 180, 540 y
 580 900), el cual pasamos como argumento del parámetro `threshold`. Finalmente, para cada red generada con
 581 los distintos umbrales, calculamos la longitud de cursos fluviales, actualizamos la base de datos de GRASS
 582 GIS y generamos un archivo de texto resumen que posteriormente importamos a R para obtener estadísticos
 583 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 \
      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=rwshed_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

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
```

584 Evaluamos los resultados y recopilamos los estadísticos esenciales de cada red formada con los distintos
 585 umbrales. Para los umbrales de 180, 540 y 900 celdas, se obtuvieron **419646, 192453 y 130244 segmentos**
 586 correspondientemente, acumulando **138444, 98213 y 82081 kilómetros** de longitud en cada caso. Para
 587 cada una de las redes, evaluamos el grado de alineación con nuestros criterios de selección de la red óptima,
 588 tras lo cual elegimos la red generada con el umbral de acumulación de 540 celdas. Sin embargo, mantuvimos
 589 las restantes en la base de datos y les aplicamos todos los subsiguientes algoritmos de análisis de hidrología
 590 computacional, hasta alcanzar los resultados finales.

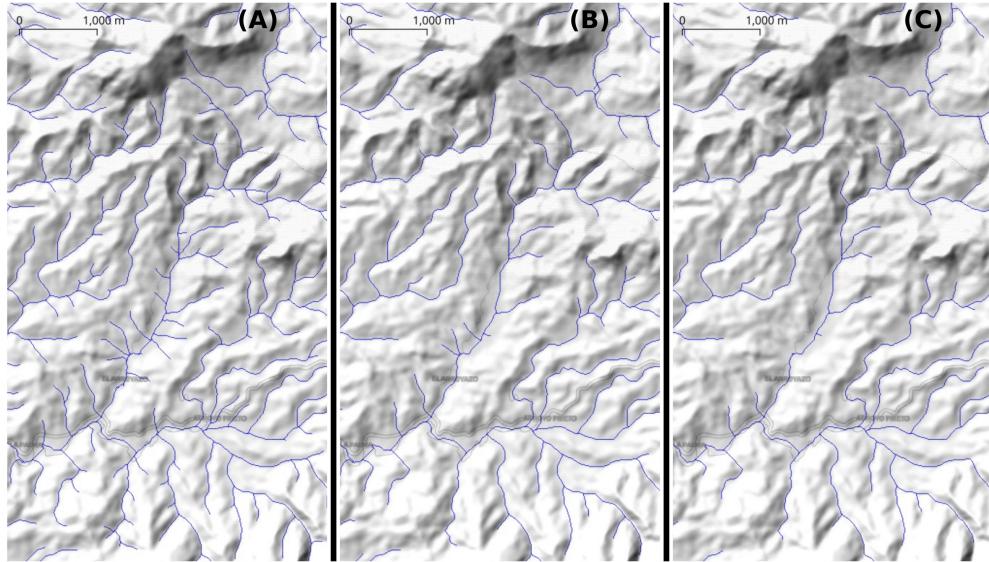


Figura S10: Red de drenaje extraída para tres umbrales de acumulación: (A) 180 celdas, equivalente a 3 ha; (B) 540 celdas, equivalente a 8 ha; (C) 900 celdas, equivalente a 14 ha. La imagen de fondo es un relieve sombreado a partir de DEM ALOS PALSAR, mostrando el área de El Arroyazo en la reserva científica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

591 Posteriormente, calculamos el orden jerárquico de la red hidrográfica, proceso que repetimos para cada uno
 592 de los umbrales de acumulación que definimos previamente, es decir, 180, 540 y 900 celdas. Al igual que
 593 en casos anteriores, utilizamos un bucle en Bash para iterar automáticamente sobre los tres umbrales de
 594 acumulación; en este caso, los valores del índice se correspondían con los sufijos de los mapas de entrada (`_$i`).
 595 El núcleo del bucle, en este caso, contiene la ejecución del complemento `r.stream.order` de GRASS GIS.
 596 Este complemento se invoca con una serie de argumentos que especifican los mapas de entrada y salida que
 597 se deben usar en el cálculo. De manera específica, le proporcionamos el mapa de `talwegs` o cursos (parámetro
 598 `stream_rast`), el mapa de dirección de drenaje (`direction`), el mapa de elevación (`elevation`), y el mapa
 599 de acumulación (`accumulation`), todos correspondientes al umbral de acumulación que está siendo procesado
 600 en cada iteración. Adicionalmente, especificamos los nombres de los mapas de salida que contienen el orden
 601 de red según los métodos de Strahler y Horton (argumentos `strahler` y `horton`) (Horton, 1945; Strahler,
 602 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 \
```

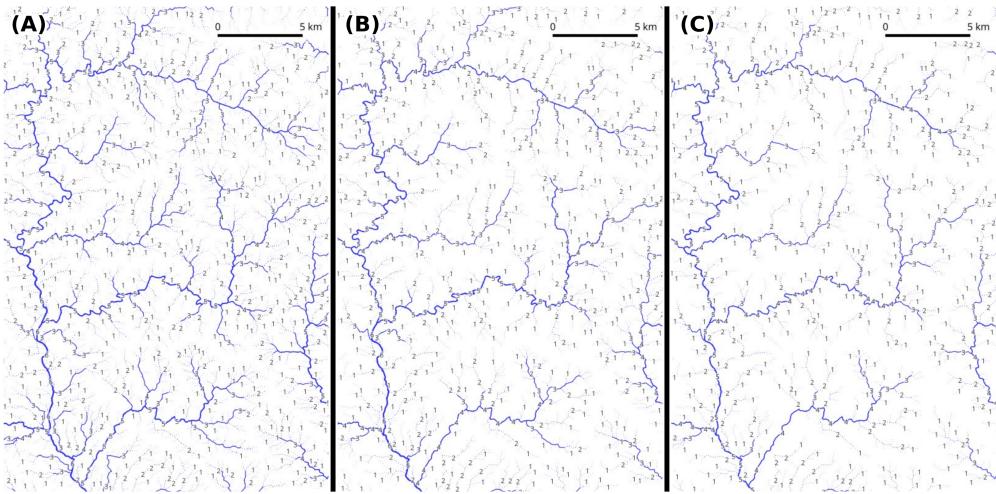


Figura S11: Orden de red de Strahler para redes de drenaje generadas a partir de tres umbrales de acumulación: (A) 180 celdas, equivalente a 3 ha; (B) 540 celdas, equivalente a 8 ha; (C) 900 celdas, equivalente a 14 ha. El área mostrada corresponde al río San Juan, afluente del río Yaque del Sur (vertiente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

```
#      elevation=dem_tallado accumulation=rushed_acum stream_vect=order.todos \
#      topo=topologia_orden memory=32000
# echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
## real
```

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

```
# Delimitar cuencas según jerarquía
# En bucle
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 $j...\n"; \
    time r.stream.basins -c --overwrite direction=rstream_direccion_umbral_$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 ~ 0m40s repetido tantas veces como órdenes para cada umbral de acumulación
```

612 Posteriormente, delimitamos las cuencas con desembocadura en mares, lagos, lagunas o en pérdidas kársticas.
 613 En esta sección aplicamos el mismo complemento que en el paso anterior (**r.stream.basins**) en bucle doble
 614 anidado, pero en esta ocasión especificamos la opción **-1**. Es decir, delimitamos las cuencas completas, cuya
 615 red desemboca en el mar (exorreicas), o en lagos, lagunas y pérdidas del karst (endorreicas), y excluimos las
 616 subcuencas de redes tributarias (eg. red cuyo curso principal desemboca en otro río). Por lo tanto, se trata de

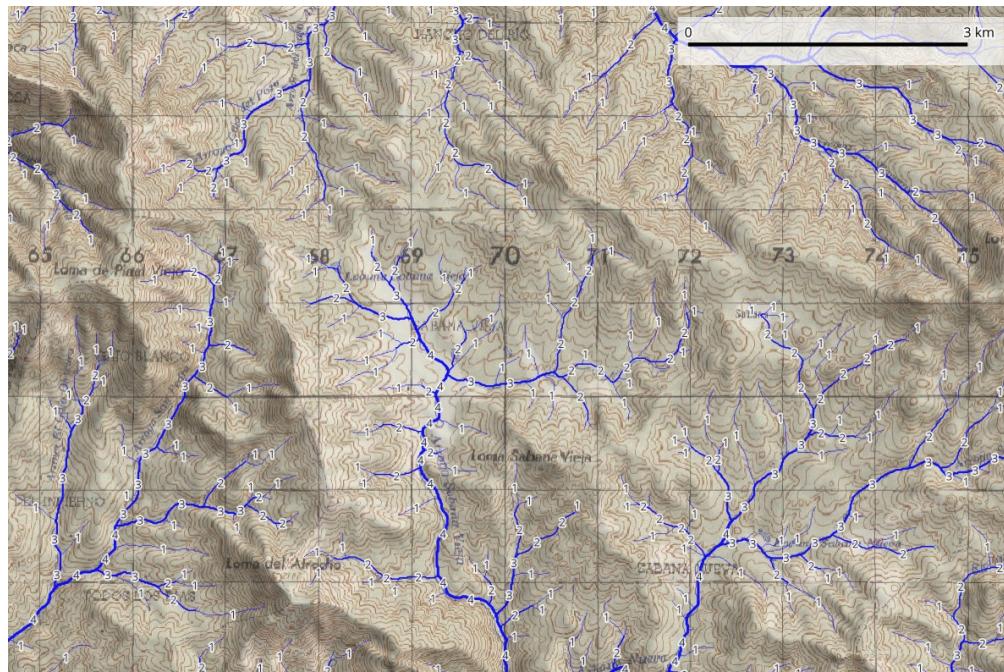


Figura S12: Orden de red de Strahler en el área del pico de la Viuda y Sabana Vieja, provincia San Juan (vertiente sur de la cordillera Central de República Dominicana). Esta red fue generada usando un umbral de acumulación de 180 celdas, equivalente a 3 ha. De fondo, mapa topográfico nacional escala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

617 cuencas propiamente en la acepción más formal del término, que significa que no existe—o no se conoce ni se
618 puede detectar con información disponible—prolongación del drenaje superficial fuera de ellas.

```
# Delimitar cuencas terminales
# En bucle
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 $j...\n"; \
      time r.stream.basins -lc --overwrite direction=rstream_direccion_umbral_$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 ~ 0m40s repetido tantas veces como órdenes para cada umbral de acumulación
```

619 Finalmente, convertimos las cuencas a modelo de datos vectorial, pero para evitar agrandar la base de datos
620 innecesariamente, elegimos sólo las cuencas generadas para el umbral de 540 celdas. Los vectoriales resultantes
621 nos permitieron un mejor manejo de los datos para análisis y representación de la cuencas. Describimos el
622 procedimiento detallado a continuación.

623 Comenzamos la vectorización ejecutando un bucle para convertir cada capa ráster de cuencas terminales
624 correspondiente a cada orden de red (desde 1 a 8) en un mapa vectorial de tipo área. Para realizar esta
625 conversión, utilizamos el complemento **r.to.vect** de GRASS GIS, añadiendo también una nueva columna
626 llamada **strahler** a la tabla de atributos de cada capa vectorial, que luego actualizamos con el valor del orden
627 de red Strahler correspondiente. Después de procesar las cuencas de cada orden, fusionamos todas las capas
628 vectoriales en una sola utilizando el complemento **v.patch**. Esto produjo una única capa vectorial conteniendo
629 información sobre todas las cuencas terminales para todos los órdenes Strahler. Es importante aclarar que sólo
630 fueron propiamente clasificadas como polígonos con de orden de red, aquellas las áreas del ráster que contaban
631 con categorías asignadas (e.g. píxeles con valor 1 a 8), es decir, aquellas a las que el algoritmo **r.stream.basins**

632 asignó un orden de red debidamente. Las áreas que formaban el fondo (e.g. píxeles con valor cero), que
 633 corresponden a espacios con drenaje hacia depresiones sin pertenencia a jerarquía alguna, conforman la capa
 634 “0” del mapa vectorial generado (`rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned 0`).
 635 Por esta razón, el mapa vectorial de cuencas generado, presenta espacios vacíos; si hiciera falta recuperar
 636 dichos espacios, bastaría con cargar la referida capa “0”, tomando en consideración que sus elementos no
 637 cuentan con atributos aprovechables.

638 Luego, limpiamos y preparamos los datos para el análisis. Primero, corregimos la topología y actualizamos el
 639 área de cada cuenca usando el complemento `v.clean`. Eliminamos las áreas inferiores a 200 metros cuadrados
 640 (cuencas espurias) para mejorar la calidad de los datos. Posteriormente, eliminamos los registros con un valor
 641 de área nulo (artefactos). Estas etapas de limpieza y preparación son críticas para garantizar la precisión y
 642 relevancia de nuestros resultados.

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

```

for i in `echo {1..8..1}`; \
  do 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
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

# 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_terminal_umbral_540_todos \
  output=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned \
  tool=rmarea threshold=200
v.to.db --overwrite option=area type=centroid columns=area \
  map=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned
v.db.droprow rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned \
  output=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned_2 where="area IS NULL"
g.rename --overwrite \
  vector=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned_2, \
  rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned

# Excluir cuencas strahler>=4 y area<=1e6
v.db.droprow rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned \
  output=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned_2 \
  where="strahler >= 4 and area <= 1e6"
g.rename --overwrite \
  vector=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned_2, \
  rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned

## 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

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)
rstream_cuencas_540_por_orden <- stats_rstream_cuencas_540 %>%
  rename(`Orden de red (Strahler)` = strahler) %>%
  group_by(`Orden de red (Strahler)` ) %>%
  summarise(`Número de cuencas` = n(),
            `Área promedio` = mean(area),
            `Área total` = sum(area))

```

647 4.1. Suplemento para la sección “Resultados”

648 Realizamos análisis estadísticos de las cuencas terminales. Se necesita descargar el comprimido con los datos
 649 del estudio, colocar el directorio gpkg-shp en el directorio raíz de este repo. Como medida de seguridad,
 650 excluimos cuencas con orden de red cuatro o mayor y con área menor 1². Posteriormente, generamos un
 651 nuevo objeto de cuencas de orden cuatro o mayor para análisis focalizados.

```

cuencas <- read_sf('gpkg-shp/rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned.gpkg')
cuencas4mas <- cuencas[cuencas$strahler >= 4, ]

```

652 Informe de la sesión de R

```

sessionInfo()

653 ## R version 4.3.0 (2023-04-21)
654 ## Platform: x86_64-pc-linux-gnu (64-bit)
655 ## Running under: Ubuntu 20.04.3 LTS
656 ##
657 ## Matrix products: default
658 ## BLAS:    /usr/lib/x86_64-linux-gnu/blas/libblas.so.3.9.0
659 ## LAPACK:  /usr/lib/x86_64-linux-gnu/lapack/liblapack.so.3.9.0
660 ##
661 ## locale:
662 ## [1] LC_CTYPE=es_DO.UTF-8      LC_NUMERIC=C
663 ## [3] LC_TIME=es_DO.UTF-8      LC_COLLATE=es_DO.UTF-8
664 ## [5] LC_MONETARY=es_DO.UTF-8   LC_MESSAGES=es_DO.UTF-8
665 ## [7] LC_PAPER=es_DO.UTF-8     LC_NAME=C
666 ## [9] LC_ADDRESS=C              LC_TELEPHONE=C
667 ## [11] LC_MEASUREMENT=es_DO.UTF-8 LC_IDENTIFICATION=C
668 ##
669 ## time zone: America/Santo_Domingo
670 ## tzcode source: system (glibc)
671 ##
672 ## attached base packages:
673 ## [1] stats      graphics   grDevices  utils      datasets   methods    base
674 ##
675 ## other attached packages:
676 ## [1] e1071_1.7-13      gdalUtilities_1.2.4 lubridate_1.9.2
677 ## [4]forcats_1.0.0       stringr_1.5.0        dplyr_1.1.2
678 ## [7] purrr_1.0.1        readr_2.1.4         tidyverse_2.0.0
679 ## [10] tibble_3.2.1       ggplot2_3.4.2       tidyverse_2.0.0
680 ## [13] kableExtra_1.3.4    sf_1.0-12          raster_3.6-20
681 ## [16] sp_1.6-0
682 ##
683 ## loaded via a namespace (and not attached):
684 ## [1] gtable_0.3.3       xfun_0.39          lattice_0.20-45   tzdb_0.4.0
685 ## [5] vctrs_0.6.2        tools_4.3.0        generics_0.1.3     parallel_4.3.0
686 ## [9] proxy_0.4-27       fansi_1.0.4        pkgconfig_2.0.3    Matrix_1.4-0
687 ## [13] KernSmooth_2.23-20 webshot_0.5.4      lifecycle_1.0.3    compiler_4.3.0

```

```

688 ## [17] munsell_0.5.0      terra_1.7-29      codetools_0.2-18   htmltools_0.5.5
689 ## [21] class_7.3-20        yaml_2.3.7       crayon_1.5.2      pillar_1.9.0
690 ## [25] classInt_0.4-9    cachem_1.0.8     wk_0.7.3         conflicted_1.2.0
691 ## [29] tidyselect_1.2.0   rvest_1.0.3      digest_0.6.31    stringi_1.7.12
692 ## [33] fastmap_1.1.1    grid_4.3.0       colorspace_2.1-0  cli_3.6.1
693 ## [37] magrittr_2.0.3    utf8_1.2.3       withr_2.5.0       scales_1.2.1
694 ## [41] bit64_4.0.5       timechange_0.2.0 rmarkdown_2.21    httr_1.4.6
695 ## [45] bit_4.0.5        reticulate_1.30  png_0.1-8        hms_1.1.3
696 ## [49] ggspatial_1.1.8    memoise_2.0.1    evaluate_0.21    knitr_1.42
697 ## [53] viridisLite_0.4.2  s2_1.1.4        rticles_0.25    rlang_1.1.1
698 ## [57] Rcpp_1.0.10        glue_1.6.2       DBI_1.1.3       xml2_1.3.4
699 ## [61] vroom_1.6.3       jsonlite_1.8.4   svglite_2.1.1    rstudioapi_0.14
700 ## [65] R6_2.5.1         systemfonts_1.0.4 units_0.8-2

```

701 Referencias

- 702 Anderson, R. S. y Anderson, S. P. (2010). *Geomorphology: the mechanics and chemistry of landscapes*.
 703 Cambridge University Press.
- 704 ASF DAAC. (2014). *PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_high_res*. <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA>
- 705 Aziz, K. M. A. y Rashwan, K. S. (2022). Comparison of different resolutions of six free online DEMs with
 706 GPS elevation data on a new 6th of October City, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(20), 1585.
 707 <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10845-5>
- 708 Burn, D. H. (1997). Hydrological information for sustainable development. *Hydrological Sciences Journal*,
 709 42(4), 481-492. <https://doi.org/10.1080/02626669709492048>
- 710 Charlton, R. (2010). *Fundamentals of fluvial geomorphology* (Repr). Routledge.
- 711 CIDIAT y INDRHI. (1992). *Control de Inundaciones en la cuenca del Río Yaque del Sur*. Instituto Nacional
 712 de Recursos Hídricos (INDRHI).
- 713 Ehlschlaeger, C. R. (1989). *Using the A^T search algorithm to develop hydrologic models from digital elevation
 714 data*. 275281.
- 715 Foucault, A. y Raoult, J. F. (1985). *Diccionario de Geología*. MASSON. <https://books.google.com.do/books?id=x5FDpqAACAAJ>
- 716 Freeman, T. G. (1991). Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computers &
 717 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)
- 718 GADM. (2022). *GADM*. Available online: <https://gadm.org/index.html> (accessed on abril, 2023).
- 719 García, J. H. G. y Ojeda, A. O. (2011). Clasificación geomorfológica de cursos fluviales a partir de sistemas
 720 de información geográfica (SIG). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 56, 373-396.
- 721 GDAL/OGR contributors. (2022). *GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library*. Open Source
 722 Geospatial Foundation. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5884351>
- 723 Google; Airbus, CNES; Airbus, Landsat; Copernicus; Maxar Technologies; U.S. Geological Survey. (2023).
 724 *Google Maps*. <https://www.google.com/maps/>
- 725 GRASS Development Team. (2022a). *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software,
 726 Version 8.0.2*. Open Source Geospatial Foundation. <https://grass.osgeo.org>
- 727 GRASS Development Team. (2022b). *r.carve*. Generates stream channels. Takes vector stream data, transforms
 728 it to raster and subtracts depth from the output DEM. *GRASS GIS manual*. <https://grass.osgeo.org/grass82/manuals/r.carve.html>
- 729 GRASS Development Team. (2022c). *r.mapcalc* - Raster map calculator. *GRASS GIS manual*. <https://grass.osgeo.org/grass82/manuals/r.mapcalc.html>
- 730 GRASS Development Team. (2022d). *r.watershed* - Calculates hydrological parameters and RUSLE factors.
 731 <https://grass.osgeo.org/grass82/manuals/r.watershed.html>
- 732 GRASS Development Team. (2023). *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software,
 733 Version 8.2.0*. Open Source Geospatial Foundation. <https://grass.osgeo.org>
- 734 Gutiérrez Elorza, M. (2009). *Geomorfología* (Última reimpr). Pearson-Prentice Hall.
- 735 Halcrow-COR Ing. S.A. (2002). *Estudio de Vulnerabilidad de las Grandes Presas*. Instituto Nacional de
 736 Recursos Hídricos (INDRHI).
- 737 Hijmans, R. J. (2023). *raster: Geographic Data Analysis and Modeling*. <https://CRAN.R-project.org/package=raster>
- 738 Holmgren, P. (1994). Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: An
 739 empirical evaluation. *Hydrological Processes*, 8(4), 327-334. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360080405>

- 745 Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach
 746 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)
- 747 INDRHI. (1996). *Estadísticas del Agua en la República Dominicana*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos
 748 (INDRHI).
- 749 INDRHI. (2012). *Plan Hidrológico Nacional, República Dominicana*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos
 750 (INDRHI).
- 751 INDRHI. (2019). *Inventario de Estaciones Hidrometeorológicas. Informe Final*. Instituto Nacional de Recursos
 752 Hidráulicos.
- 753 INDRHI y AQUATER. (2000). *Estudio Hidrogeológico Nacional de la República Dominicana, Fase I. Memoria
 754 de Proyecto, 7 volúmenes*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI).
- 755 INDRHI y EPTISA. (2000). *Estudio Hidrogeológico Nacional de la República Dominicana, Fase II*. Instituto
 756 Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI).
- 757 Instituto Cartográfico Militar (ICM). (1989). *Serie E733 de mapas topográficos escala 1:50,000*. Instituto
 758 Cartográfico Militar.
- 759 Instituto Geográfico Nacional. (2022). *Medición por Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) de los
 760 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-picosp-mas-altos-de-las-antillas>.
- 761 Izzo, M., Rosskopf, C. M., Aucelli, P. P. C., Maratea, A., Méndez, R. E., Pérez, C. y Segura, H. (2010). A New
 762 Climatic Map of the Dominican Republic Based on the Thornthwaite Classification. *Physical Geography*,
 763 31, 455-472.
- 764 Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A. y Guevara, E. (2008). Hole-filled SRTM for the globe Version 4. available
 765 from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database (<http://srtm.csi.cgiar.org>), 15(25-54), 5.
- 766 Jasiewicz, J. y Metz, M. (2011). A new GRASS GIS toolkit for Hortonian analysis of drainage networks.
 767 *Computers & Geosciences*, 37(8), 1162-1173. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.03.003>
- 768 Jasiewicz, J. y Stepinski, T. F. (2013). Geomorphons — a pattern recognition approach to classification and
 769 mapping of landforms. *Geomorphology*, 182, 147-156. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005>
- 770 JAXA/METI y ASF DAAC. (2015). *ALOS PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_high_res. Includes
 771 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).
- 772 Larson, M., Shapiro, M. y Tweddle, S. (1991). Performing map calculations on GRASS data: r.mapcalc program tutorial. *US Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Laboratory*. https://grass.osgeo.org/uploads/grass/history_docs/mapcalc.pdf.
- 773 Le, T. D. N. (2019). Climate change adaptation in coastal cities of developing countries: characterizing types
 774 of vulnerability and adaptation options. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25,
 775 739-761.
- 776 Lenderking, H. L., Robinson, S. y Carlson, G. R. (2020). Climate change and food security in Caribbean small
 777 island developing states: challenges and strategies. *International Journal of Sustainable Development &
 778 World Ecology*, 28, 238-245.
- 779 Lindsay, J. B. (2016). The practice of DEM stream burning revisited: The Practice of DEM Stream Burning
 780 Revisited. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(5), 658-668. <https://doi.org/10.1002/esp.3888>
- 781 Lindsay, J. B. (2018). *WhiteboxTools user manual*. Available online: https://www.whiteboxgeo.com/manual/wbt_book/intro.html (accessed on abril, 2023).
- 782 Lindsay, J. B., Francioni, A. y Cockburn, J. M. H. (2019). LiDAR DEM Smoothing and the Preservation of
 783 Drainage Features. *Remote Sensing*, 11(16), 1926. <https://doi.org/10.3390/rs11161926>
- 784 Lohmann, H. (2016). Comparing vulnerability and adaptive capacity to climate change in individuals of
 785 coastal Dominican Republic. *Ocean & Coastal Management*, 132, 111-119.
- 786 Mackay, E. A. y Spencer, A. J. (2017). The future of Caribbean tourism: competition and climate change
 787 implications. *Worldwide Hospitality and Tourism Themes*, 9, 44-59.
- 788 Marchesini, I., Salvati, P., Rossi, M., Donnini, M., Sterlacchini, S. y Guzzetti, F. (2021). Data-driven flood
 789 hazard zonation of Italy. *Journal of Environmental Management*, 294, 112986. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112986>
- 790 Martínez-Batlle, J.-R. (2019). *Drainage rearrangement as a driver of geomorphological evolution during the
 791 Upper Pleistocene in a small tropical basin*. <https://doi.org/10.31223/OSF.IO/PFZVQ>
- 792 Martínez-Batlle, J.-R. (2019). Drainage Rearrangement as a Driver of Geomorphological Evolution During
 793 the Upper Pleistocene in a Small Tropical Basin. *Journal of Geography and Geology*, 11(2), 1. <https://doi.org/10.5539/jgg.v11n2p1>

- 804 Martínez-Batlle, J.-R. y Izzo-Gioiosa, M. (2023). *Datos del estudio "Generación de red hidrográfica densa de*
 805 *República Dominicana a partir de modelo digital de elevaciones de resolución media"*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.8146391>
- 806 McCool, D. K., Brown, L. C., Foster, G. R., Mutchler, C. K. y Meyer, L. D. (1987). Revised Slope Steepness
 807 Factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*, 30(5), 1387-1396. <https://doi.org/10.13031/2013.30576>
- 808 Metz, M., Mitasova, H. y Harmon, R. S. (2011). Efficient extraction of drainage networks from massive,
 809 radar-based elevation models with least cost path search. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2),
 810 667-678. <https://doi.org/10.5194/hess-15-667-2011>
- 811 Mishra, A. K. y Coulibaly, P. (2009). Developments in hydrometric network design: A review. *Reviews of*
 812 *Geophysics*, 47(2), RG2001. <https://doi.org/10.1029/2007RG000243>
- 813 Mishra, A. K. y Coulibaly, P. (2010). Hydrologic network evaluation for Canadian watersheds. *Journal of*
 814 *Hydrology*, 380(3-4), 420-437. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.015>
- 815 Mollat, H., Wagner, B. M., Ceppek, P. y Weiss, W. (2004). *Mapa Geológico de la República Dominicana*
 816 1 : 250.000. *Texto Explicativo*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- 817 Moore, I. D., Grayson, R. B. y Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological,
 818 geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3-30. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- 819 NASA JPL. (2013). *NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 3 arc second [Data set]*. <https://doi.org/10.5067/MEaSUREs/SRTM/SRTMGL3.003>
- 820 NASA LP DAAC. (2000). *SRTM 1 Arc-Second Global*. <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- 821 National Aeronautics and Space Administration y United States Geological Survey. (2009). *ASTER GDEM*.
 822 <https://lpdaac.usgs.gov/>.
- 823 Ngula Niipele, J. y Chen, J. (2019). The usefulness of alos-palsar dem data for drainage extraction in
 824 semi-arid environments in The Iishana sub-basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 21, 57-67.
 825 <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.11.003>
- 826 O'Brien, J. (2023). *gdalUtilities: Wrappers for 'GDAL' Utilities Executables*. <https://CRAN.R-project.org/package=gdalUtilities>
- 827 OCHA. (2022). *Humanitarian Data Exchange (OCHA)*. Available online: <https://data.humdata.org/dataset/cod-ab-dom> (accessed on abril, 2023).
- 828 OEA y INDRHI. (1994). *Plan Nacional de Ordenamiento de los Recursos Hídricos (PNORHI)*. Instituto
 829 Nacional de Recursos Hídricos (INDRHI).
- 830 Oficina Nacional de Estadística (ONE). (2018). *División territorial de República Dominicana*. Available online:
 831 <https://www.one.gob.do/media/s5gd100n/divisi%C3%B3n-territorial-2020-t.pdf> (accessed on
 832 abril, 2023).
- 833 OpenStreetMap contributors. (2017). *Planet dump retrieved from https://planet.osm.org* . Available online:
 834 <https://www.openstreetmap.org> (accessed on abril, 2023).
- 835 Pebesma, E. (2018). Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *The R Journal*,
 836 10(1), 439-446. <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>
- 837 Pebesma, E. y Bivand, R. (2023). *Spatial Data Science: With applications in R* (p. 352). Chapman and
 838 Hall/CRC. <https://r-spatial.org/book>
- 839 Pedraza Gilsanz, J. de. (1996). *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*. Ed. Rueda.
- 840 Petrasova, A., Petras, V., Jeziorska, J., White, C. H. C., Reckling, W., Millar, G., Grokhowsky, N., Paulukonis,
 841 A., Montgomery, K., Coffer, M., Harmon, B., Cepero, K., Starek, M., Hardin, N. L. E., Paris, P., Russ, E.,
 842 Weaver, K., Fogleman, B., Leo, M. d. y Stopkova, E. (2011). *GeoInformation Science and Environmental*
 843 *Modeling*. <http://fatra.cnr.ncsu.edu/~hmitaso/>
- 844 QGIS Development Team. (2021). *QGIS Geographic Information System, Version 3.26.2*. QGIS Association.
 845 <https://www.qgis.org>
- 846 Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P. y Planchon, O. (1991). The prediction of hillslope flow paths for
 847 distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5(1), 59-79.
 848 <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050106>
- 849 R Core Team. (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical
 850 Computing. <https://www.R-project.org/>
- 851 Rodríguez, H. y Febrillet, J. F. (2006). Potencial idrogeológico de la República Dominicana. *Boletín Geológico*
 852 *y Minero*, 117.
- 853 Roson, R. (2013). A Modeling Framework to Assess the Economic Impact of Climate Change in the Caribbean.
 854 *Cepal Review*, 111, 23-36.
- 855 Saunders, W. (2000). Preparation of DEMs for use in environmental modeling analysis. *Hydrologic and*
 856 *Hydraulic Modeling Support. Redlands, CA: ESRI*, 2951.
- 857

- 863 Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2004). *Atlas de los Recursos Naturales de la*
 864 *República Dominicana*. Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- 865 SERCITEC y INDRHI. (2002). *Control de Inundaciones de la cuenca del Río Yaque del Norte*. Instituto
 866 Nacional de Recursos Hídricos (INDRHI).
- 867 Shapiro, M. y Westervelt, J. (1994). *r.mapcalc: An algebra for GIS and image processing*. US Army Corps of
 868 Engineers, Construction Engineering Research Laboratories.
- 869 Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American*
 870 *Geophysical Union*, 38(6), 913-920. <https://doi.org/10.1029/tr038i006p00913>
- 871 Van Rossum, G. y Drake, F. L. (2009). *Python 3 Reference Manual*. CreateSpace.
- 872 Weltz, M. A., Renard, K. G. y Simanton, J. R. (1988). Revised Universal Soil Loss Equation for Western
 873 Rangelands¹. *Estrategias de Clasificación Y Manejo de Vegetación Silvestre Para la Producción de*
 874 *Alimentos en Zonas Áridas*, 150, 104.
- 875 Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L. D., François, R., Grolemund, G., Hayes, A.,
 876 Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T. L., Miller, E., Bache, S. M., Müller, K., Ooms, J., Robinson,
 877 D., Seidel, D. P., Spinu, V., ... Yutani, H. (2019). Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source*
 878 *Software*, 4(43), 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- 879 Xie, Y. (2014). knitr: A Comprehensive Tool for Reproducible Research in R. En V. Stodden, F. Leisch, y R.
 880 D. Peng (Eds.), *Implementing Reproducible Computational Research*. Chapman; Hall/CRC.
- 881 Xie, Y. (2015). *Dynamic Documents with R and knitr* (2nd ed.). Chapman; Hall/CRC. <https://yihui.org/knitr/>
- 882 Xie, Y. (2023). *knitr: A General-Purpose Package for Dynamic Report Generation in R*. <https://yihui.org/g/knitr/>
- 883 Zhu, H. (2021). *kableExtra: Construct Complex Table with 'kable' and Pipe Syntax*. <https://CRAN.R-project.org/package=kableExtra>