

Delimitación de zonas potencialmente inundables en Cuba mediante integración de índices hidromorfométricos MCA-TWI derivados del modelo FABDEM

MSc. Jorge Olivera Acosta*, MSc. Sergio Luis Lorenzo Sánchez, Lic. Claudia Cruz Lorenzo,
Ing. Eric Avila Rojas, Lic. Leyani Izquierdo Barrera

Instituto de Geofísica y Astronomía (IGA), Citma. Calle 212 No. 2906 e/ 29 y 31, Reparto La Coronela, Municipio La Lisa, La Habana, Cuba.

*Autor para correspondencia: yoyiga2010@gmail.com

Resumen

Introducción: Las inundaciones son el peligro natural más recurrente globalmente. El objetivo de este trabajo fue delimitar zonas potencialmente inundables en Cuba mediante la integración de índices hidromorfométricos derivados del Modelo Digital del Terreno, considerando que el ~70% del territorio cubano presenta relieve llano con concentración estacional de precipitaciones. **Materiales y Métodos:** Se empleó la cuenca fluvial como unidad de análisis espacial y se generalizaron los resultados en un mosaico ráster nacional. Se empleó el Modelo Digital del Terreno (MDT) FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus DEM), resolución 30 m y la red de drenaje vectorial 1:250 000, procesados en el Sistema de Información Geográfica Sistema Automatizado de Análisis Geocientífico (SAGA-GIS) v.9.12.2. La metodología comprendió: (I) corrección hidrológica del MDT mediante river burning y fill sinks (algoritmo Planchon-Darboux); (II) cálculo del Flujo Acumulado Modificado (MCA) y del Índice Topográfico de Humedad (TWI) con el algoritmo SAGA Wetness Index; (III) tipificación estadística de variables mediante Z-scores; (IV) integración lineal estandarizada para generar un Índice de Contraste. **Resultados:** El MCA normalizado identificó zonas de máxima concentración hídrica (exutorios, confluencias y depresiones), mientras que el TWI discriminó áreas de saturación edáfica. La combinación MCA-TWI superó las limitaciones individuales de cada indicador. **Conclusiones:** Se delimitaron zonas potencialmente inundables para Cuba mediante indicadores hidromorfométricos (MCA-TWI) derivados del relieve. El producto cartográfico resultante identifica áreas donde la acumulación de flujo ante eventos extremos favorece las inundaciones. La metodología es reproducible, escalable y de bajo costo computacional para contextos insulares tropicales con datos hidrometeorológicos limitados. El insumo obtenido constituye un referente para el ordenamiento territorial y la gestión del riesgo de desastres.

Palabras claves: *inundaciones, indicadores hidromorfométricos, MCA, TWI, SAGA-GIS, escenarios geomorfológicos, peligro potencial, Cuba.*

Delimiting potentially floodable zones in Cuba by integrating MCA-TWI hydromorphometric indices from the FABDEM model

Abstract

Introduction: Floods are the most recurrent natural hazard globally. The objective of this study was to delimit potentially flood-prone zones in Cuba through the integration of hydro-morphometric indices derived from the Digital Elevation Model, considering that approximately 70% of Cuban territory exhibits flat relief with seasonal precipitation concentration. **Materials and Methods:** The fluvial basin was employed as the spatial analysis unit, and results were generalized into a national raster mosaic. The Forest and Buildings removed Copernicus DEM (FABDEM), with 30 m resolution, and the 1:250,000 vector drainage network were processed in the System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA-GIS) v.9.12.2. The methodology comprised: (I) hydrological correction of the DEM through river burning and sink filling (Planchon-Darboux algorithm); (II) calculation of the Modified Catchment Area (MCA) and the Topographic Wetness

Index (TWI) using the SAGA Wetness Index algorithm; (III) statistical standardization of variables via Z-scores; (IV) standardized linear integration to generate a Contrast Index. **Results:** The normalized MCA identified zones of maximum hydric concentration (outlets, confluences, and depressions), while the TWI discriminated areas of edaphic saturation. The MCA-TWI combination overcame the individual limitations of each indicator. **Conclusions:** Potentially flood-prone zones were delimited for Cuba using hydro-morphometric indicators (MCA-TWI) derived from terrain. The resulting cartographic product identifies areas where flow accumulation under extreme events favors flooding. The methodology is reproducible, scalable, and computationally low-cost for tropical insular contexts with limited hydro-meteorological data. The output constitutes a reference for territorial planning and disaster risk management.

Keywords: floods, hydromorphometric indicators, MCA, TWI, SAGA-GIS, geomorphological scenarios, potential hazard, Cuba.

1. Introducción

1.1. Contexto y justificación

El área de estudio (figura 1) comprende el territorio emergido de la República de Cuba, incluyendo la Isla de la Juventud y los cayos adyacentes. El archipiélago cubano está situado en la región insular del Caribe Noroccidental, entre los 19°49' y 23°17' de latitud Norte y los 74°08' y 84°57' de longitud Oeste, constituye la mayor extensión territorial de las Antillas Mayores con una superficie emergida aproximada de 108,900 km² (CITMA, 2023).

Situación problemática

Las inundaciones constituyen el peligro más recurrente y costoso a escala global, con un incremento significativo en su frecuencia e intensidad asociado al cambio climático (IPCC, 2022). En las pequeñas islas en desarrollo del Caribe, la exposición a ciclones tropicales de mayor intensidad, combinada con el ascenso del nivel del mar,

proyecta un aumento drástico de la frecuencia de eventos de inundación costera y fluvial para las próximas décadas (IPCC, 2022). La modelación del peligro por inundación en estos contextos insulares tropicales enfrenta limitaciones críticas derivadas de la escasez de series hidrometeorológicas de alta resolución y la no estacionariedad estadística inducida por el cambio climático, que invalidan los análisis probabilísticos convencionales basados en series históricas cortas (Milly et al., 2008). En este escenario, los enfoques basados exclusivamente en atributos geomorfológicos del relieve que identifican la envolvente máxima de inundabilidad independientemente de eventos pluviométricos específicos, constituyen una alternativa reproducible y de bajo costo computacional para regiones con limitaciones de datos (Hawker et al., 2022; Meadows et al., 2024). No obstante, persisten vacíos significativos en la cartografía sistemática del peligro potencial por inundación fluvial



Figura 1. Esquema de ubicación.

a escala nacional en contextos insulares, particularmente en lo relativo a la integración de indicadores hidromorfométricos derivados de modelos digitales del terreno de alta resolución con corrección de edificaciones y vegetación. (Samela et al., 2022).

Cuba presenta un relieve predominantemente llano, con aproximadamente el 70% del territorio constituido por extensas llanuras de diversos tipos, resultado de procesos continuos de peniplanación y pediplanación (Lilienberg, 1973). Esta configuración morfológica genera condiciones topográficas de baja pendiente que dificultan el drenaje natural y favorecen la acumulación de agua superficial durante eventos de precipitación extrema. El clima de Cuba es predominantemente cálido tropical con estación lluviosa en verano, donde aproximadamente el 80% de las lluvias anuales se concentran entre mayo y octubre, asociadas a ciclones tropicales y ondas tropicales (Caribbean Regional Climate Centre, s.f.; INSMET, 2023). Las investigaciones geomorfológicas documentan que los procesos neotectónicos del Pleistoceno medio-superior generaron la emergencia del territorio y el inicio de una regresión marina, configurando llanuras de inundación extensas limitadas frecuentemente por sistemas montañosos que actúan como áreas de captación de lluvia (Iturralde-Vinent, 1978, 1998, 2003; Díaz Díaz y Lilienberg, 1989). Durante eventos de precipitación extrema, las sierras circundantes condicionan una respuesta rápida de escorrentía hacia las zonas bajas, donde los depósitos cuaternarios permeables no logran absorber el caudal torrencial proveniente de la parte alta de la cuenca, generando un aumento en el caudal y velocidad de la corriente que supera la capacidad de filtración al subsuelo (Pérez-de los Reyes et al., 2006). En este contexto, el relieve topográfico constituye un factor determinante en la intensidad de la inundación, donde prácticamente toda la unidad geomorfológica de llanura aluvial presenta algún grado de peligro, especialmente en sectores por debajo de los 160 msnm (Sánchez y Batista, 2005, citado en Chávez López y Navarro Mendoza, 2018).

1.2. Marco conceptual: definición operativa de "peligro potencial" en este trabajo

Según el Glosario Internacional de Hidrología de la OMM y la UNESCO (2012), una inundación se define como el desbordamiento del agua fuera de los confines normales de un río o cualquier masa de agua, y/o la acumulación de agua procedente de drenajes en zonas que normalmente no se encuentran inundadas.

En este trabajo se adopta la definición del IPCC Glosario de términos (AR5, AR6) 2014, 2023, donde el peligro (hazard)

se define como la "ocurrencia potencial" de un evento físico que puede causar daños. Es importante precisar que en este estudio el término "peligro" se emplea en el sentido de identificación de escenarios geomorfológicos potenciales de inundación, caracterizando la magnitud máxima posible (extensión espacial de la llanura aluvial inundable) sin cuantificación de probabilidad de ocurrencia, dado que la precipitación actúa como factor desencadenante condicional cuya intensidad no es predecible con certeza absoluta. Esta aproximación metodológica se fundamenta en el principio de que la inundabilidad es una propiedad intrínseca del territorio, independiente de la ocurrencia de un evento pluviométrico específico (Bates y De Roo, 2000). La llanura aluvial representa la envolvente máxima de inundabilidad, resultado de procesos fluviales acumulados a lo largo del Holoceno, cuya activación parcial o total depende de la intensidad, duración y distribución espacial de la precipitación.

Esta definición operativa es intencional y justificada epistemológicamente. Los análisis de probabilidad/frecuencia basados en series cortas (30-50 años) presentan limitaciones conocidas para la estimación de eventos extremos (100-500 años), particularmente en contextos de cambio climático donde la estacionariedad estadística no se cumple (Milly et al., 2008). La geomorfología define la envolvente máxima del peligro; la hidrometeorología define qué tan lleno está ese recipiente en un momento dado.

1.3. Fundamentos teórico-metodológicos

Para la comprensión de los procesos de inundación abordados en este trabajo, resulta necesario precisar los fundamentos teóricos que sustentan la identificación de escenarios geomorfológicos de peligros de inundación fluvial realizadas a partir de índices hidromorfométricos.

En esta etapa de la investigación no se consideró la variable intensidad de precipitación para la delimitación del escenario geomorfológico, dado que la extensión espacial de la llanura aluvial potencialmente inundable está definida predominantemente por atributos del relieve, la morfología del sistema de drenaje y la conectividad hidráulica superficial, factores que constituyen la condición necesaria y estructurante del escenario. La precipitación actúa como factor desencadenante condicional: su intensidad, duración y distribución espacial determinan la activación del escenario y la magnitud del evento (profundidad, velocidad, duración de la inundación), pero no la extensión máxima potencial del mismo, la cual queda delimitada por la geomorfología de la llanura de inundación histórica.

La metodología se fundamenta en el rol de la topografía como factor determinante en la conducción y acumulación del flujo superficial, condicionante de la ocurrencia de peligros por inundación (García Rivero y Olivera Acosta, 2017). La morfología del terreno constituye el factor preponderante en la definición de la estructura hidrográfica (Olaya, 2004), y las características topográficas de una ladera determinan las pautas por las cuales el agua circula sobre ella. El MDT contiene información suficiente para definir, en primera aproximación, las propiedades de distribución del agua superficial (Felicísimo, 2006).

La delimitación de zonas potencialmente inundables ha evolucionado desde enfoques cartográficos manuales basados en fotointerpretación hasta métodos computacionales sofisticados que integran modelos hidrodinámicos, hidrológicos y, más recientemente, técnicas de aprendizaje automático. Tradicionalmente, los modelos hidrodinámicos unidimensionales (HEC-RAS) y bidimensionales (LISFLOOD-FP, TELEMAC) han constituido el estándar de oro para la simulación de escenarios de inundación, cuantificando profundidad, velocidad y extensión espacial a partir de condiciones de contorno hidráulicas definidas (Bates y De Roo, 2000; Neal et al., 2021). Paralelamente, los modelos hidrológicos distribuidos (TOPMODEL, VIC) han empleado índices topográficos para estimar áreas contribuyentes y escorrentía superficial (Beven y Kirkby, 1979). En la última década, los métodos de aprendizaje automático Random Forest, XGBoost, Gradient Boosting y redes neuronales convolucionales (CNN) han dominado la literatura de susceptibilidad a inundación, alcanzando alta precisión predictiva mediante el entrenamiento con inventarios históricos de inundación y variables predictoras múltiples (Pham et al., 2021; Saha et al., 2026; Feizbahr et al., 2025). Sin embargo, estos enfoques presentan limitaciones inherentes: los modelos hidrodinámicos requieren datos de caudal, rugosidad y geometría de cauce que raramente están disponibles en regiones en desarrollo; los modelos hidrológicos asumen estacionariedad climática, premisa invalidada por el cambio climático (Milly et al., 2008; IPCC, 2022); y los métodos de aprendizaje automático funcionan como "cajas negras" cuya interpretabilidad geomorfológica es limitada y cuya aplicabilidad depende críticamente de la disponibilidad de datos de entrenamiento masivos y representativos (Gharakhanlou y Perez, 2023).

En este contexto, los enfoques hidromorfométricos basados exclusivamente en atributos del relieve, como la combinación de Flujo Acumulado Modificado (MCA) e Índice Topográfico de Humedad (TWI) implementada

en este trabajo, constituyen una metodología intermedia que no pretende sustituir a los modelos hidrodinámicos ni competir con el aprendizaje automático en precisión predictiva, sino proporcionar una base geomorfológicamente interpretable, reproducible y de bajo costo para la zonificación del peligro potencial en contextos con limitaciones de datos (Samela et al., 2022; Hawker et al., 2022; Meadows et al., 2024). La novedad metodológica de este trabajo no reside en la creación de indicadores originales (MCA y TWI) están documentados desde las décadas de 1980 y 1970, respectivamente, sino en la integración sistemática de ambos mediante tipificación estadística (Z-scores) y suma lineal estandarizada para generar un Índice de Contraste, aplicada a escala nacional en un archipiélago tropical insular con procesamiento por cuencas fluviales como unidad espacial y su posterior generalización en mosaico ráster. Esta estructura metodológica, combinada con la validación dual mediante teledetección SAR y trabajo de campo, constituye una contribución operativa relevante para la planificación del ordenamiento territorial y la gestión del riesgo de desastres.

El flujo acumulado modificado (MCA) constituye un indicador indirecto de escorrentía superficial y subsuperficial en un punto determinado del relieve. Integra los efectos combinados del área contribuyente y de la convergencia/divergencia del flujo (Moore et al., 1988). Conceptualmente, representa el área total cuyo flujo, desplazándose de celda en celda según las direcciones calculadas mediante algoritmos de drenaje, converge sobre la celda de análisis. Este parámetro permite inferir el caudal circulante y la capacidad erosiva asociada, constituyendo un indicador de distribución de agua edáfica y de localización potencial de zonas de saturación (Olaya, 2004).

El Índice Topográfico de Humedad (TWI) cuantifica la predisposición topográfica a la saturación edáfica. Desarrollado por Beven y Kirkby (1979) para el modelo TOPMODEL, expresa la tendencia de acumulación hídrica en función de la posición topográfica. Se correlaciona con la humedad edáfica y refleja la tendencia a generar escorrentía (Gruber y Peckham, 2009).

En este estudio se propone una combinación lineal tipificada de ambos indicadores para delimitar zonas potencialmente inundables en Cuba, considerando que la configuración del relieve insular predominantemente llano y con extensas llanuras aluviales, constituye un escenario propicio para la aplicación de este tipo de análisis. La cuenca fluvial se estableció como unidad de análisis espacial.

El objetivo de este estudio consistió en delimitar zonas potencialmente inundables (escenarios geomorfológicos de peligro potencial por inundación fluvial) para el territorio de Cuba, empleando la cuenca fluvial como unidad de análisis espacial, mediante el cálculo e integración estandarizada de índices hidromorfométricos (MCA y TWI) derivados del MDT FABDEM (30 m) en SAGA-GIS. Como producto final se obtiene un mosaico ráster nacional con todas las áreas potencialmente inundables.

2. Materiales y métodos

2.2. Materiales

La investigación se sustentó en el empleo de información geoespacial de diversas fuentes y resolución, integrada dentro de un entorno de sistemas de información geográfica de código abierto, las cuales se describen a continuación:

Fuentes de información documental: Revisión bibliográfica especializada en bases de datos científicas (Scopus, Web of Science, SciELO) para el fundamento teórico de indicadores hidromorfométricos y algoritmos de modelación de inundaciones.

Se empleó el modelo digital del terreno FABDEM, con resolución espacial de 30 m, para la obtención de productos

derivados (índices hidromorfométricos) disponible en el repositorio GEE Community Catalog (<https://gee-community-catalog.org/projects/fabdem/>). La red de drenaje vectorial se obtuvo de las hojas topográficas a escala 1:250 000 de GEOCUBA (2015-2020).

Se descargaron imágenes ópticas (Landsat OLI 8/9 y Sentinel-2) e imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) Sentinel-1, Banda C, polarización VV/VH, resolución 10 m. Uso: validación de áreas inundadas durante eventos extremos. Fechas de adquisición específicas para cada evento validado se detallan en la sección 2.3.4.

Se empleó el Sistema de Información Geográfica SAGA-GIS v.9.12.2, sistema de código abierto, para la modelación y el procesamiento de la información espacial, así como para las salidas y almacenamiento de la información cartográfica. El sistema de coordenadas empleado fue la proyección cónica equivalente de Albers (Albers Equal-Area Conic Projection), garantizando la preservación de áreas para análisis a escala nacional.

2.3. Métodos

La metodología para la identificación de escenarios geomorfológicos de peligro a la inundación teniendo como unidad de análisis espacial a la cuenca fluvial se ejecutó mediante el siguiente flujo de trabajo (Figura 2).

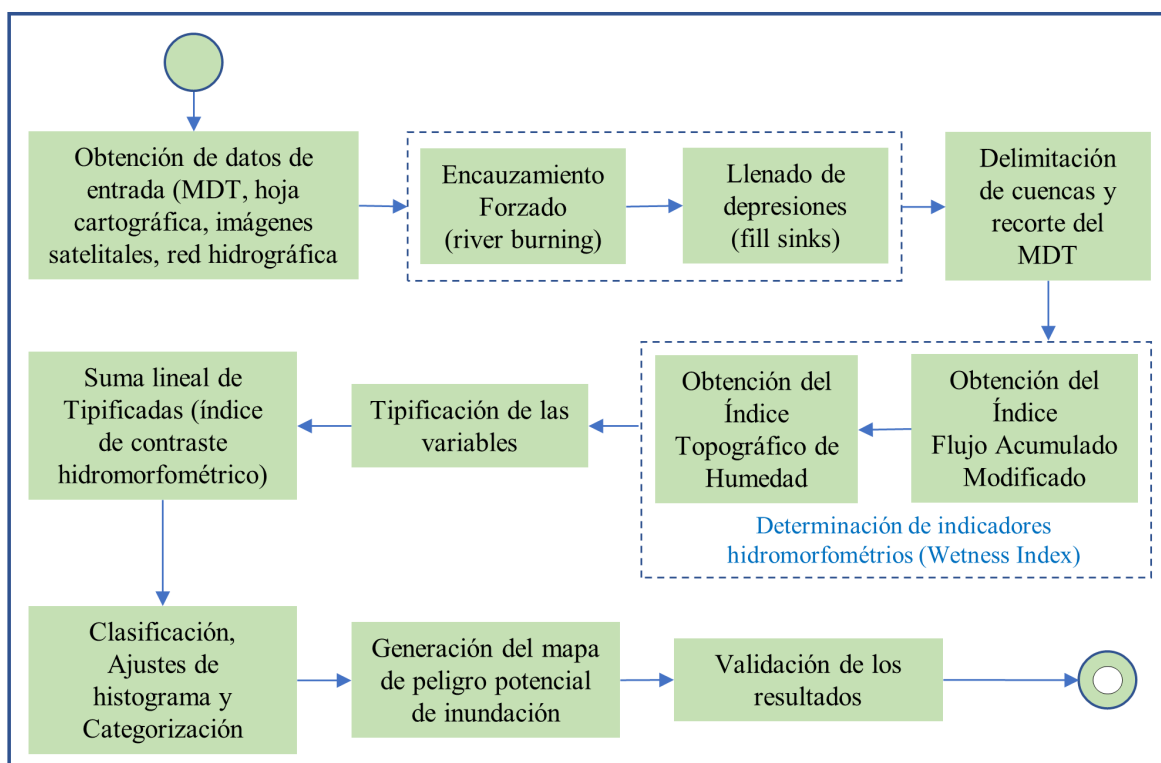


Figura 2. Flujo de trabajo.

2.3.1. Preparación del modelo digital del terreno

La zonificación del alcance de inundación en llanuras aluviales se fundamentó en el modelo digital del terreno (MDT) FABDEM, el cual presenta una resolución espacial de 30 m por celda.(Figura 3).

Se aplicaron dos correcciones fundamentales al MDT: encauzamiento forzado (river burning) y llenado de depresiones (fill sinks).

Encauzamiento forzado: La presencia de un cauce en una celda constituye un indicador fiable de la dirección de flujo. De no considerarse, el flujo en zonas llanas puede dispersarse en direcciones incorrectas, generando artefactos de drenaje ajenos a la red natural de la cuenca. Para implementar esta corrección se requiere una red de drenaje derivada de cartografía topográfica o imágenes satelitales de media a alta resolución. Dicha red se digitaliza

en formato vectorial (figura 4), se rasteriza y se aplica el burning sobre el MDT.

La profundidad de burning aplicada fue de 0.5 a 1.5 metros según el orden de la red de drenaje, determinada mediante pruebas iterativas que garantizaran la conectividad hidrológica sin generar artefactos de drenaje inexistentes. En cuencas urbanizadas, la red vial funciona como proxy de drenaje superficial donde no se dispone de cartografía hidrográfica actualizada.

Llenado de depresiones: Esta corrección permite eliminar los artefactos o imperfecciones del modelo generados durante la interpolación y lograr un trazado continuo de la red de drenaje hacia el punto de salida de la cuenca. SAGA-GIS dispone de ocho algoritmos para esta corrección; se evaluaron al menos tres, generando la red de drenaje correspondiente y seleccionando el que mejor se ajustó a la realidad observada. El algoritmo de Planchon

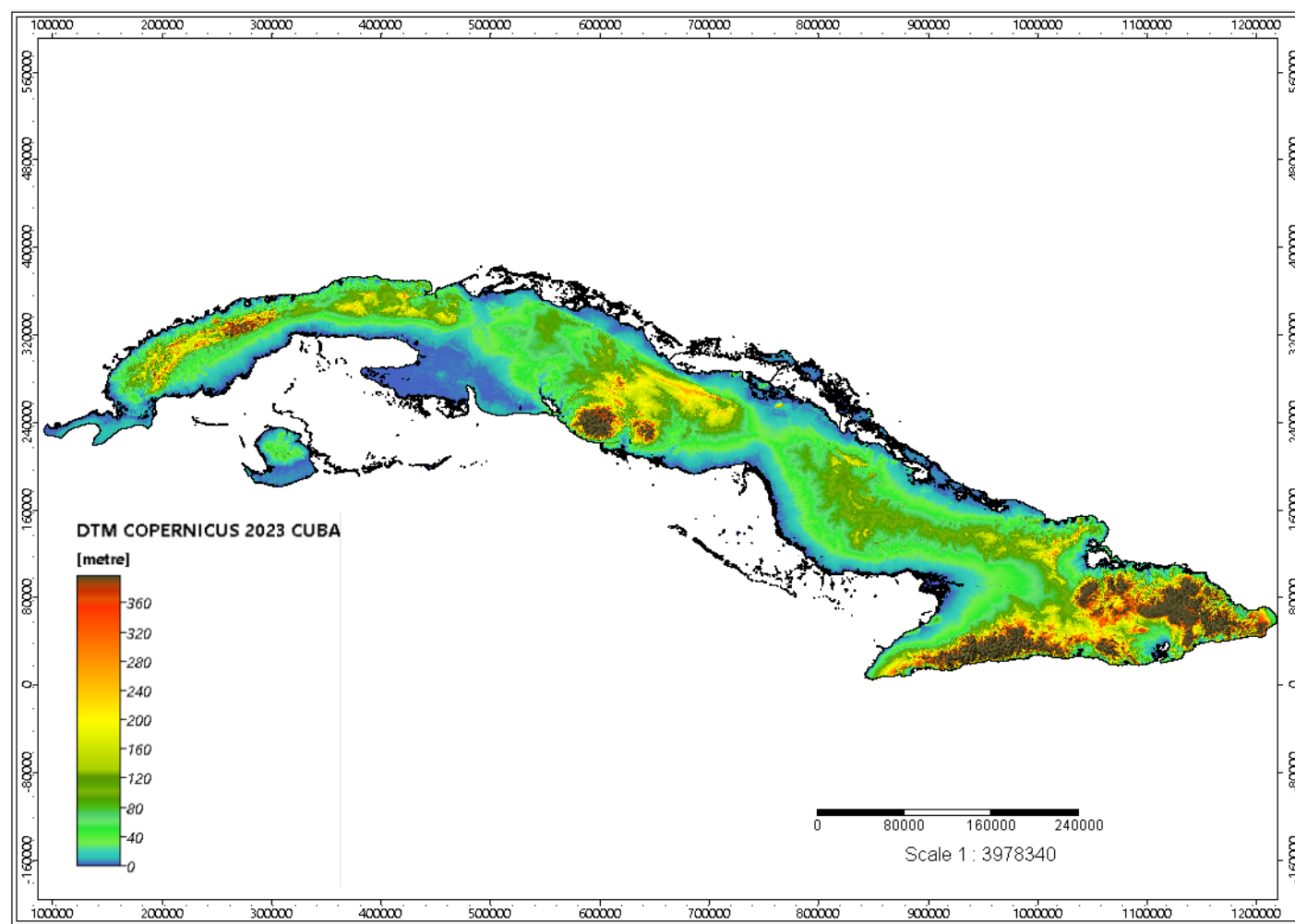


Figura 3. Modelo digital del terreno (MDT) FABDEM para Cuba.
Fuente: Portal WEB (<https://gee-community-catalog.org/projects/fabdem>).

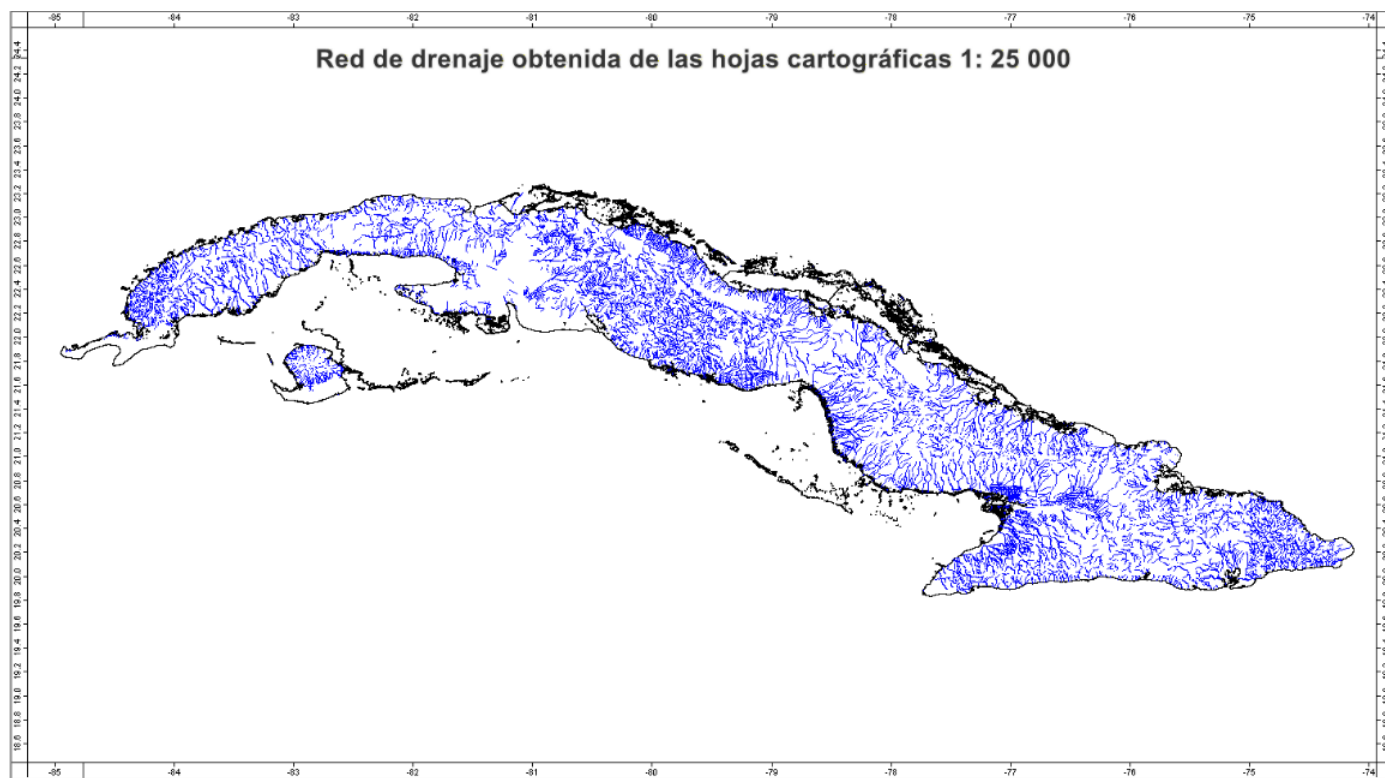


Figura 4. Red de drenaje.

Fuente: Mapas vectoriales 1:250 000. GEOCUBA.

y Darboux (2001) arrojó los mejores resultados en este estudio, medidos mediante la concordancia visual con la red de drenaje cartográfica vectorial de referencia.

Corregido hidrológicamente el modelo, se derivaron las cuencas fluviales y sus atributos fisiográficos, morfométricos e hidrológicos. Posteriormente, el MDT hidrológicamente corregido se recortó por los límites de cada cuenca mediante la herramienta Clip Grid with Polygon de SAGA-GIS, procediéndose al cálculo de los indicadores hidromorfométricos para cada unidad (Figura 5).

2.3.2. Cálculo de indicadores hidromorfométricos

Para la delimitación de zonas susceptibles a inundación se emplearon dos indicadores hidromorfométricos derivados del MDT: el Flujo Acumulado Modificado (MCA) y el Índice Topográfico de Humedad (TWI). Ambos se calcularon mediante el algoritmo SAGA Wetness Index implementado en SAGA-GIS v.9.12.2.

El MCA modifica el área de drenaje acumulado integrando un factor de restricción basado en la succión capilar que reduce el área contribuyente efectiva en función de la pendiente local, la rugosidad y la infiltración. La ecuación conceptual es: $MCA = \sum(w_i \times a_i)$, donde w_i es el factor

de peso de la celda i (función de pendiente, rugosidad e infiltración) y a_i es el área contribuyente de la celda i . Esta formulación, aunque presentada de manera simplificada, refleja la lógica del algoritmo SAGA que incorpora la succión capilar como restricción al flujo acumulado.

El TWI cuantifica la predisposición topográfica a la saturación edáfica (Beven y Kirkby, 1979): $TWI = \ln(a / \tan \beta)$, donde a es el área de drenaje específica acumulada por unidad de ancho de contorno (m^2 o m), $\tan \beta$ es la pendiente local en radianes, y $\ln$ es el logaritmo natural.

Se empleó el algoritmo SAGA Wetness Index (Böhner y Selige, 2006; Conrad et al., 2015) con la configuración óptima descrita en la Tabla 1.

La succión capilar (parámetro crítico) representa la tensión capilar en el suelo adyacente que promueve el flujo hacia depresiones topográficas. Valores bajos (ej. 10) implican mayor succión capilar, facilitando el ascenso del agua hacia celdas adyacentes por acción capilar. Para eventos de inundación naturales, el valor 10 resulta conservador y realista.

El tipo de pendiente de cuenca (catchment slope) se seleccionó en lugar de la pendiente local, dado que representa más adecuadamente el potencial de drenaje

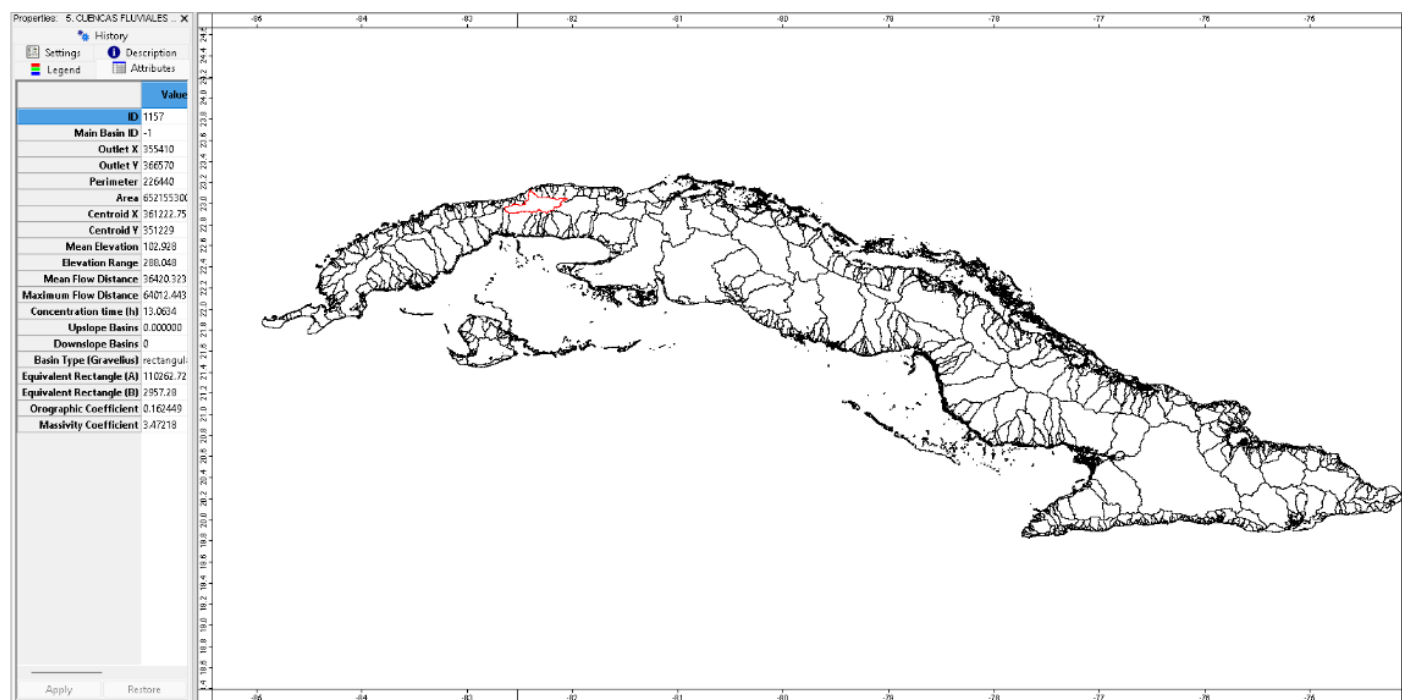


Figura 5. Cuenclas fluviales.

Fuente: Elaboración propia derivada del procesamiento del MDT.

Tabla 1. Configuración óptima del algoritmo SAGA Wetness Index.

Parámetro	Valor	Descripción
Suction	10	Efecto capilar moderado-alto
Type of Area	Specific	Área específica de aporte (m^2/m)
Type of Slope	Catchment	Pendiente de cuenca aguas arriba
Minimum Slope	0	Permite zonas planas naturales
Offset Slope	0.1	Evita división por cero
Slope Weighting	1	Peso estándar para pendiente

Fuente: Documentación técnica de SAGA-GIS (Böhner et al., 2002; Conrad et al., 2015).

de la cuenca completa, evitando la subestimación de la saturación en valles planos con laderas circundantes de pendiente pronunciada.

La interpretación de los indicadores hidromorfométricos MCA y TWI requieren la definición de umbrales cuantitativos que permitan traducir los valores adimensionales y de área específica en categorías de susceptibilidad hidrológica

con significado operativo para la gestión del riesgo de inundación (Tabla 2).

Los umbrales reportados ($MCA > 50,7 m^2 o m$; $TWI > 12$) son valores de referencia empírica establecidos en la literatura para llanuras aluviales de baja pendiente. En este trabajo, la clasificación final se basó en la distribución estadística del Índice de Contraste (IC) por cuenca, no en umbrales absolutos fijos de los indicadores, garantizando la adaptabilidad del método a diferentes contextos geomorfológicos.

La selección de indicadores hidromorfométricos para la delimitación de zonas potenciales a la inundación fluvial, requiere un análisis comparativo de sus propiedades intrínsecas, limitaciones y complementariedades, dado que ningún parámetro aislado captura de manera integral la complejidad del proceso de acumulación y drenaje del agua superficial.

Los indicadores MCA y TWI fueron considerados con pesos iguales mediante suma lineal estandarizada. Esta decisión se fundamenta en que ambos indicadores presentan ventajas y desventajas complementarias en función del contexto geomorfológico (Tabla 3): el MCA captura la acumulación hídrica en zonas planas, pero puede sobreestimar en pendientes pronunciadas; el TWI modela el balance local acumulación-drenaje, pero subestima áreas

Tabla 2. Interpretación de los indicadores para inundaciones.

Output	Unidad	Interpretación para inundaciones
Modified Catchment Area (MCA)	(m ²) o (m) (área o longitud)	Área efectiva de aporte considerando succión capilar. Valores > 50,7 m ² o m
Wetness Index (SWI/TWI)	Adimensional	Valores > 12 típicamente correlacionan con suelos saturados/áreas de inundación frecuente

Fuente: Elaboración propia, basada en Gruber y Peckham (2009) y García Rivero y Olivera Acosta (2017).

Tabla 3. Comparativa de indicadores hidromorfométricos.

Criterio	MCA	TWI
Qué mide	Es un Indicador indirecto del agua acumulada en la celda	Balance entre acumulación y drenaje
Sensibilidad a pendiente	Baja, enfocado en acumulación	Alta - penaliza pendientes
Mejor para	Zonas planas, humedales, llanuras de inundación	Pendientes moderadas, modelado de saturación del suelo
Limitación	Puede sobreestimar en zonas muy pendientes si no se corrige	Subestima áreas planas con alta acumulación

Fuente: Elaboración propia.

planas con alta convergencia. La combinación lineal con pesos iguales compensa estas limitaciones individuales sin introducir subjetividad en la asignación de ponderaciones.

2.3.3. Tipificación estadística e integración de indicadores

Obtenidos los indicadores MCA y TWI para cada cuenca fluvial, se procedió a su tipificación estadística mediante estandarización (Z-scores):

$$Z = (x - \mu) / \sigma$$

Donde μ es la media poblacional y σ es la desviación típica.

La suma estandarizada genera un Índice de Contraste (IC), donde cada celda es afectada por la media poblacional de la distribución muestral. Los valores de las celdas inferiores a la media adquieren signo negativo, mientras que los superiores resultan positivos. Este mecanismo de auto regulación por signo genera contraste en la distribución espacial de los datos.

Dado que los datos presentaban un comportamiento logarítmico con sesgo hacia la izquierda, se aplicó una transformación logarítmica al mapa ráster del IC mediante la calculadora ráster de SAGA-GIS. Esta transformación eliminó los valores negativos, dejando visibles únicamente los escenarios espaciales favorables a la acumulación de agua sobre el terreno.

Finalmente, se clasificó el histograma resultante en cinco clases (muy alto, alto, moderado, bajo y muy bajo)

mediante ajuste manual basado en los puntos de inflexión de la curva de densidad, donde la pendiente de la frecuencia acumulada experimenta cambios significativos, garantizando una transición geomorfológica consistente entre categorías. El criterio explícito fue que la categoría Moderada ocupara el intervalo central anclado a la moda estadística, representando las condiciones promedio de la cuenca. Este proceso se ejecutó iterativamente para cada cuenca fluvial, construyéndose un mosaico ráster para todo el territorio nacional.

La clasificación mediante ajuste manual de histogramas, aunque aparentemente subjetiva, se basó en criterios estadísticos objetivos (puntos de inflexión de la curva de densidad y anclaje de la clase moderada a la moda). La homogeneización de umbrales entre cuencas se realizó mediante referenciación a la distribución modal del conjunto de cuencas, garantizando coherencia espacial en las zonas de solapamiento. Este procedimiento es reproducible y fue documentado paso a paso para cada cuenca procesada.

2.3.4. Validación

La validación de los resultados del modelo se ejecutó mediante una estrategia dual que integra verificación de campo y teledetección.

La validación de este modelo geomorfológico de potencialidad no sigue la lógica de validación de modelos hidrometeorológicos predictivos (donde se evalúan falsos positivos/negativos). El escenario geomorfológico

representa la envolvente máxima de inundabilidad; su "no activación" en un evento dado no constituye un error del modelo, sino una evidencia de que la magnitud del evento hidrometeorológico fue insuficiente para activar la totalidad del escenario. La validación busca demostrar que: (1) todas las zonas que se inundaron en eventos observados están contenidas dentro del escenario modelado (ausencia de falsos negativos); y (2) el escenario modelado corresponde morfológicamente a llanuras aluviales y depresiones reconocidas geomorfológicamente como potencialmente inundables.

Verificación de campo: Para los sectores accesibles de la provincia de La Habana, se realizó trabajo de campo en las zonas identificadas como potencialmente inundables. Se empleó la aplicación OruxMaps instalada en un dispositivo móvil Samsung Galaxy S22 Plus, equipado con receptor multi constelación (GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou). Se cargó el mapa vectorial de susceptibilidad obtenido del modelado. Previo al levantamiento, el receptor se estabilizó durante 15 minutos para alcanzar una exactitud horizontal aproximada de ± 1 m. El levantamiento pedestre (track logging) se orientó al registro de la línea de marca de agua y de los rastros de humedad residual post-evento, información complementada con entrevistas a pobladores afectados. Los datos georreferenciados (waypoints y tracks en formato KML) se superpusieron a las áreas modeladas en el SIG para evaluar la coincidencia espacial entre la predicción del modelo y la evidencia observada en campo. Se registraron 198 puntos de control en La Habana, distribuidos en zonas con historial de inundación recurrente reportada por habitantes y registros oficiales. Todos los puntos validados cayeron dentro de las categorías "Alta" o "Muy Alta" del modelo, confirmando la ausencia de falsos negativos en el área de validación.

Teledetección: Para localidades remotas o de difícil acceso, se emplearon imágenes SAR (Radar de Apertura Sintética) del sensor Sentinel-1 en Banda C con resolución espacial 10 m, disponibles desde el portal Copernicus Browse. Estas imágenes permiten la detección de superficies inundadas durante eventos extremos. Las áreas detectadas se contrastaron espacialmente con los resultados del modelado mediante análisis de solapamiento en entorno SIG.

Los eventos validados mediante SAR incluyen:

- » Huracán Michael, 9 de octubre de 2018, oeste de Pinar del Río
- » Evento meteorológico extremo, 18 de junio de 2018, Ciénaga de Zapata

- » Huracán Melissa, octubre de 2025, provincias Granma-Holguín
- » Otros eventos seleccionados según disponibilidad de imágenes SAR.

En todos los casos analizados, las zonas efectivamente inundadas detectadas por satélite se ubicaron predominantemente dentro de las categorías "Alta" y "Muy Alta" del modelo, confirmando que los indicadores hidromorfométricos MCA-TWI capturan adecuadamente la predisposición del relieve a la acumulación hídrica durante eventos de magnitud excepcional.

La afirmación de coincidencia espacial del 100% se refiere específicamente a que: (a) todas las áreas inundadas observadas por SAR están contenidas dentro del escenario geomorfológico modelado (ausencia de falsos negativos); y (b) no se observaron inundaciones fuera de los escenarios geomorfológicos identificados. Esta métrica no implica que todo el escenario modelado se haya inundado en los eventos observados, sino que el escenario modelado actúa como envolvente máxima que contiene todas las inundaciones observadas. La "no activación" de sectores del escenario en eventos de menor magnitud es consistente con la naturaleza geomorfológica del modelo, que representa la máxima inundabilidad posible y no la inundación para una intensidad de precipitación específica.

3. Resultados

3.1 Indicadores hidromorfométricos

Los valores del MCA obtenidos mediante SAGA-GIS (figura 6) presentaron un rango extremadamente amplio (mínimo: 1,024; máximo: 2,147,483,648 $\approx 2.15 \times 10^9$), evidencia alta heterogeneidad en la convergencia de escurrimiento. Dada la disparidad de magnitudes, se aplicó normalización Min-Max al rango [0,1]. Los valores próximos a cero corresponden a divisores de aguas y laderas con escasa acumulación representado por colores azules oscuros, mientras que valores próximos a 1, identifican zonas de máxima concentración hídrica (exutorios, confluencias de cauces principales y depresiones topográficas) representado por los colores rojo intenso. Los percentiles superiores (P90-P100) del MCA normalizado delimitan las zonas de mayor susceptibilidad a inundación por concentración de flujo.

Los valores elevados mayores a 12 unidades de TWI indican potencial de acumulación hídrica edáfica representados por los colores rojo oscuro y el naranja (figura 7), coincidiendo

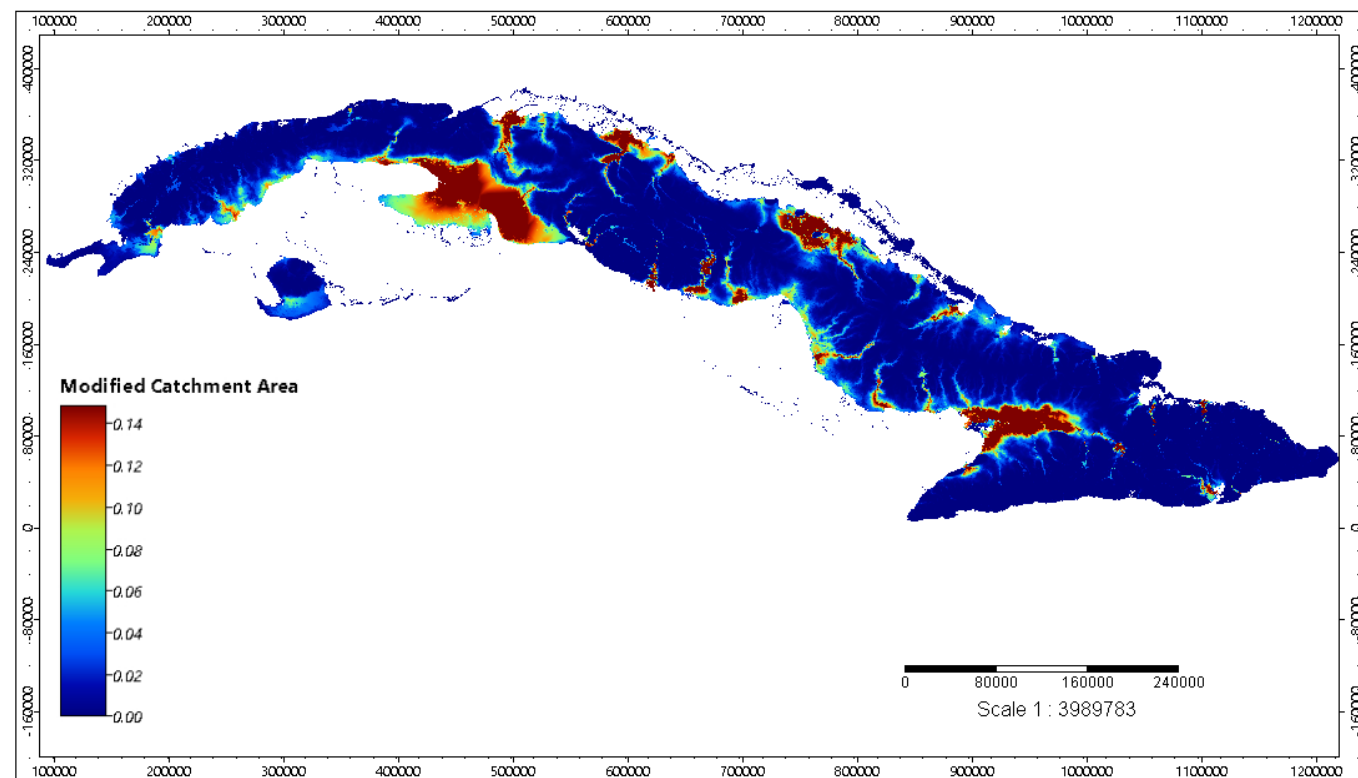


Figura 6. Mosaico ráster Flujo acumulado modificado (MCA)

Fuente: Elaboración propia.

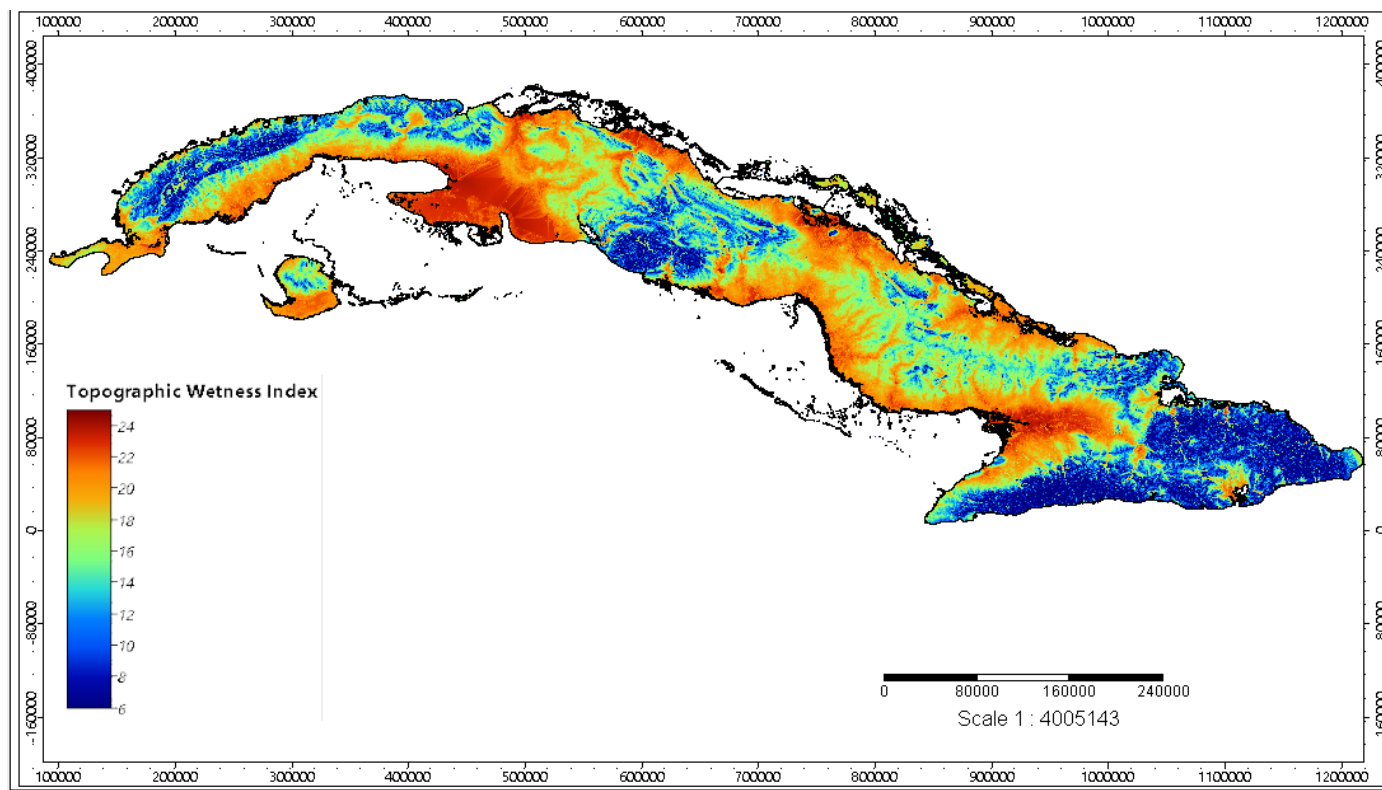


Figura 7. Mosaico ráster Índice Topográfico de Humedad (TWI).

Fuente: Elaboración propia.

con zonas de baja pendiente y alta área de drenaje específica. Los valores bajos indican escaso potencial de acumulación, ya sea por área de captación reducida o pendiente elevada, indicativo de suelos bien drenados representado en el mapa por el color azul claro.

3.2 Índice de susceptibilidad integrado o Índice de Contraste (IC)

La Figura 8 presenta el resultado de la aplicación del procedimiento metodológico ejemplificado a la cuenca fluvial del río Luyanó, mostrando la distribución espacial del índice de contraste hidromorfométrico (IC) y su comportamiento logarítmico tras la transformación.

La categorización del peligro potencial por inundación exige que las clases de susceptibilidad reflejen de manera coherente la estructura estadística de la distribución subyacente, evitando sesgos de clasificación que sobreestimen o subestimen áreas críticas. En este sentido, el ajuste del histograma del Índice de Contraste (IC) logarítmico se ejecutó mediante partición manual en cinco clases, con el criterio explícito de que la categoría Moderada ocupara el intervalo central anclado a la moda estadística. Esta estrategia asegura que la clase intermedia represente

las condiciones promedio de la cuenca, ni óptimas ni críticas para la acumulación hídrica, mientras que las clases inferiores (Muy Baja y Baja) y superiores (Alta y Muy Alta) capturen los extremos de la distribución. Los umbrales se definieron en los puntos de inflexión de la curva de densidad, donde la pendiente de la frecuencia acumulada experimenta cambios significativos, garantizando así una transición geomorfológica consistente entre categorías. La Figura 9 ilustra el ajuste del histograma en cinco clases.

3.3 Mosaico raster de zonas potenciales a la inundación fluvial

El proceso de modelación se ejecutó de forma independiente para cada unidad de análisis espacial (cuenca fluvial), generando mapas de Índice de Contraste (IC) logarítmico y su correspondiente clasificación en cinco categorías de susceptibilidad. La generalización de estos resultados a escala nacional requirió la construcción de un mosaico ráster que integrara las coberturas parciales en una sola capa cartográfica continua. Para garantizar la coherencia espacial en las zonas de solapamiento entre cuencas adyacentes, se homogeneizaron los umbrales de clasificación mediante el ajuste de histogramas referenciado a la distribución modal del conjunto de cuencas.

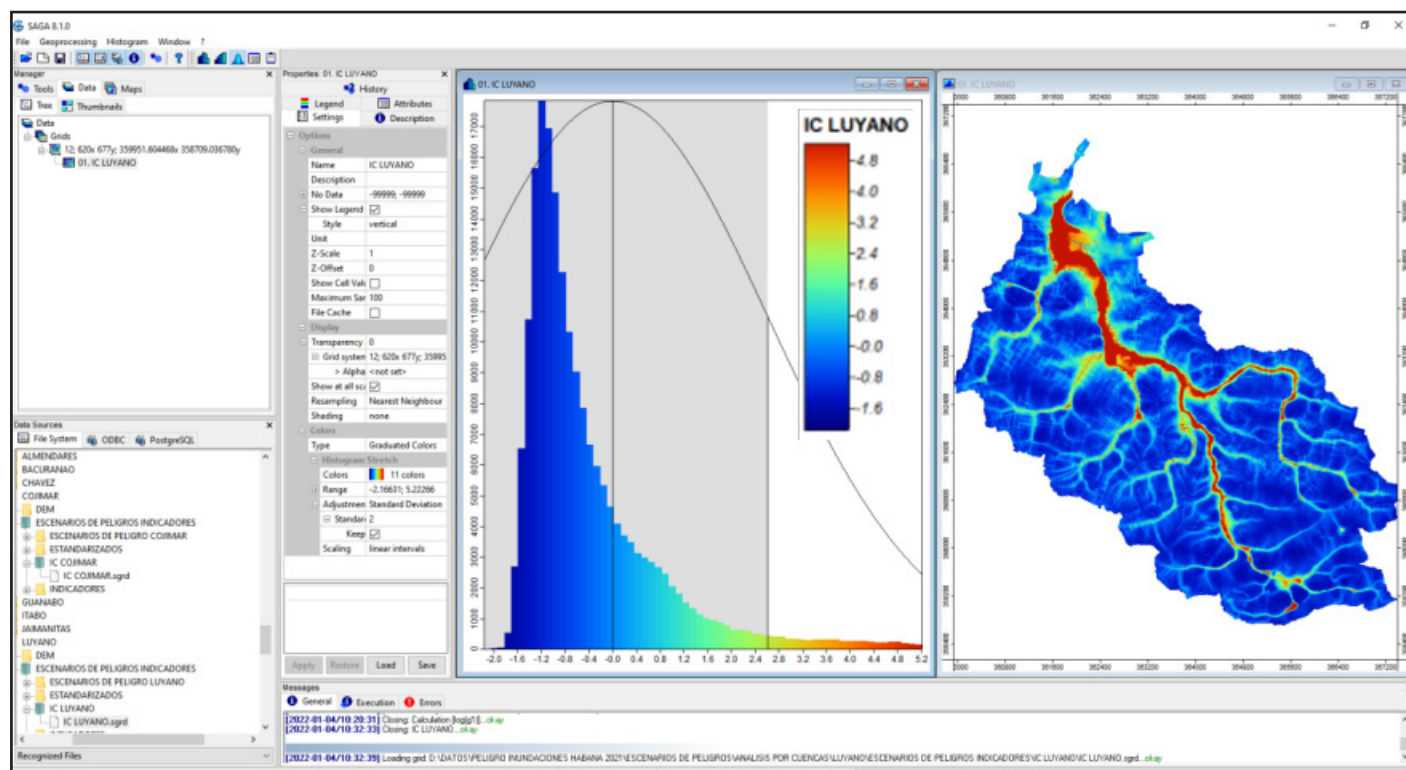


Figura 8. Distribución espacial del dato (IC) en cuenca de Luyanó.

Fuente: Elaboración propia.

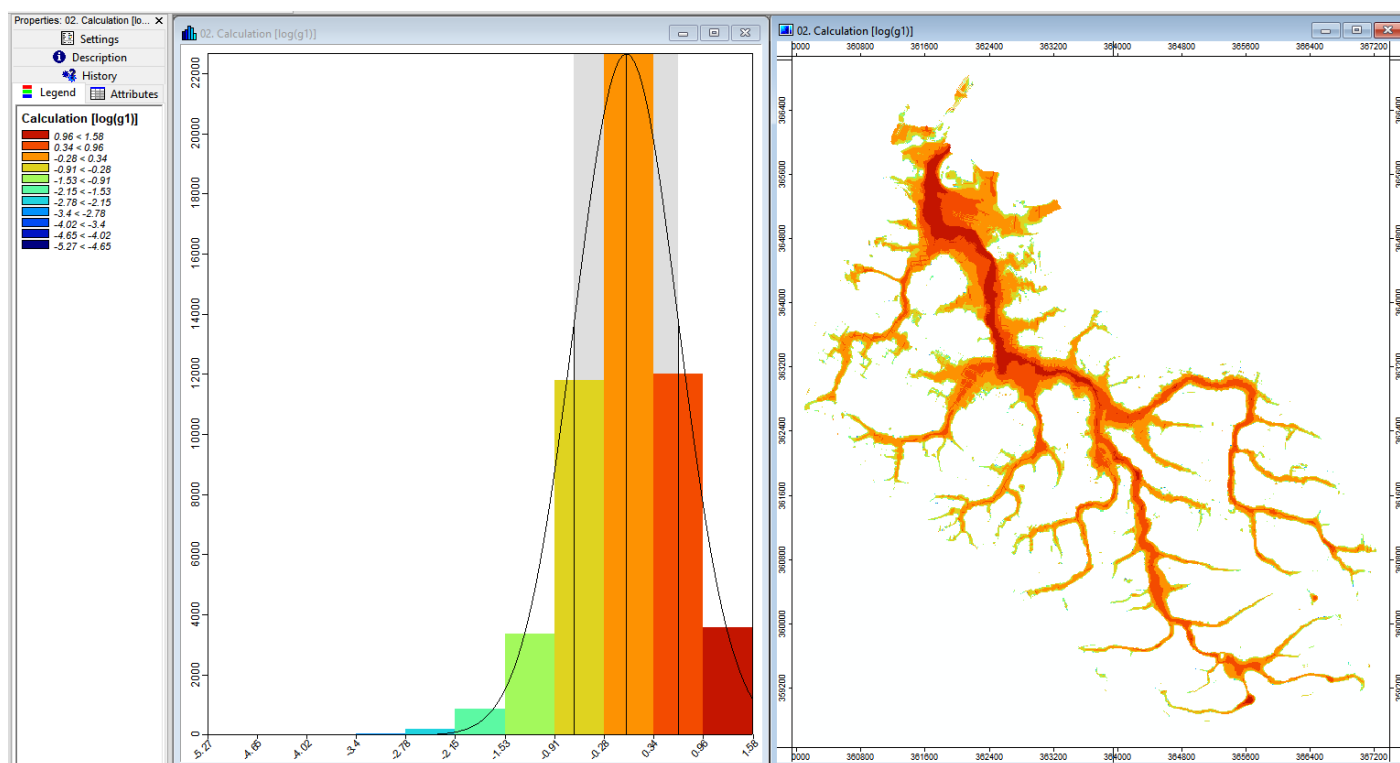


Figura 9. Ajuste del histograma en 5 clases.

Fuente: Elaboración propia.

El producto resultante es un mosaico ráster de resolución 30 m que cubre la totalidad del territorio emergido de Cuba, sintetiza la aplicación de la metodología hidromorfométrica propuesta, representando la distribución espacial del peligro potencial por inundación fluvial clasificado en cinco niveles: Muy bajo, Bajo, Moderado, Alto y Muy alto.

El porcentaje del territorio cubano clasificado en cada categoría se observa en la [tabla 4](#).

Los valores reflejan la prevalencia de llanuras aluviales y depresiones en el relieve insular cubano.

Tabla 4. Distribución del peligro potencial de inundación en Cuba.

Categoría de peligro potencial	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Muy Bajo	15190	14
Bajo	8871	8.2
Moderado	9287	8.6
Alto	9676	8.9
Muy Alto	9864	9
Total	52888	48.7

Fuente: elaboración propia.

Los porcentajes suman 48.7 % (52,888 km²), lo que implica que aproximadamente 51.3 % del territorio cubano (55,249 km²) no fue clasificado en ninguna de estas cinco categorías de peligro potencial. Esto podría corresponder a zonas de relieve montañoso, mesetas o áreas no evaluadas en el estudio (Cayos y Cayuelos).

El territorio cubano no clasificado en las cinco categorías de susceptibilidad corresponde geomorfológicamente a:

- » Sierras y sistemas montañosos (Guamuahaya, Sierra Maestra, Escambray, Nipe-Sagua-Baracoa): pendientes > 15°.
- » Mesetas kársticas (Alturas de Pizarras, Sierra de Cubitas): drenaje interno, ausencia de convergencia superficial, TWI bajo a pesar de relieve plano
- » Mogotes (Valle de Viñales): relieve cónico aislado, drenaje radial, sin acumulación
- » Zonas de contacto sierra-llanura con pendientes fuertes mayores a 15 grados.

Estas áreas quedan excluidas por criterios geomorfológicos objetivos: carecen de las condiciones de acumulación hídrica (alto flujo acumulado) y saturación topográfica (alto TWI) que definen el peligro potencial a inundaciones dentro del escenario geomorfológico. No se trata de un

"error" de clasificación, sino de una delimitación correcta del dominio geomorfológico.

El mosaico ráster de peligro potencial por inundación fluvial (figura 10) evidencia una distribución espacial condicionada por las unidades geomorfológicas regionales. Las áreas de mayor susceptibilidad se concentran en llanuras aluviales activas, depresiones topográficas de baja elevación y zonas de transición montaña-llanura, distribuidas de manera simétrica en ambas vertientes costeras. Estas unidades corresponden morfológicamente a llanuras marino-costeras y fluvio-deltaicas, con presencia de vegetación de tipo hidrófilo, destacándose el manglar y el herbazal de ciénaga, entre las que se destacan por su mayor peligro las localidades de la Península de Zapata y la parte baja inferior de la cuenca del río Cauto en el oriente cubano. En otro orden de importancia pueden mencionarse la parte inferior del río Cuyaguatzeje en la región de Guane y en la parte oeste del territorio de Granma. En el interior del territorio, las zonas susceptibles se asocian a valles fluviales y depresiones conectadas hidráulicamente a la red de drenaje fluvial principal y a antiguos paleocauces de ríos presentes en estas llanuras.

La verificación de la robustez del modelo requirió la contrastación de los escenarios geomorfológicos de peligro con evidencia empírica de inundaciones reales

(figuras 11A, 11B, 11C, 11D). Se seleccionaron eventos extremos ocurridos durante el período de estudio para los cuales se disponía de imágenes SAR de la misión Sentinel-1 (Banda C, polarización VV/VH, resolución espacial 10 m). La capacidad de penetración de la microonda en condiciones de nubosidad extrema y su sensibilidad a la rugosidad superficial permitieron identificar con precisión las extensiones anegadas sobre el terreno. La superposición espacial de estas áreas validadas por teledetección con el mosaico ráster de peligro potencial reveló una concordancia notable, más del 65 % de las zonas efectivamente inundadas detectadas por satélites, se ubicaron predominantemente dentro de las categorías Alta y Muy alta de peligro potencial de inundación, (Tabla 5) confirmando que los indicadores

Tabla 5. Distribución del peligro real de áreas inundadas identificadas por satélites vs. inundación potencial modelada por indicadores hidromorfológicos en Cuba.

Categoría de Peligro Potencial	Área Inundada (km ²)	Porcentaje del Total Inundado (%)
Alta y Muy Alta	1363	65.4
Moderada	348	16.7
Baja y Muy Baja	372	17.9
Total	2083	100

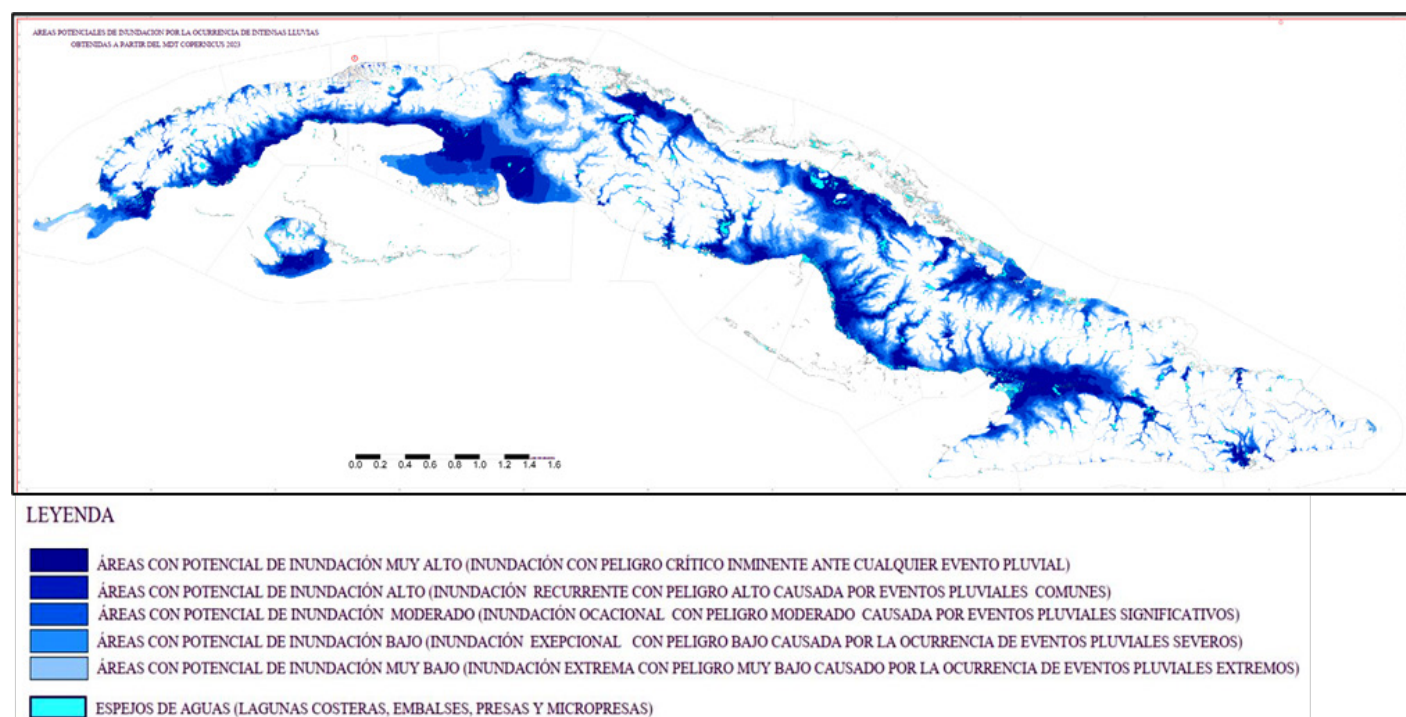


Figura 10. Mosaico ráster zonas potencialmente inundables.

Fuente: Elaboración propia.

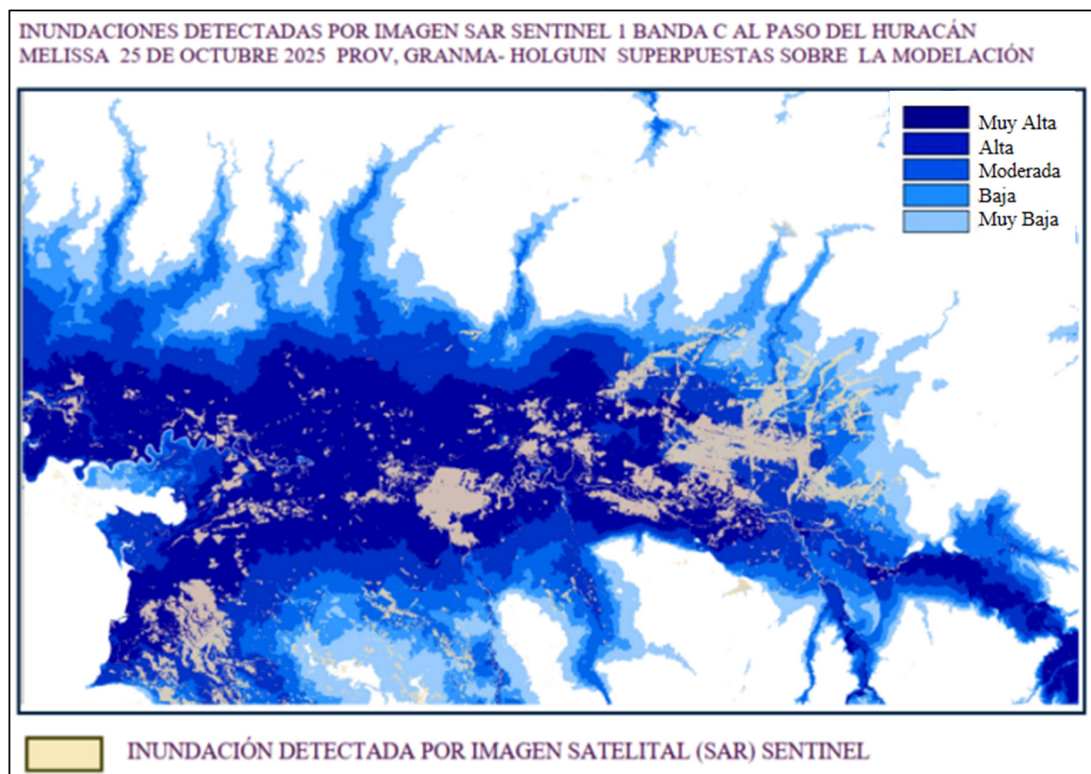


Figura 11A. Escenarios geomorfológicos de peligro Vs. inundación real.

Fuente: Elaboración propia.

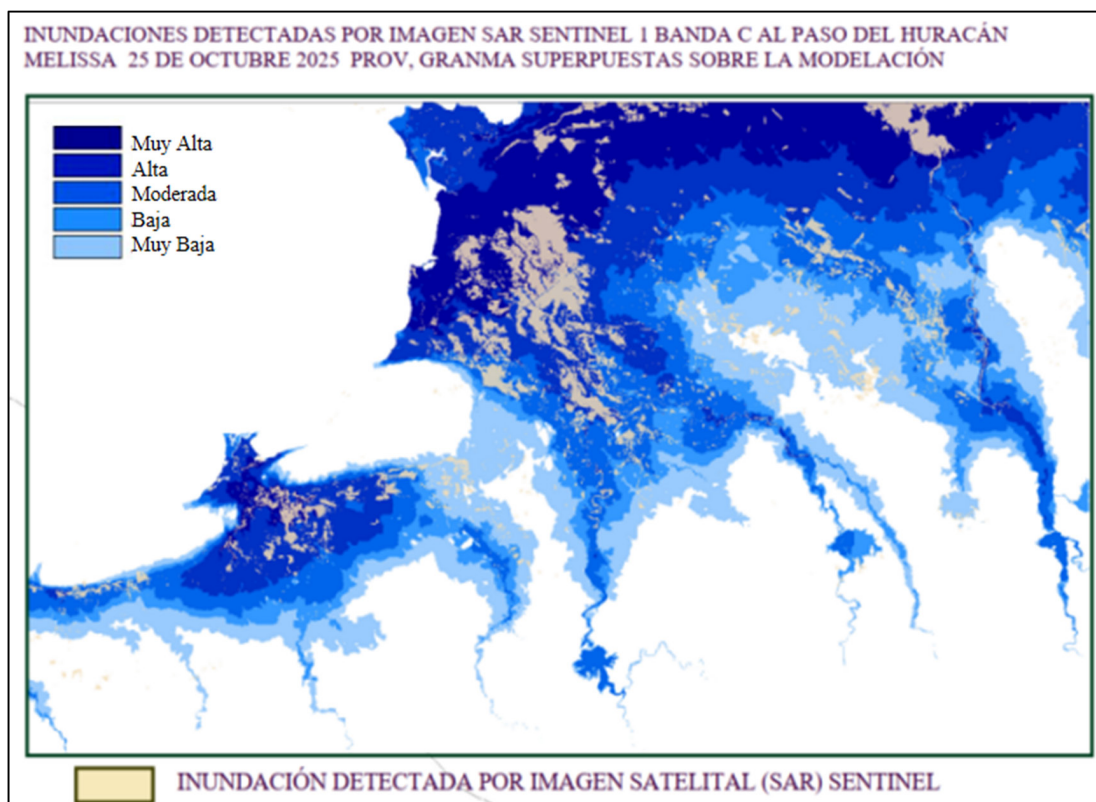


Figura 11B. Escenarios geomorfológicos de peligro Vs. inundación real.

Fuente: Elaboración propia.

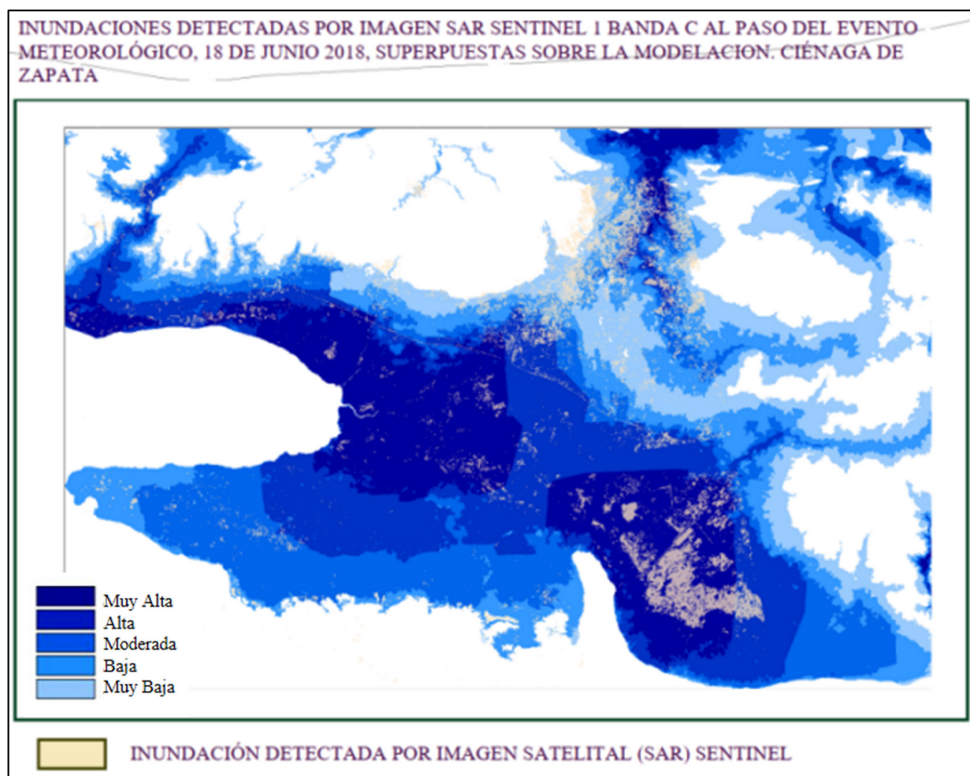


Figura 11C. Escenarios geomorfológicos de peligro Vs. inundación real.

Fuente: Elaboración propia.

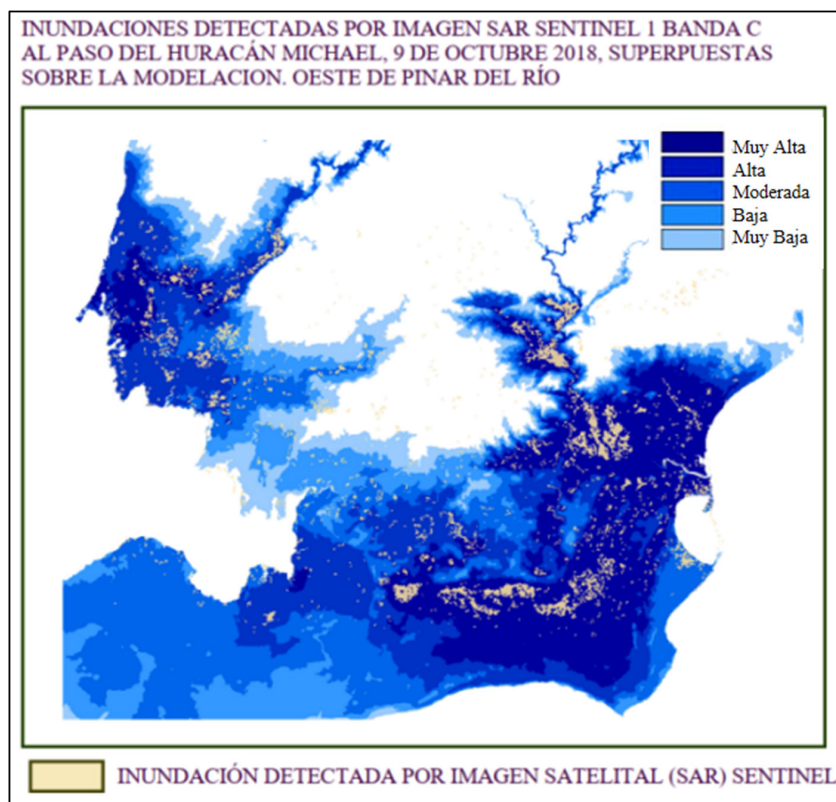


Figura 11D. Escenarios geomorfológicos de peligro Vs. inundación real.

Fuente: Elaboración propia.

hidromorfométricos MCA-TWI capturan adecuadamente la predisposición del relieve a la acumulación hídrica durante eventos de magnitud excepcional.

4. Discusión

4.1. Interpretación de los resultados hidromorfométricos

Los resultados evidenciaron que el MCA normalizado identificó adecuadamente zonas de máxima concentración hídrica, mientras que el TWI discriminó áreas de saturación edáfica. La combinación MCA-TWI superó las limitaciones individuales: el MCA no subestima zonas planas con alta acumulación, y el TWI no penaliza excesivamente la pendiente cuando se integra con el MCA.

La configuración óptima del algoritmo SAGA Wetness Index, particularmente el uso de la succión capilar con valor 10 y la pendiente de cuenca en lugar de la pendiente local, maximizó la sensibilidad del índice a depresiones topográficas y zonas de acumulación hídrica, resultando especialmente efectiva en terrenos de baja pendiente como los que predominan en Cuba.

Las cuencas se delimitaron mediante parteaguas topográficos derivados del MDT, lo que garantiza cobertura territorial integral, incluidas las formaciones kársticas. Dado que el modelo asume flujo superficial continuo y no incorpora la conectividad subsuperficial característica del karst, los valores MCA-TWI en estas zonas reflejan la predisposición topográfica a la acumulación, no la dinámica real de infiltración y flujo por conductos. Los resultados en dominios kársticos deben interpretarse como aproximaciones estructurales sujetas a futura validación complementaria con registros freáticos o trazas históricas de inundación

4.2. Fortalezas y limitaciones del enfoque geomorfológico

El enfoque hidromorfométrico presentado aquí ofrece ventajas en contextos con limitaciones de datos hidrometeorológicos históricos, proporcionando una base geomorfológicamente interpretable que puede servir como insumo para modelos más complejos en etapas posteriores.

La metodología empleada, fundamentada exclusivamente en el análisis del MDT y procesada en software de código abierto, constituye una alternativa reproducible y de bajo costo computacional para regiones con limitaciones de datos

hidrometeorológicos de alta resolución, característica frecuente en contextos tropicales insulares.

En la literatura reciente, los métodos de aprendizaje automático (Random Forest, XGBoost, CNN) han mostrado alta precisión en mapeo de susceptibilidad a inundación (Feizbahr et al., 2025; Saha et al., 2026). Sin embargo, estos métodos requieren grandes cantidades de datos de entrenamiento (puntos inundados/no inundados) y no garantizan la interpretabilidad geomorfológica del resultado (Pham et al., 2021; Gharakhanlou y Pérez, 2023). Por el contrario, los enfoques hidromorfométricos basados en índices derivados del MDT como el MCA y el TWI calculados mediante SAGA Wetness Index, han demostrado ser particularmente efectivos en contextos con escasez de datos históricos, proporcionando una base geomorfológicamente interpretable que puede servir como insumo para modelos más complejos en etapas posteriores (Samela et al., 2022; Hawker et al., 2022). La validación mediante teledetección SAR (Sentinel-1) y trabajo de campo, estrategia dual empleada en este estudio, ha sido reconocida como robusta para verificar la exactitud del modelo tanto en áreas accesibles como en zonas remotas en investigaciones recientes (Nikolaus, 2025; Feizbahr et al., 2025). Asimismo, el uso del MDT FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus DEM) a resolución de 30 m ha sido validado como el mejor DEM global disponible para modelación de inundaciones en contextos diversos, superando las limitaciones de modelos anteriores en zonas de baja pendiente y áreas costeras (Hawker et al., 2022; Meadows et al., 2024). En particular, para regiones con datos hidrometeorológicos limitados como el Caribe insular, los enfoques hidromorfométricos ofrecen ventajas comparativas significativas al no depender de series históricas de caudal ni de calibración de parámetros hidráulicos, requisitos que frecuentemente son inalcanzables en países en desarrollo (Albano et al., 2020; Manfreda, 2021).

Es importante explicar las limitaciones inherentes a este enfoque:

» **Escala de aplicabilidad:** La resolución de 30 m es adecuada para planificación regional (escala 1:50 000 - 1:100 000), pero puede no capturar micro depresiones críticas en zonas urbanas donde la inundación pluvial local es dominante. Para ordenamiento urbano detallado se recomienda DEM de mayor resolución (5-10 m).

- » **Limitaciones del FABDEM:** El MDT FABDEM, aunque validado como el mejor DEM global disponible (Hawker et al., 2022; Meadows et al., 2024), presenta mayores errores en zonas de pendiente muy baja (<0.5%) y en áreas costeras donde la corrección de edificaciones puede introducir sesgos. En zonas montañosas (Sierra Maestra) con pendientes >35°, los errores verticales aumentan significativamente.
- » **No captura inundación pluvial urbana:** El modelo está diseñado para inundación fluvial en llanuras aluviales. La inundación por drenaje insuficiente en zonas urbanas (pluvial) requiere modelos hidrodinámicos 2D con datos de red de alcantarillado y superficies impermeables.
- » **Ausencia de probabilidad:** El producto no cuantifica la frecuencia de ocurrencia ni la profundidad/velocidad de inundación para eventos específicos. Para análisis de riesgo completo se requiere integración con modelos hidrometeorológicos e hidráulicos.
- » **Validación con eventos limitados:** Aunque la coincidencia espacial es robusta para los eventos validados, la muestra de eventos extremos disponibles para validación SAR está limitada por la disponibilidad de imágenes y la cobertura temporal del estudio.

4.3. Implicaciones para la gestión del riesgo

La estrategia de validación dual (terreno + SAR) permitió verificar la exactitud del modelo tanto en áreas accesibles como en zonas remotas. La coincidencia espacial observada entre las áreas inundadas detectadas por satélite y las zonas modeladas como potencialmente inundables confirma la robustez del enfoque hidromorfométrico para identificar la envolvente máxima de inundabilidad.

Desde la perspectiva de la toma de decisiones, el mapa resultado del mosaico ráster con las zonas potenciales a la inundación fluvial, ofrece tres funciones específicas: (1) priorizar áreas donde la inversión en infraestructura de mitigación (sistemas de drenaje, reservorios de laminación, obras de encauzamiento) resulta más efectiva; (2) orientar la zonificación de usos del suelo, restringiendo asentamientos humanos, instalaciones críticas y actividades económicas de alto riesgo en sectores clasificados como alta y muy alta susceptibilidad; y (3) fundamentar la elaboración de planes de reducción de riesgos de desastres y protocolos de evacuación, al predefinir las áreas de mayor potencialidad de activación del escenario ante eventos hidrometeorológicos extremos. En consecuencia, el producto no constituye por

sí mismo una decisión de gestión, sino una base objetiva y reproducible que reduce la incertidumbre en los procesos de planificación territorial y gestión del riesgo.

El mosaico ráster de zonas potencialmente inundables (figura 10), constituye un insumo cartográfico de referencia para la planificación del ordenamiento territorial y la gestión integral del riesgo de desastres, dado que permite identificar, de manera prospectiva, las zonas donde la configuración del relieve, la morfología del sistema de drenaje y la conectividad hidráulica superficial generan condiciones estructurantes que predisponen al territorio a la acumulación y retención del flujo hídrico. Dichas condiciones permanecen inalterables ante la variabilidad de los eventos meteorológicos extremos que eventualmente activan el escenario, lo cual confiere al producto una utilidad operativa independiente de la intensidad de precipitación registrada en un momento determinado.

Es fundamental que los gestores del riesgo comprendan que este mapa identifica la "capacidad" del territorio para albergar inundaciones, no la "probabilidad" de que ocurran en un período dado. La utilidad operativa radica en: (a) identificar zonas donde cualquier desarrollo debe incorporar infraestructura de drenaje robusta; (b) priorizar zonas para evacuación preventiva ante alertas de eventos hidrometeorológicos extremos; y (c) prohibir o restringir asentamientos críticos en zonas de "Muy Alta" susceptibilidad.

Conclusiones

1. Se logró la delimitación de zonas potencialmente inundables para la totalidad del territorio cubano mediante el empleo exclusivamente de atributos hidromorfométricos del relieve.
2. La metodología propuesta, fundamentada en indicadores hidromorfométricos (MCA-TWI) derivados del MDT FABDEM y procesada en SAGA-GIS, constituye una herramienta reproducible, escalable y de bajo costo computacional para la zonificación del peligro potencial por inundación fluvial en contextos tropicales insulares con limitaciones de datos hidrometeorológicos de alta resolución.
3. El producto cartográfico obtenido con resolución espacial de 30 m y clasificación en cinco niveles de susceptibilidad, identifica las áreas donde la topografía, la morfología del sistema de drenaje y la conectividad hidráulica superficial generan condiciones estructurantes favorables a la acumulación y retención del flujo hídrico,

permitiendo que surjan inundaciones ante la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos de carácter extremo.

4. Los escenarios geomorfológicos de peligro potencial de inundación fluvial derivados de esta investigación constituyen un insumo cartográfico de referencia para la toma de decisiones en materia de ordenamiento territorial y gestión integral del riesgo de desastres en Cuba.

Este trabajo representa una etapa de investigación orientada a la identificación de escenarios geomorfológicos de máxima inundabilidad. Etapas futuras de la investigación incorporarán: (a) análisis de activación progresiva del escenario mediante eventos de diferente magnitud; (b) integración con datos hidrometeorológicos para modelación hidrodinámica; y (c) análisis de incertidumbre espacial asociada al MDT y a los indicadores empleados.

Bibliografía

- Albano, R., Samela, C., Crăciun, I., Manfreda, S., Adamowski, J., Sole, A., & Ozunu, A. (2020). Large scale flood risk mapping in data scarce environments: An application for Romania. *Water*, 12(6), 1834.
- Bates, P. D., & De Roo, A. P. J. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology*, 236(1-2), 54-77.
- Bates, P. D., et al. (2021). A climate-conditioned catastrophe risk model for UK flooding. *Nature Climate Change*, 11(10), 843-850.
- Bates, P. D., et al. (2023). Combined fluvial, pluvial and coastal flood hazard mapping for the UK. *Natural Hazards*, 115(1), 1-22.
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43-69.
- Böhner, J., Koethe, R., Conrad, O., Gross, J., Ringeler, A., & Selige, T. (2002). Soil Regionalisation by Means of Terrain Analysis and Process Parameterisation. En: Micheli, E., Nachtergaele, F., Montanarella, L. (Eds.). *Soil Classification 2001*. European Soil Bureau, Research Report No. 7, EUR 20398 EN, Luxemburgo.
- Böhner, J., & Selige, T. (2006). Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. En: Böhner, J., McCloy, K. R., Strobl, J. (Eds.). *SAGA - Analysis and Modelling Applications*. Goettinger Geographische Abhandlungen, Gotinga.
- C. McSweeney, M. New, G. Lizcano. 2010b. The UNDP Climate Change Country Profiles: Cuba Caribbean Regional Climate Centre (s.f.). Country Profile: Cuba.
- Castillo García, A., et al. (2022). Sustainable urban drainage systems in Cuba: challenges and opportunities. *Revista de Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 43(2), 45-58.
- Chávez López, S., & Navarro Mendoza, A. (2018). Geomorfología como factor de riesgo a inundaciones. *Revista Digital de Divulgación Científica*, 4(2), 38-48. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR).
- CITMA (2023). Datos geográficos de Cuba. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, República de Cuba.
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., & Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 8, 1991-2007.
- Díaz Díaz, J. L., & Lilienberg, D. A. (1989). Nuevos datos sobre los movimientos tectónicos recientes en Cuba Occidental. *Reporte de Investigación*, Instituto de Geografía, núm. 4, 11. La Habana.
- Pham, B.T., Jaafari, A., Phong, T.V., Yen, H.P.H., Tuyen, T.T., Luong, V.V., Nguyen, H.D., Le, H.V., & Foong, L.K. (2021). "Improved flood susceptibility mapping using a best first decision tree integrated with ensemble learning techniques". *Geoscience Frontiers*, 12(3), 101105. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.11.003>
- Feizbahr, M., Brake, N., Arbabkhah, H., Hariri Asli, H., & Woods, K. (2025). Flood susceptibility mapping using machine learning and geospatial-Sentinel-1 SAR integration for enhanced early warning systems. *Remote Sensing*, 17(20), 3471. <https://doi.org/10.3390/rs17203471>
- Felícísimo, Á. M. (1994). Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. Oviedo: Pentalfa Ediciones.

- García Rivero, A. E., & Olivera Acosta, J. (2017). Use of Hydrogeomorphic Indexes in SAGA-GIS for the Characterization of Flooded Areas in Madre de Dios, Peru. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(19), 8912-8920.
- Gharakhanlou, N., & Perez, L. (2023). "Flood susceptible prediction through the use of geospatial variables and machine learning methods". *Journal of Hydrology*, 617, 129121. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129121>
- Gruber, S., & Peckham, S. (2009). Land-surface parameters and objects in hydrology. En: Hengl, T., & Reuter, H. I. (Eds.). *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*, Vol. 33. Elsevier.
- Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., et al. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed (FABDEM). *Scientific Data*, 9, 623.
- Hawker, L., et al. (2023). Comparing new global DEMs for flood modeling. *Journal of Hydrology*, 617, 129034.
- Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C., & Neal, J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 17(2), 024016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>
- Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C., & Neal, J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed (FABDEM). *Scientific Data*, 9, 623. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01639-9>
- INSMET (2023). Atlas climático de Cuba. La Habana. Instituto de Meteorología de Cuba.
- IPCC AR5 (Quinto Informe de Evaluación, Glosario de términos 2013-2014)
- IPCC AR6 (Sexto Informe de Evaluación, Glosario de términos 2021-2023)
- IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report*. Cambridge University Press.
- IPCC (2022) *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report*. Cambridge University Press.
- Iturralde-Vinent, M. (1978). Los movimientos tectónicos de la etapa de desarrollo platafórmico de Cuba. *Geologie en Mijnbouw*, 57(2), 121-130.
- Iturralde-Vinent, M. (1998). Sinopsis de la Constitución Geológica de Cuba. *Acta Geológica Hispánica*, 33(1-4), 9-56.
- Iturralde-Vinent, M. (2003). Ensayo sobre la paleogeografía del Cuaternario de Cuba. La Habana.
- Lilienberg, D. A. (1973). Algunos problemas de la formación del relieve del archipiélago cubano. *Serie Espeleológica y Carsológica*, 48.
- Manfreda, S. (2021). Flood mapping – HydroLAB [Repositorio de investigación]. <https://www.salvatoremanfreda.it/index.php/flood-mapping/>
- Marsh, C. B., et al. (2023). DEM comparison for flood modeling in data-scarce regions. *Water Resources Research*, 59(4), e2022WR033456.
- Meadows, M. E., et al. (2024). Validation of FABDEM in diverse geomorphological contexts. *Earth Surface Processes and Landforms*, 49(3), 712-728.
- Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., et al. (2008). Stationarity is dead: Whither water management? *Science*, 319(5863), 573-574.
- Moore, R. J., et al. (1988). Terrain analysis and hydrological modeling. *Journal of Hydrology*, 100(1-3), 1-20.
- McCall et al. (2025) Study provides new forecasts of remote islands' vulnerability to sea level rise. University of Plymouth / EurekAlert.
- Neal, J., et al. (2021). Estimating river channel bathymetry from water level observations. *Water Resources Research*, 57(8), e2021WR030093.
- Nikolaus, G. (2025). Flood vulnerability in Punjab, Pakistan: A geospatial analysis and cartographic approach. Master Thesis, University of Twente / ITC.
- Olaya, V. (2004). *Hidrología computacional y modelos digitales del terreno*. Madrid: Ediciones Mundiprensa. (2ª ed. 2014).
- Planchon, O., & Darboux, F. (2001). A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. *Catena*, 46, 159-176.
- Pérez-de los Reyes, E., et al. (2006). Las inundaciones costeras en Cuba. Sistema nacional de alerta de eventos naturales extremos en la zona costera.

- Publicaciones Red UTEEDA-CYTED. Editora UNAH. La Habana.
- Sánchez, J., & Batista, J. (2005). Estudio sobre vulnerabilidad a inundaciones según altura sobre el nivel del mar. Citado en: Chávez López, S., & Navarro Mendoza, A. (2018).
- Samuel, J., et al. (2024). A 30 m Global Flood Inundation Model for Any Climate Scenario. *Water Resources Research*, 60(8), e2023WR036460.
- Samela, C., Albano, C.M., Sole, A., & Manfreda, S. (2022). Real-time coastal flood hazard assessment using DEM-based hydrogeomorphic classifiers. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22, 1419-1439. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1419-2022>
- Saha, A., et al. (2026). Flood susceptibility assessment using three machine learning techniques and comparison of their performance. *Scientific Reports*, 16, 38391. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-38391-0>
- WMO & UNESCO. (2012). International Glossary of Hydrology (WMO-No. 385). World Meteorological Organization and United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses financieros o personales que puedan haber influido en el trabajo reportado en este artículo.

Contribución de autores: **Conceptualización:** Jorge Olivera Acosta, Sergio Lorenzo Sánchez, Claudia Cruz Lorenzo. **Curaduría de datos:** Jorge Olivera Acosta, Eric Avila Rojas, Leyani Izquierdo Barrera. **Análisis formal:** Jorge Olivera Acosta, Sergio Lorenzo, Eric Avila Rojas. **Investigación:** Claudia Cruz Lorenzo, Eric Avila Rojas, Leyani Izquierdo Barrera. **Metodología:** Jorge Olivera Acosta, Sergio Lorenzo Sánchez, Claudia Cruz Lorenzo. **Administración del proyecto:** Sergio Lorenzo Sánchez. **Software - geoprocésamiento:** Jorge Olivera Acosta, Sergio Lorenzo Sánchez. **Supervisión:** Claudia Cruz Lorenzo, Jorge Olivera Acosta, Sergio Lorenzo Sánchez. **Validación:** Jorge Olivera Acosta, Claudia Cruz Lorenzo. **Visualización:** Sergio Lorenzo Sánchez, Claudia Cruz Lorenzo, Jorge Olivera Acosta. **Redacción (borrador original):** Jorge Olivera Acosta. Redacción (revisión y edición): Sergio Lorenzo Sánchez, Claudia Cruz Lorenzo, Leyani Izquierdo Barrera.