

---

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

---

PREPUBLICACIÓN - PREPRINT

**José-Ramón Martínez-Batlle<sup>ID</sup>**

Facultad de Ciencias

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

**Michela Izzo Gioiosa<sup>ID</sup>**

Directora Ejecutiva

Guakia Ambiente

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

14 de julio de 2023

## Resumen

El resumen se colocará aquí.

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

## 1. Introducción

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

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

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

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

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

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

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

Nuestro trabajo tiene potencial para suprir las demandas de información sobre hidrografía de resolución fina, que es un aspecto crucial en muchos estudios de modelación, análisis de riesgos, morfometría de cuencas, entre otros. De manera particular, la hidrografía densa generada por nosotros es idónea para mejorar la red estaciones hidrométricas del país, la cual es limitada y afronta diversos desafíos como muchas redes de este tipo a nivel global. Asimismo, nuestro trabajo también podría contribuir información para acciones de conservación, planificación y gestión de los recursos hídricos a nivel nacional (Burn, 1997; INDRHI, 2019; Mishra y Coulibaly, 2009; Mishra y Coulibaly, 2010). Además, los datos generados pueden ser de gran valor para un amplio rango de aplicaciones, incluyendo la planificación del uso del suelo, el diseño de infraestructuras, la gestión de cuencas hidrográficas y la modelización de escorrentía y erosión. A medida que nos enfrentamos a los impactos del cambio climático y a la creciente escasez de agua, esperamos que este trabajo sirva como una contribución significativa para la gestión de los recursos hídricos en la República Dominicana (Izzo et al., 2010; Le, 2019; Lenderking et al., 2020; Lohmann, 2016; Mackay y Spencer, 2017; Roson, 2013).

## Notas sobre terminología

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

Dado que las distintas acepciones y discrepancias en la terminología superan el alcance del presente trabajo, fijaremos los términos que utilizaremos de manera convencional. En este estudio, empleamos los términos *talweg* y canal de forma indistinta para referirnos a la unidad topográficamente deprimida por la que fluye, o podría fluir, la corriente. En geomorfología, utilizamos la voz germánica *talweg* para referirnos a la línea imaginaria que traza la parte más baja de un valle (Foucault y Raoult, 1985). Es importante remarcar que esta definición no siempre se refiere a un curso fluvial permanente, pues la circulación del agua está influenciada por múltiples factores. A esta unidad, en sus distintas variantes hidrodinámicas y de tamaño, también se le conoce con múltiples nombres en República Dominicana, como son río, arroyo o cañada, denominaciones que también incorporamos en la redacción.

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

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Obtención y Preprocesamiento del DEM

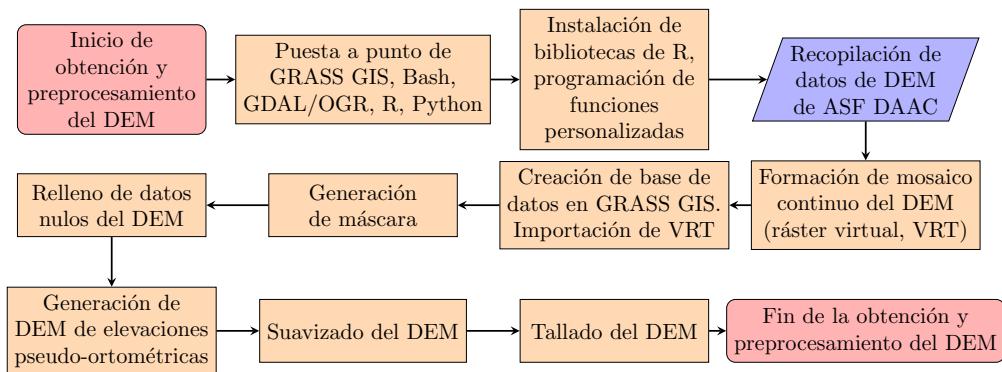


Figura 1: Resumen gráfico de la obtención y preprocesamiento del DEM

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

Asimismo, para facilitar nuestra labor, utilizamos una serie de bibliotecas de R, además de funciones personalizadas escritas por nosotros para agilizar y optimizar las tareas de limpieza y representación de datos y mapas (Hijmans, 2023; O'Brien, 2023; Pebesma, 2018; Pebesma y Bivand, 2023; Wickham et al., 2019; Xie, 2014, 2015, 2023; Zhu, 2021). El código reproducible usado en el estudio se puede consultar en la sección Información suplementaria, así como los repositorios creados al efecto, donde incluimos el código escrito y las direcciones para acceder a los datos fuentes, entre otras utilidades.

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

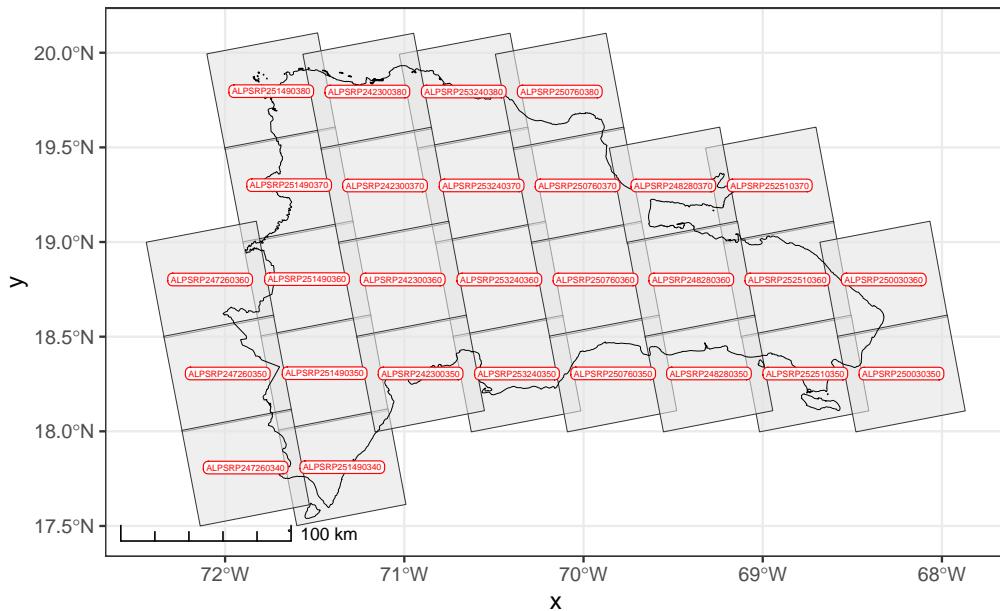


Figura 2: Mapa índice de las 28 escenas usadas en la formación del DEM de República Dominicana, superponiendo las huellas (polígono de área con datos) de las escenas ALOS PALSAR RTC sobre el límite costero e internacional del país

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

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

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

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

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

## 2.2. Procesamiento de hidrología computacional

## 3. Resultados

## 4. Discusión

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

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

- Evaluación de precisión de la elevación.
- Mejora de la hidrografía de las áreas llanas.
- Análisis hortonianos exhaustivos.
- Segregación de la red teórica y la red circulante.
- Con respecto a la precisión posicional de la red, estimamos que es alta en sistemas montañosos no kársticos, y moderada en sistemas kársticos. En los sistemas kársticos en particular, nuestro mapa exhibe un grado ligeramente mayor de incertidumbre debido a la ausencia de un catálogo detallado y preciso de depresiones, como las dolinas, que en última instancia definen la topología y jerarquización de la red en estos relieves. Para subsanar esta carencia, generamos nuestro propio inventario de depresiones a partir del modelo de elevaciones seleccionado, aunque lo aplicamos con prudencia a la hora de determinar la ubicación de los sumideros reales donde el flujo se infiltra al karst. Es relevante mencionar que nuestra red podría presentar una precisión reducida en áreas urbanas y llanas, así como en terrenos con canales de riego. Sin embargo, este factor no impacta la relevancia de nuestro estudio, dado que se enfoca primordialmente en otros tipos de áreas.
- En relación a las cuencas y redes de drenaje transfronterizas, es importante destacar que sólo se caracterizaron utilizando información la porción correspondiente al territorio dominicano. Como resultado, el orden de red máximo obtenido para estas redes podría no reflejar su orden real. Estas cuencas abarcan las de los ríos Artibonito, Pedernales y Masacre, además de varias cuencas menores dispersas a lo largo de la frontera. No obstante, una evaluación visual preliminar indica que la mencionada limitación no interfiere con el propósito de nuestro estudio. Además, en futuros trabajos, abordaremos estas cuencas de manera integral para proporcionar una visión más completa de su morfometría.
- Para asegurar que los datos de elevación eran adecuados y precisos en términos de elevación, se debería validar el DEM con datos de puntos de verificación tomados con GNSS.

## Financiamiento

Esta investigación recibió financiamiento del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), y fue apoyado por la ONG Guakía Ambiente y la Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD).

## **Declaración de conflicto de intereses**

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

## **5. Disponibilidad de datos, scripts y código**

Los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles abiertamente en Zenodo en 10.5281/[zenodo.8146391](#) (**RELENDAR?**). Los scripts utilizados para la curación de datos, análisis y visualización están disponibles en Zenodo en (**RELENDAR?**).

## Información suplementaria

### Suplemento para la sección Materiales y Métodos

#### 5.0.1. Obtención y Preprocesamiento del DEM

Los siguientes bloques de código cargan los paquetes de uso común a lo largo de este cuaderno, así como funciones creadas por nosotros para eficientizar las tareas de limpieza y representación de datos y mapas. Igualmente, aprovechamos este bloque de código para declarar la ruta del directorio donde se alojan los 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)
source('R/funciones.R')
dem_proc_dir <- 'alos-palsar-dem-rd/dem/'
```

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

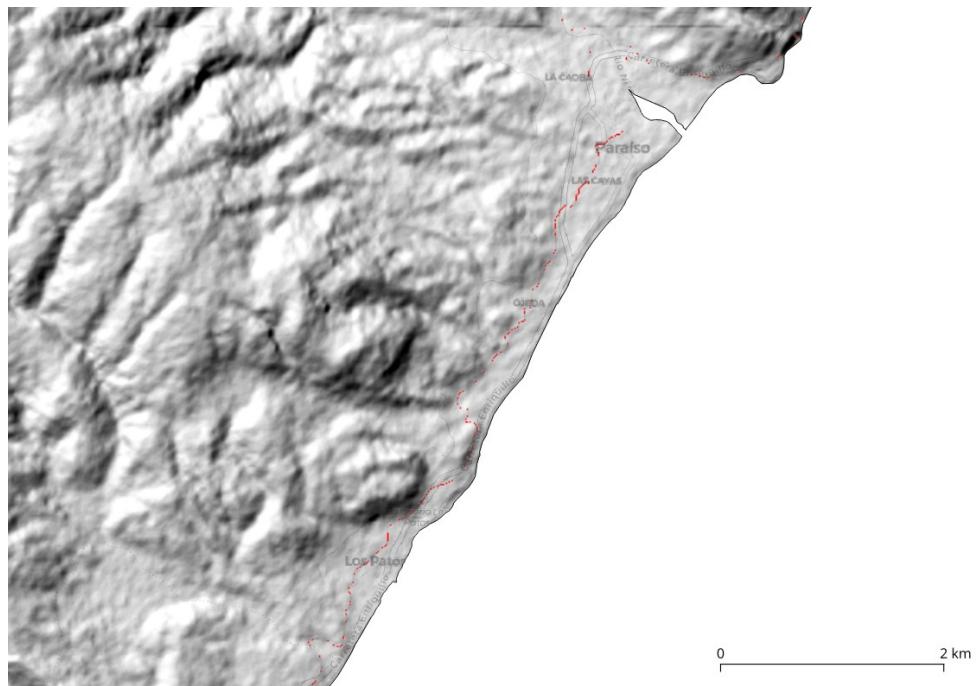


Figura S1: DEM sin procesar, representado como relieve sombreado. Nótese los píxeles sin datos, destacados en color rojo (Los Patos-Ojeda-Paraíso, provincia Barahona, sudoeste de República Dominicana)

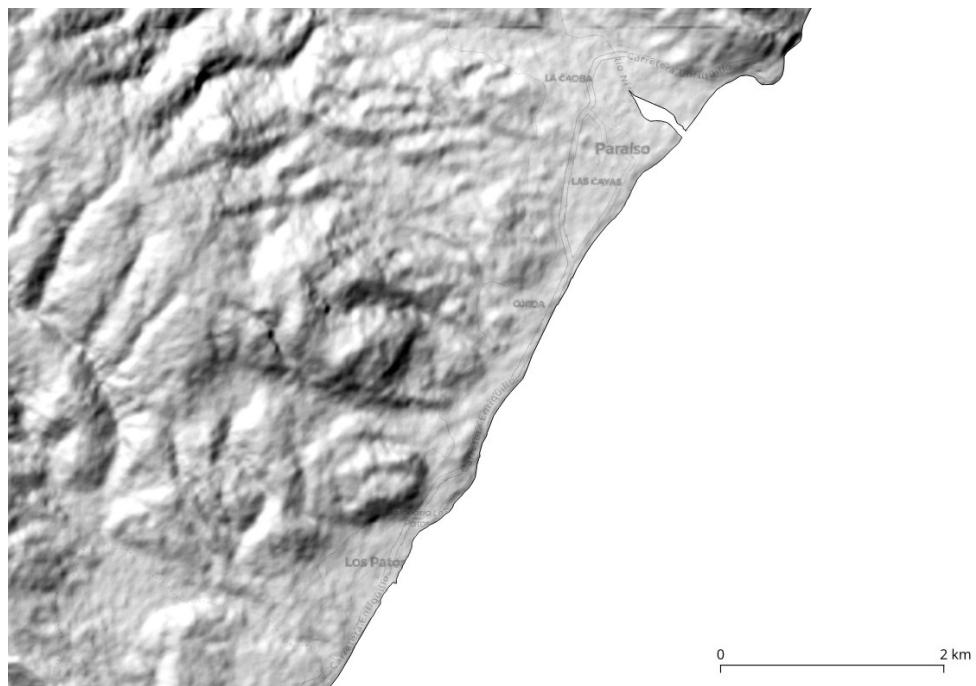


Figura S2: DEM sin procesar, representado como relieve sombreado. Los píxeles sin datos fueron eliminados (Los Patos-Ojeda-Paraíso, provincia Barahona, sudoeste de República Dominicana)

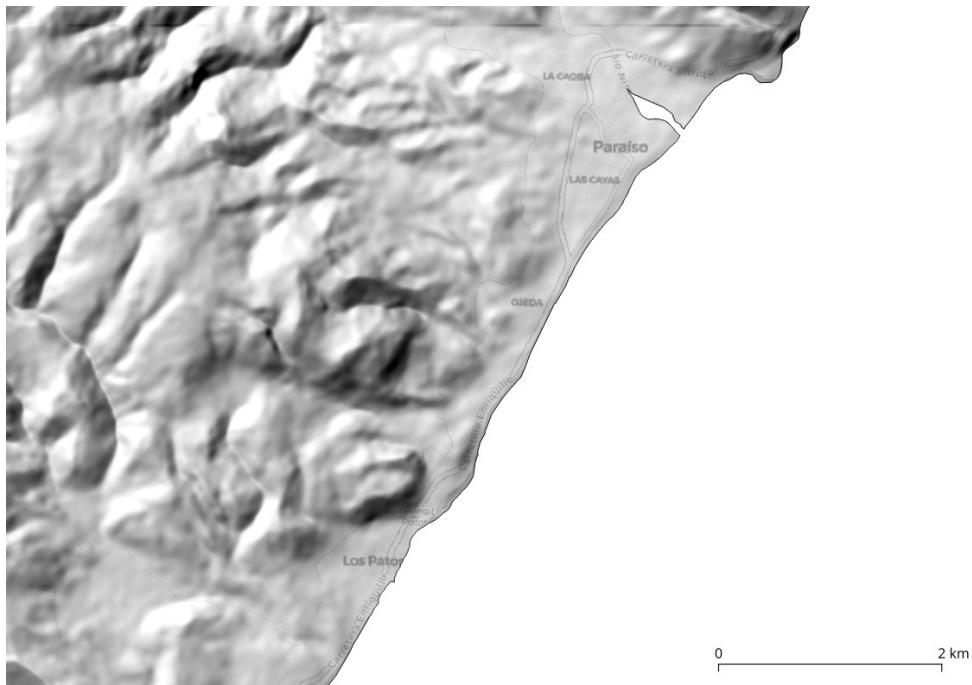


Figura S3: DEM suavizado, representado como relieve sombreado. Nótese la conservación de las morfologías principales y la eliminación del ruido sobre éstas (Los Patos-Ojeda-Paraíso, provincia Barahona, sudoeste de República Dominicana)

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

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

A continuación, usamos el ráster de altura de geoide de La Española a 1 minuto de resolución (EGM2008) para obtener alturas pseudo-ortométricas, por medio de una suma algebraica simple de este ráster y el DEM suavizado en GRASS GIS con la herramienta `r.mapcalc`. Sin embargo, previamente fue necesario aumentar la resolución del ráster de altura del geoide antes de realizar la suma. Para esto, usamos `r.resamp.rst` (evaluamos una segunda alternativa con el complemento `r.resamp.interp` y, aunque realizó el trabajo 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
```

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

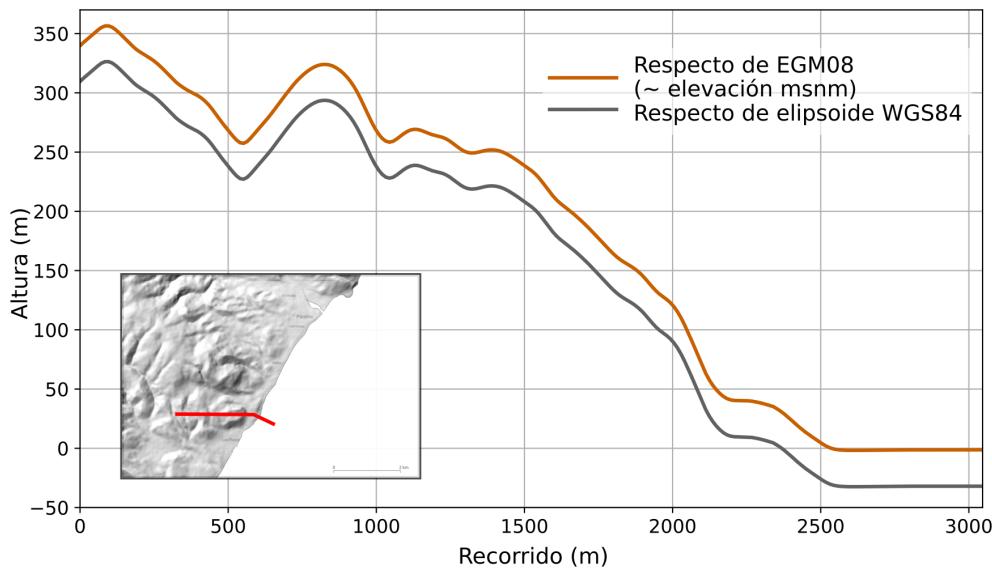


Figura S4: Alturas respecto de geoide EGM08 (~ortométrica) y sobre elipsoide WGS84, de un transecto descendente desde Bahoruco Oriental al Mar Caribe (Los Patos-Ojeda-Paraíso, provincia Barahona, sudoeste de República Dominicana)

aproximadamente 404 m, con desviación estándar de 487 m y coeficiente de variación de 121 %. Remarcamos que, aunque ASF advierte de no usar este modelo para fines de elevación, el valor máximo se ajusta bastante a la elevación máxima conocida en República Dominicana, que es el pico Duarte (*Instituto Geográfico Nacional - - Medición por Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) de los Tres Picos Más Altos De Las Antillas*, s. f.).

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

Nuestra de red cursos largos contiene varios ríos que atraviesan amplios valles y karsts, por lo son comunes los tramos que cruzan zonas complicadas para la conducción del flujo donde probablemente el error posicional de las líneas es mayor. Cabe también señalar que, para asegurar la continuidad topológica de la red, dimos un tratamiento especial a los ríos que llenan embalses, los cuales representamos por medio trazados históricos 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)
```

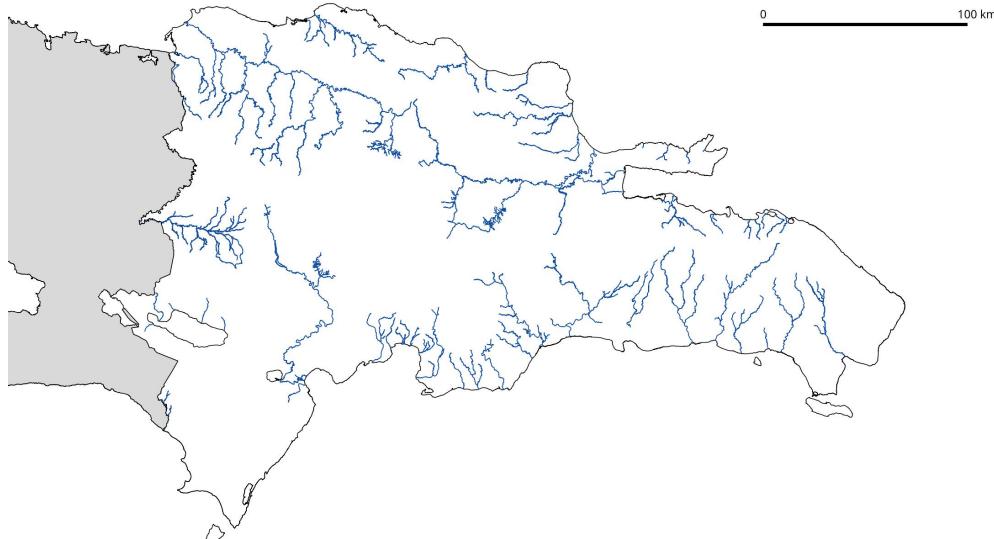


Figura S5: Mapa de la red de cursos largos creada para el estudio a partir de varias fuentes (más detalles, en el texto).

```
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
```

Finalmente, importamos nuestra red de cursos largos a la base de datos de GRASS GIS y generamos estadísticas básicas. Se trata de una red compuesta por **1047 segmentos** que suman un total de **4895.88 kilómetros** de longitud. Cabe señalar que esta red no tiene valor hidrográfico, pues, como indicamos, ignora los lagos para garantizar la integridad topológica. Desaconsejamos su uso para otro fin que no sea el grabado de un DEM.

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

Comenzamos con *r.carve*, una herramienta diseñada para grabar el DEM sin modificarlo sustancialmente, permitiendo al mismo tiempo configurar la profundidad y la anchura del grabado (GRASS Development Team, 2022b; Petrasova et al., 2011). Por defecto, la anchura de lecho es equivalente a la resolución del DEM. La profundidad puede definirse por el usuario, para lo cual nosotros establecimos 100 metros. Pudimos tallar la red de cursos largos sobre el DEM con esta herramienta, generando un resultado que consideramos bueno, aunque el proceso ocupó más de 1 hora de tiempo de cómputo. Esta alternativa es recomendada si resultase imprescindible conservar las propiedades topográficas en el DEM, pero debe tenerse en cuenta que su rendimiento es muy bajo. En los casos en los que se use un DEM de resolución baja, se recomienda usar esta alternativa. Sin embargo, a nosotros no nos resultó apropiado este método por razones de rendimiento,

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

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

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

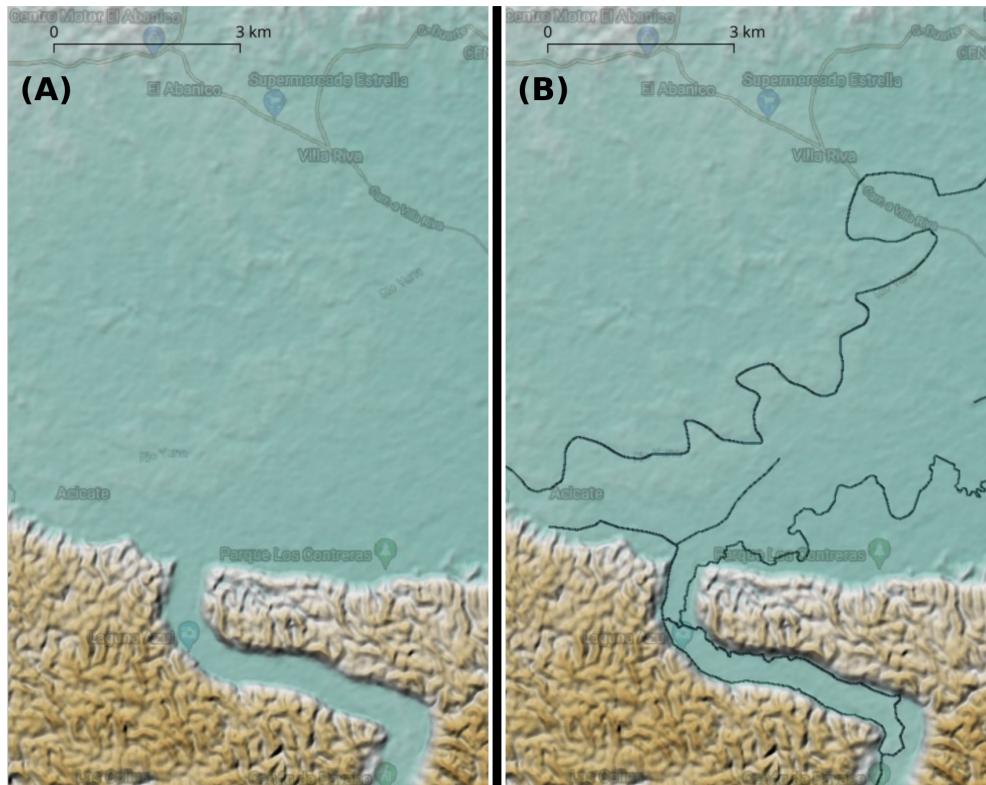


Figura S6: DEM sin aplicación de hidrografía (A), y con aplicación de hidrografía seleccionada (B). El DEM se representa como relieve sombreado y la aplicación se denota como un grabado oscurecido (cañón del río Payabo, Los Haitises, y río Yuna (proximidades de Arenoso, nordeste de República Dominicana)

```
## real 1m0.248s

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

# Talar 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
```

A continuación, aplicamos algoritmos de grabado de depresiones . . . . .

### 5.0.2. Procesamiento de hidrología computacional

El próximo paso consistió en

## Informe de la sesión de R

```
sessionInfo()

## R version 4.3.0 (2023-04-21)
## Platform: x86_64-pc-linux-gnu (64-bit)
## Running under: Ubuntu 20.04.3 LTS
##
## Matrix products: default
## BLAS:    /usr/lib/x86_64-linux-gnu/blas/libblas.so.3.9.0
## LAPACK:  /usr/lib/x86_64-linux-gnu/lapack/liblapack.so.3.9.0
##
## locale:
## [1] LC_CTYPE=es_DO.UTF-8      LC_NUMERIC=C
## [3] LC_TIME=es_DO.UTF-8      LC_COLLATE=es_DO.UTF-8
## [5] LC_MONETARY=es_DO.UTF-8   LC_MESSAGES=es_DO.UTF-8
## [7] LC_PAPER=es_DO.UTF-8      LC_NAME=C
## [9] LC_ADDRESS=C              LC_TELEPHONE=C
## [11] LC_MEASUREMENT=es_DO.UTF-8 LC_IDENTIFICATION=C
##
## time zone: America/Santo_Domingo
## tzcode source: system (glibc)
##
## attached base packages:
## [1] stats      graphics   grDevices utils      datasets  methods   base
##
## other attached packages:
## [1] gdalUtilities_1.2.4 lubridate_1.9.2     forcats_1.0.0
## [4] stringr_1.5.0       dplyr_1.1.2      purrr_1.0.1
## [7] readr_2.1.4         tidyverse_2.0.0   tibble_3.2.1
## [10] ggplot2_3.4.2      tidyverse_2.0.0   kableExtra_1.3.4
## [13] sf_1.0-12          raster_3.6-20    sp_1.6-0
##
## loaded via a namespace (and not attached):
## [1] gtable_0.3.3        xfun_0.39        lattice_0.20-45   tzdb_0.4.0
## [5] vctrs_0.6.2         tools_4.3.0       generics_0.1.3     parallel_4.3.0
## [9] proxy_0.4-27        fansi_1.0.4      pkgconfig_2.0.3    Matrix_1.4-0
## [13] KernSmooth_2.23-20  webshot_0.5.4    lifecycle_1.0.3    compiler_4.3.0
## [17] munsell_0.5.0       terra_1.7-29     codetools_0.2-18   htmltools_0.5.5
## [21] class_7.3-20        yaml_2.3.7       crayon_1.5.2      pillar_1.9.0
## [25] classInt_0.4-9     tidyselect_1.2.0  rvest_1.0.3       digest_0.6.31
## [29] stringi_1.7.12     fastmap_1.1.1    grid_4.3.0        colorspace_2.1-0
## [33] cli_3.6.1          magrittr_2.0.3   utf8_1.2.3       e1071_1.7-13
## [37] withr_2.5.0         scales_1.2.1     bit64_4.0.5      timechange_0.2.0
## [41] rmarkdown_2.21       httr_1.4.6       bit_4.0.5        reticulate_1.30
## [45] hms_1.1.3          png_0.1-8       evaluate_0.21    knitr_1.42
## [49] viridisLite_0.4.2   rticles_0.25     rlang_1.1.1      Rcpp_1.0.10
## [53] glue_1.6.2          DBI_1.1.3       xml2_1.3.4      vroom_1.6.3
## [57] svglite_2.1.1       rstudioapi_0.14  jsonlite_1.8.4   R6_2.5.1
## [61] systemfonts_1.0.4   units_0.8-2
```

## Referencias

- Anderson, R. S. y Anderson, S. P. (2010). *Geomorphology: the mechanics and chemistry of landscapes*. Cambridge University Press.
- ASF DAAC. (2014). *PALSAR\_Radiometric\_Terrain\_Corrected\_high\_res*. <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA>

- Aziz, K. M. A. y Rashwan, K. S. (2022). Comparison of different resolutions of six free online DEMs with GPS elevation data on a new 6th of October City, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(20), 1585. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10845-5>
- Burn, D. H. (1997). Hydrological information for sustainable development. *Hydrological Sciences Journal*, 42(4), 481-492. <https://doi.org/10.1080/02626669709492048>
- Charlton, R. (2010). *Fundamentals of fluvial geomorphology* (Repr). Routledge.
- CIDIAT y INDRHI. (1992). *Control de Inundaciones en la cuenca del Río Yaque del Sur*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI).
- Foucault, A. y Raoult, J. F. (1985). *Diccionario de Geología*. MASSON. <https://books.google.com.do/books?id=x5FDPQAACAAJ>
- GADM. (2022). *GADM*. Available online: <https://gadm.org/index.html> (accessed on abril, 2023).
- García, J. H. G. y Ojeda, A. O. (2011). Clasificación geomorfológica de cursos fluviales a partir de sistemas de información geográfica (SIG). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 56, 373-396.
- GDAL/OGR contributors. (2022). *GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library*. Open Source Geospatial Foundation. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5884351>
- Google; Airbus, CNES; Airbus, Landsat; Copernicus; Maxar Technologies; U.S. Geological Survey. (2023). *Google Maps*. <https://www.google.com/maps/>
- GRASS Development Team. (2022a). *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 8.0.2*. Open Source Geospatial Foundation. <https://grass.osgeo.org>
- GRASS Development Team. (2022b). *r.carve*. Generates stream channels. Takes vector stream data, transforms it to raster and subtracts depth from the output DEM. *GRASS GIS manual*. <https://grass.osgeo.org/grass82/manuals/r.carve.html>
- GRASS Development Team. (2022c). *r.mapcalc - Raster map calculator*. *GRASS GIS manual*. <https://grass.osgeo.org/grass82/manuals/r.mapcalc.html>
- GRASS Development Team. (2023). *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 8.2.0*. Open Source Geospatial Foundation. <https://grass.osgeo.org>
- Gutiérrez Elorza, M. (2009). *Geomorfología* (Última reimpr). Pearson-Prentice Hall.
- Halcrow-COR Ing. S.A. (2002). *Estudio de Vulnerabilidad de las Grandes Presas*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI).
- Hijmans, R. J. (2023). *raster: Geographic Data Analysis and Modeling*. <https://CRAN.R-project.org/package=raster>
- INDRHI. (1996). *Estadísticas del Agua en la República Dominicana*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI).
- INDRHI. (2012). *Plan Hidrológico Nacional, República Dominicana*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI).
- INDRHI. (2019). *Inventario de Estaciones Hidrometeorológicas. Informe Final*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.
- INDRHI y AQUATER. (2000). *Estudio Hidrogeológico Nacional de la República Dominicana, Fase I. Memoria de Proyecto, 7 volúmenes*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI).
- INDRHI y EPTISA. (2000). *Estudio Hidrogeológico Nacional de la República Dominicana, Fase II*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI).
- Instituto Cartográfico Militar (ICM). (1989). *Serie E733 de mapas topográficos escala 1:50,000*. Instituto Cartográfico Militar.
- Instituto Geográfico Nacional - - Medición por Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) de los Tres Picos Más Altos De Las Antillas*. (s. f.). [https://www.ign.gob.do/index.php/noticias/item/448-medicion-por-sistema-global-de-navegacion-por-satelite-gnss-de-los-tres-picoss-mas-altos-de-las-](https://www.ign.gob.do/index.php/noticias/item/448-medicion-por-sistema-global-de-navegacion-por-satelite-gnss-de-los-tres-picos-mas-altos-de-las-)
- Izzo, M., Rosskopf, C. M., Aucelli, P. P. C., Maratea, A., Méndez, R. E., Pérez, C. y Segura, H. (2010). A New Climatic Map of the Dominican Republic Based on the Thornthwaite Classification. *Physical Geography*, 31, 455-472.
- Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A. y Guevara, E. (2008). Hole-filled SRTM for the globe Version 4. available from the CGIAR-CSIR SRTM 90m Database ([http://srtm.cgiar.org](http://srtm.csi.cgiar.org)), 15(25-54), 5.
- JAXA/METI y ASF DAAC. (2015). *ALOS PALSAR\_Radiometric\_Terrain\_Corrected\_high\_res*. Includes material de JAXA/METI 2010. Available online. Accessed through ASF DAAC <https://ASF.alaska.edu/>. DOI: <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA> (accessed on abril, 2023).
- 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](https://grass.osgeo.org/uploads/grass/history_docs/mapcalc.pdf).

- Le, T. D. N. (2019). Climate change adaptation in coastal cities of developing countries: characterizing types of vulnerability and adaptation options. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25, 739-761.
- Lenderking, H. L., Robinson, S. y Carlson, G. R. (2020). Climate change and food security in Caribbean small island developing states: challenges and strategies. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 28, 238-245.
- Lindsay, J. B. (2016). The practice of DEM stream burning revisited: The Practice of DEM Stream Burning Revisited. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(5), 658-668. <https://doi.org/10.1002/esp.3888>
- Lindsay, J. B. (2018). *WhiteboxTools user manual*. Available online: [https://www.whiteboxgeo.com/manual/wbt\\_book/intro.html](https://www.whiteboxgeo.com/manual/wbt_book/intro.html) (accessed on abril, 2023).
- Lindsay, J. B., Francioni, A. y Cockburn, J. M. H. (2019). LiDAR DEM Smoothing and the Preservation of Drainage Features. *Remote Sensing*, 11(16), 1926. <https://doi.org/10.3390/rs11161926>
- Lohmann, H. (2016). Comparing vulnerability and adaptive capacity to climate change in individuals of coastal Dominican Republic. *Ocean & Coastal Management*, 132, 111-119.
- Mackay, E. A. y Spencer, A. J. (2017). The future of Caribbean tourism: competition and climate change implications. *Worldwide Hospitality and Tourism Themes*, 9, 44-59.
- Mishra, A. K. y Coulibaly, P. (2009). Developments in hydrometric network design: A review. *Reviews of Geophysics*, 47(2), RG2001. <https://doi.org/10.1029/2007RG000243>
- Mishra, A. K. y Coulibaly, P. (2010). Hydrologic network evaluation for Canadian watersheds. *Journal of Hydrology*, 380(3-4), 420-437. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.015>
- NASA JPL. (2013). *NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 3 arc second [Data set]*. <https://doi.org/10.5067/MEaSUREs/SRTM/SRTMGL3.003>
- NASA LP DAAC. (2000). *SRTM 1 Arc-Second Global*. <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- National Aeronautics and Space Administration y United States Geological Survey. (2009). *ASTER GDEM*. <https://lpdaac.usgs.gov/>.
- O'Brien, J. (2023). *gdalUtilities: Wrappers for 'GDAL' Utilities Executables*. <https://CRAN.R-project.org/package=gdalUtilities>
- OCHA. (2022). *Humanitarian Data Exchange (OCHA)*. Available online: <https://data.humdata.org/dataset/cod-ab-dom> (accessed on abril, 2023).
- OEA y INDRHI. (1994). *Plan Nacional de Ordenamiento de los Recursos Hídricos (PNORHI)*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI).
- Oficina Nacional de Estadística (ONE). (2018). *División territorial de República Dominicana*. Available online: <https://www.one.gob.do/media/s5gd100n/divisi%C3%B3n-territorial-2020-t.pdf> (accessed on abril, 2023).
- OpenStreetMap contributors. (2017). *Planet dump retrieved from https://planet.osm.org* . Available online: <https://www.openstreetmap.org> (accessed on abril, 2023).
- Pebesma, E. (2018). Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *The R Journal*, 10(1), 439-446. <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>
- Pebesma, E. y Bivand, R. (2023). *Spatial Data Science: With applications in R* (p. 352). Chapman and Hall/CRC. <https://r-spatial.org/book/>
- Pedraza Gilsanz, J. de. (1996). *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*. Ed. Rueda.
- Petrasova, A., Petras, V., Jeziorska, J., White, C. H. C., Reckling, W., Millar, G., Grokhowsky, N., Paulukonis, A., Montgomery, K., Coffer, M., Harmon, B., Cepero, K., Starek, M., Hardin, N. L. E., Paris, P., Russ, E., Weaver, K., Fogleman, B., Leo, M. di y Stopkova, E. (2011). *GeoInformation Science and Environmental Modeling*. <http://fatra.cnr.ncsu.edu/~hmitaso/>
- QGIS Development Team. (2021). *QGIS Geographic Information System, Version 3.26.2*. QGIS Association. <https://www.qgis.org>
- R Core Team. (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Rodríguez, H. y Febrillet, J. F. (2006). Potencial idrogeológico de la República Dominicana. *Boletín Geológico y Minero*, 117.
- Roson, R. (2013). A Modeling Framework to Assess the Economic Impact of Climate Change in the Caribbean. *Cepal Review*, 111, 23-36.
- Saunders, W. (2000). Preparation of DEMs for use in environmental modeling analysis. *Hydrologic and Hydraulic Modeling Support*. Redlands, CA: ESRI, 2951.
- Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2004). *Atlas de los Recursos Naturales de la República Dominicana*. Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SERCITEC y INDRHI. (2002). *Control de Inundaciones de la cuenca del Río Yaque del Norte*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI).

- Shapiro, M. y Westervelt, J. (1994). *r.mapcalc: An algebra for GIS and image processing*. US Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Laboratories.
- Van Rossum, G. y Drake, F. L. (2009). *Python 3 Reference Manual*. CreateSpace.
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L. D., François, R., Golemud, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T. L., Miller, E., Bache, S. M., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D. P., Spinu, V., ... Yutani, H. (2019). Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Xie, Y. (2014). knitr: A Comprehensive Tool for Reproducible Research in R. En V. Stodden, F. Leisch, y R. D. Peng (Eds.), *Implementing Reproducible Computational Research*. Chapman; Hall/CRC.
- Xie, Y. (2015). *Dynamic Documents with R and knitr* (2nd ed.). Chapman; Hall/CRC. <https://yihui.org/knitr/>
- Xie, Y. (2023). *knitr: A General-Purpose Package for Dynamic Report Generation in R*. <https://yihui.org/knitr/>
- Zhu, H. (2021). *kableExtra: Construct Complex Table with 'kable' and Pipe Syntax*. <https://CRAN.R-project.org/package=kableExtra>