Cartografía de las inundaciones provocadas por el huracán Melissa en el tramo medio-bajo del río Cauto mediante imágenes SAR Sentinel-1

Flood Mapping Caused by Hurricane Melissa in the Middle-Lower Section of the Cauto River Using Sentinel-1 SAR Imagery

Rafael Alejandro Arias La O raarias@geologia.ismm.edu.cu (1)
https://orcid.org/0000-0009-2072-840X
Dioelis Rafael Guerra Santiesteban *guerradioelis@gmail.com (1)
https://orcid.org/0000-0001-8168-0658
José Antonio Alayo Llorén jalayo@ismm.edu.cu (1)
https://orcid.org/0000-0001-8372-7085

(1) Universidad de Moa, Moa, Cuba
*Autor para la correspondencia

Resumen: El presente estudio tuvo como objetivo cartografiar las inundaciones y los cambios morfológicos inducidos temporalmente por el huracán Melissa mediante el procesamiento de imágenes SAR Sentinel-1 en un entorno de teledetección y sistemas de información geográfica. Se analizó un área comprendida entre los municipios Río Cauto, Yara, Bayamo y Cauto Cristo (provincia Granma). Se utilizaron dos imágenes Sentinel-1A (pre-evento, y post-evento) procesadas con el software SNAP. Se generó un compuesto de falso color, aplicándose clasificaciones supervisada (Random Forest) y no supervisada, y se delimitaron las áreas inundadas mediante umbral de -15 dB en la banda VV. El procesamiento final se realizó en QGIS. Los resultados indicaron que las aguas superficiales aumentaron de 34,474 km² (3,23 %) antes del huracán a 107,333 km² (10,07 %) después del evento. Las áreas inundadas específicamente por Melissa alcanzaron 72,859 km², equivalentes al 6,84 % del área de estudio. Las principales afectaciones se concentraron en meandros abandonados, paleocauces y zonas de cultivo de arroz, mientras que la ciudad de Río Cauto y las inmediaciones de la presa Tasajera registraron impactos mínimos. Se concluye que la integración de imágenes Sentinel-1 con herramientas de código abierto (SNAP-QGIS) constituye una metodología eficiente, precisa y de bajo costo para la evaluación rápida de inundaciones en contextos tropicales.

Palabras clave: inundación, amenaza natural, gestión de riesgos

Abstract: This study aims to map floods and temporarily induced morphological changes caused by Hurricane Melissa through the processing of Sentinel-1 SAR imagery in a

remote sensing and geographic information system environment. The analyzed area encompassed the municipalities of Río Cauto, Yara, Bayamo, and Cauto Cristo (Granma Province). Two Sentinel-1A images (pre-event and post-event) were processed using SNAP software. A false-color composite was generated, applying supervised (Random Forest) and unsupervised classifications, and flooded areas were delineated using a -15 dB threshold in the VV band. Final processing was carried out in QGIS. Results showed that surface waters increased from 34.474 km² (3.23 %) before the hurricane to 107.333 km² (10.07 %) after the event. Flooded areas specifically attributable to Melissa reached 72.859 km², equivalent to 6.84% of the study area. The main impacts were concentrated in abandoned meanders, paleo channels, and rice cultivation zones, while the city of Río Cauto and the surroundings of the Tasajera dam recorded minimal impacts. The results reveal that the integration of Sentinel-1 imagery with open-source tools (SNAP-QGIS) represents an efficient, accurate, and low-cost methodology for rapid flood assessment in tropical contexts.

Keywords: floods, natural hazards, risk management

1. Introducción

El cambio climático ha incrementado la frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos, siendo las inundaciones una de las amenazas más devastadoras para las comunidades ribereñas del Caribe (Cred, 2020; Sandoval-Díaz *et al.,* 2023; Donatti *et al.,* 2024; Suazo-Muñoz *et al.,* 2025; Galbán & Pérez, 2026). En este contexto, los huracanes tropicales generan no solo pérdidas económicas y daños a infraestructuras, sino también alteraciones profundas en la dinámica fluvial, como erosión de márgenes, sedimentación y migración lateral de cauces (Ibarra & Rodríguez, 2023; Blanco & Salvia, 2024; Wohl *et al.,* 2024; Ollero, 2025).

Cuba, por su posición geográfica en el archipiélago antillano, es afectada recurrentemente por ciclones tropicales (Pérez Rodríguez *et al.,* 2024; Ramos, 2025; Ruiz-Siles, 2025). Entre 1851 y 2023 se han registrado más de 160 eventos ciclónicos con afectación directa al territorio nacional (Cruz Torres *et al.,* 2025).

A pesar de que el Estado Cubano ha desarrollado un sistema de defensa civil reconocido internacionalmente, los daños materiales y ambientales derivados de huracanes intensos siguen representando un desafío significativo, particularmente en la cuenca del río Cauto, la más extensa del país (8.928 km²). Esta cuenca, por su topografía llana, suelos aluviales y la convergencia de escurrimientos de la Sierra Maestra, ha sido

históricamente una de las más afectadas por inundaciones (Ramón Puebla *et al.,* 2011; Sánchez *et al.,* 2013). Sin embargo, estudios previos en Cuba han utilizado fundamentalmente datos de estaciones hidrométricas y fotografías aéreas, presentando limitaciones en la cuantificación espacial de las inundaciones debido a la persistente nubosidad tropical que impide el uso óptimo de sensores ópticos. El huracán Melissa, ocurrido en octubre de 2025, constituye uno de los eventos ciclónicos más intensos de las últimas décadas en el oriente cubano, con precipitaciones acumuladas superiores a 600 mm en 48 horas y caudales de hasta 1.200 m^3/s en el río Cauto. No obstante, las evaluaciones realizadas hasta el momento han sido fundamentalmente cualitativas y no han cuantificado con precisión la extensión espacial de las inundaciones ni los cambios morfológicos inducidos en el cauce. Esta carencia de estudios integrales y cuantitativos limita la efectividad de las estrategias de mitigación y la zonificación de riesgos en una de las cuencas más vulnerables del país.

El uso de imágenes satelitales, y en particular de las misiones Sentinel del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea, ha revolucionado la capacidad de monitorear y evaluar desastres naturales a escala global (Ab-Rahman *et al.,* 2023; Santana-Castro *et al.,* 2025; Pech-May *et al.,* 2025). La combinación de sensores ópticos (Sentinel-2) y de radar de apertura sintética (Sentinel-1) permite superar la limitación de la nubosidad, ya que el radar opera en todas las condiciones meteorológicas y de iluminación. Numerosos estudios han demostrado la alta precisión de estas imágenes para la delimitación de cuerpos de agua y la detección de cambios morfológicos en cauces fluviales (Sánchez Hernández *et al.,* 2021; Sevillano Rodríguez *et al.,* 2020; Blanco & Salvia, 2024). Tiampo *et al.* (2022) alcanzaron precisiones superiores al 90 % en la cartografía de inundaciones del huracán Harvey utilizando Sentinel-1, mientras que Konapala *et al.* (2021) obtuvieron valores F1-score superiores a 0,90 mediante la fusión de Sentinel-1 y Sentinel-2. La calidad de la información generada a partir de estas fuentes satelitales ha sido ampliamente validada, lo que justifica su aplicación en el contexto cubano. Además, el *software* de libre distribución SNAP (*Sentinel Application Platform*), desarrollado por la Agencia Espacial Europea, proporciona un entorno intuitivo y potente para el preprocesamiento (corrección atmosférica con Sen2Cor, remuestreo de bandas, filtrado de ruido *speckle*) y la clasificación supervisada de imágenes Sentinel, alcanzando exactitudes globales superiores al 86 % en la clasificación de coberturas (Casella *et al.,* 2018; Fragoso-Campón & Quirós, 2019). La integración de SNAP con sistemas de información geográfica (SIG) permite analizar y visualizar la información

geoespacial de manera eficiente, generando mapas de vulnerabilidad y riesgo que integran múltiples factores (Burrough & McDonnell, 2015).

La integración de dichas imágenes, procesadas con SNAP y analizadas en un entorno SIG, permitirá cuantificar con precisión la extensión de las inundaciones y los principales cambios morfológicos, identificando factores de vulnerabilidad geo-ambiental y proponiendo medidas de mitigación basadas en soluciones naturales.

El objetivo de este trabajo es analizar el impacto geo-ambiental del huracán Melissa en la dinámica fluvial y las áreas inundadas del río Cauto mediante dicha integración, con el fin de cuantificar los cambios morfológicos del cauce y la extensión de las inundaciones, identificar factores de vulnerabilidad que permitan proponer medidas de mitigación en las zonas de mayor riesgo. Este estudio llena una brecha científica inmediata y establece un marco metodológico replicable para la gestión de riesgos geo-ambientales en otras cuencas vulnerables del Caribe, contribuyendo a la resiliencia territorial frente al cambio climático, además de aplicar un procedimiento asequible y de bajo costo para la evaluación rápida de desastres en Cuba y el Caribe, generar cartografía de riesgo geo-ambiental actualizada para una de las cuencas más vulnerables del país y ofrecer recomendaciones concretas para la zonificación de riesgos y la planificación territorial futura, particularmente en la protección de paleocauces y el ordenamiento de actividades productivas en zonas bajas.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

Para desarrollar el análisis comparativo se escogió un área de 1065 km^2 comprendidos entre los municipios granmenses de Río Cauto, Yara, Bayamo y Cauto Cristo (Figura 1). Se seleccionó esta área por incluir estructuras antrópicas destacadas: la ciudad de Río Cauto, los asentamientos poblacionales Cauto Embarcadero y Guamo Embarcadero, la presa Tasajera y la Camaronera Calisur zonas importantes desde la perspectiva social y económica incluidas dentro del área cubierta por las imágenes satelitales a procesar.

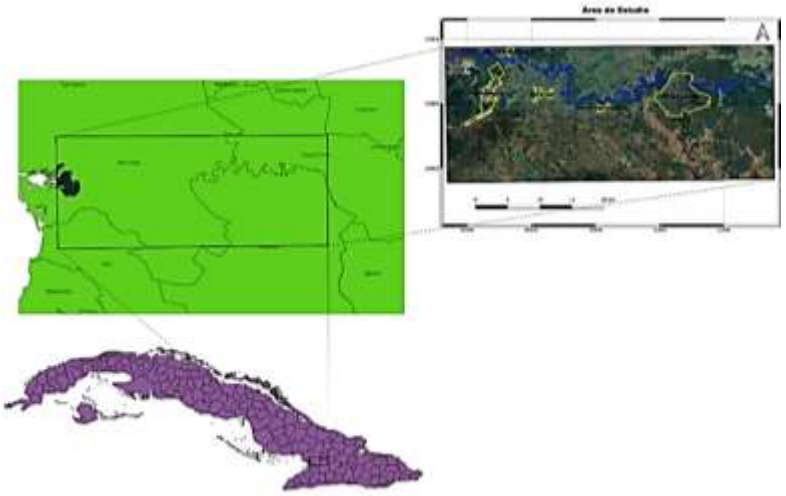


Figura 1. Esquema de ubicación geográfica del área de estudio.

La investigación determina las zonas inundadas tras el paso del huracán Melissa. Para ello, fueron empleadas imágenes de Sentinel 1, eficientes para los análisis comparativos de zonas cubiertas por aguas. La metodología empleada se basó en la descarga y procesamiento de una imagen anterior y una posterior al paso del fenómeno meteorológico, lo cual ofrece una perspectiva de las áreas cubiertas por agua identificables con las imágenes satelitales. Es necesario aclarar que mediante el análisis de imágenes satelitales no es posible definir con total exactitud todas las zonas inundadas, pues existen áreas inundadas donde las aguas no pueden ser detectar por el satélite (inundaciones parciales edificaciones y otros).

El huracán Melissa afectó la zona del área de estudio entre los días 28 y 31 de octubre de 2025. Por lo tanto, fueron empleadas imágenes de los días 27 de octubre (antes) y 2 de noviembre (después), para realizar la comparación de las mismas. Se tomaron estas fechas por ser las más cercanas al paso del huracán. Antes del huracán las condiciones hídricas en la región pueden ser consideradas como normales para el periodo del año. No es conveniente emplear imágenes de días posteriores, pues las aguas superficiales están escurriendo y disminuyen gradualmente las zonas inundadas.

2.2. Imágenes satelitales y software utilizado

Se utilizaron imágenes de radar de apertura sintética (SAR) del sensor Sentinel-1A en modo *Interferometric Wide swath* (IW), producto *Ground Range Detected* (GRD), polarizaciones VV y VH. Se seleccionaron dos escenas:

- Imagen pre-evento: 27 de octubre de 2025. (S1A_IW_GRDH_1SDV_20251027T110342_20251027T110407_061610_07B233_99BF)
- Imagen post-evento: 2 de noviembre de 2025 (S1A_IW_GRDH_1SDV_20260107T110336_20260107T110401_062660_07DB12_CF41)

Ambas imágenes fueron descargadas desde la plataforma Sentinel Hub. (https://browser.dataspace.copernicus.eu/). El preprocesamiento, calibración y clasificación se realizaron con el software SNAP (versión 10.0 de la Agencia Espacial Europea (ESA). El análisis espacial posterior, la generación de máscaras y la cartografía final se efectuaron en QGIS 3.34.

2.3. Preprocesamiento de las imágenes

En SNAP se aplicó el siguiente flujo de procesamiento elaborado para el estudio con las correcciones necesarias para la obtención de datos confiables:

1. Corte de la escena al área de interés.
2. Calibración radiométrica (calibración a valores de retrodispersión σ^0).
3. Remoción de ruido speckle mediante filtro de Lee (5×5).
4. Corrección geométrica (Range-Doppler terrain correction) con el modelo digital de elevación SRTM 1 arc-second.
5. Conversión de valores lineales a decibeles (dB).
6. Corrección de Ruidos Térmicos (para reducir discontinuidades entre subfranjas para escenas de múltiples franjas).
7. Generación de un stack multibanda con las polarizaciones VV y VH de las dos fechas.
8. Exportación de las imágenes corregidas en formato GeoTIFF para su análisis en QGIS (Los mapas y esquemas fueron elaborados con proyección UTM zona 17N [WGS 84]).

2.4. Métodos empleados para la delimitación de áreas inundadas

2.4.1 Análisis de Falso Color

Se confeccionó un mapa de falso color, donde se combinan las bandas VV del 27 de octubre para el rojo y VV del 2 de noviembre para el verde y azul. Esta combinación permite visualizar en color rojo las zonas donde los valores de decibelios son altos para el 27 de octubre y bajos para el 2 de noviembre (Figura 2). Se mantienen en color oscuro las zonas donde en ambos casos los valores son bajos, mientras los colores verdosos se vinculan a las zonas donde los valores son más altos para la imagen del 2 de noviembre

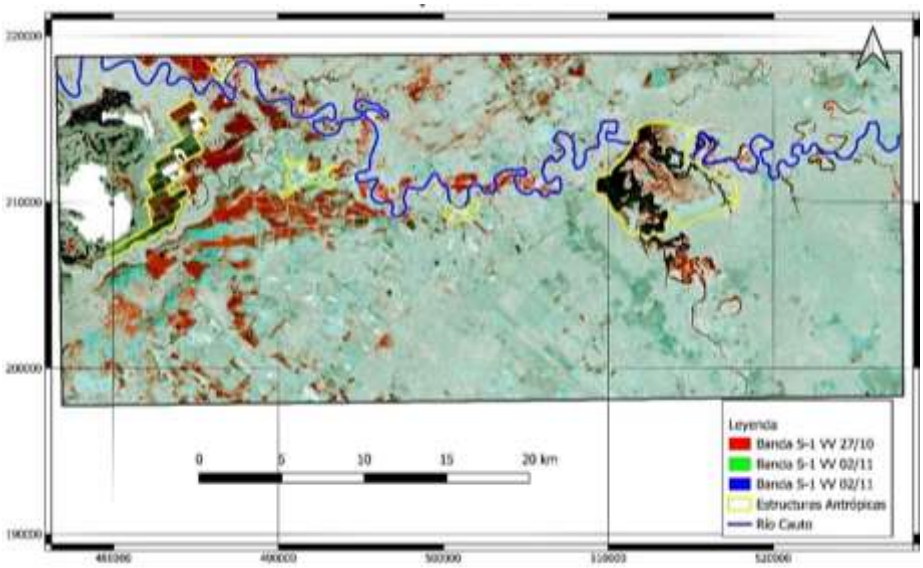


Figura 2. Mapa de Falso Color con bandas antes y después del paso del huracán Melissa.

2.4.2. Clasificaciones Supervisadas y No Supervisadas

Con la creación de un paquete de bandas (se combinan las imágenes VV de ambos días para crear una imagen única combinando indistintamente las imágenes en una composición RGB) y la creación de un esquema de falso color fue posible aplicar sobre este paquete de bandas y específicamente sobre la combinación empleada para la creación de la imagen de falso color (R: VV 27 de octubre; G: 2 de noviembre; B: 2 de noviembre) los métodos de Clasificación No Supervisada (k medias, con 5 clases), donde el propio *software* SNAP crea un conjunto de clases diferenciadas, así como una Clasificación Supervisada con el método de *Random Forest* (número de árboles: 10; número de muestras de entrenamiento: 5000), definiendo manualmente algunas zonas como áreas de cultivos, aguas superficiales, infraestructura antrópica, suelos desnudos y zonas con vegetación natural (5 vectores definidos, para igualar la cantidad establecida para la Clasificación No Supervisada, con 10 muestras para cada tipo de vector).

2.4.3. Segmentación por umbrales

Durante el procesamiento en QGIS de las imágenes exportadas desde SNAP se crearon tres máscaras asociadas a las aguas superficiales a partir de las bandas VV, empleadas durante la investigación. La primera máscara contendrá las zonas con aguas superficiales para el 27 de octubre, la segunda tendrá las aguas superficiales para el día 2 de noviembre y la última mostrará la diferencia entre las 2 anteriores, por lo tanto, permitirá visualizar por separado las zonas de aguas superficiales normales y las zonas inundadas.

Al procesar imágenes del tipo S-1 VV los rangos de límites oscilan entre -10 dB y -23 dB. Según Sevillano Rodríguez *et al.* (2020); Sánchez Hernández *et al.* (2021) y Blanco & Salvia (2024) el valor límite a emplear depende de múltiples factores y varía mucho entre un grupo de investigadores y otros. Para el análisis específico se escogió como límite el valor -15 dB pues es el que más se ajusta a las áreas señaladas por la Clasificación Supervisada para las zonas con aguas superficiales.

2.4.4. Cuantificación de las áreas inundadas

Mediante las herramientas de cálculo de área del complemento *Zonal Statistics* y *Field Calculator* de QGIS se determinó la extensión de las diferentes categorías. Se emplearon estos métodos para las determinaciones cuantitativas pues la Clasificación No Supervisada no posibilitó una buena diferenciación de las áreas inundadas; a su vez, aunque la Clasificación Supervisada permitió una mejor clasificación, no se contó con una cantidad de zonas de muestras abundantes, ni con mejor claridad de definición de las mismas, por lo tanto, el margen de error es mayor al centrar el procedimiento con la segmentación por umbrales.

3. Análisis de los resultados

3.1. Análisis de falso color y clasificación

La figura 3 muestra un acercamiento en la combinación de falso color descrita, para las zonas de la presa Tasajeras y la ciudad de Río Cauto junto a la Camaronera. Resaltado en color rojo se observan las zonas vinculadas con aguas superficiales posteriores al paso del huracán Melissa por la zona.

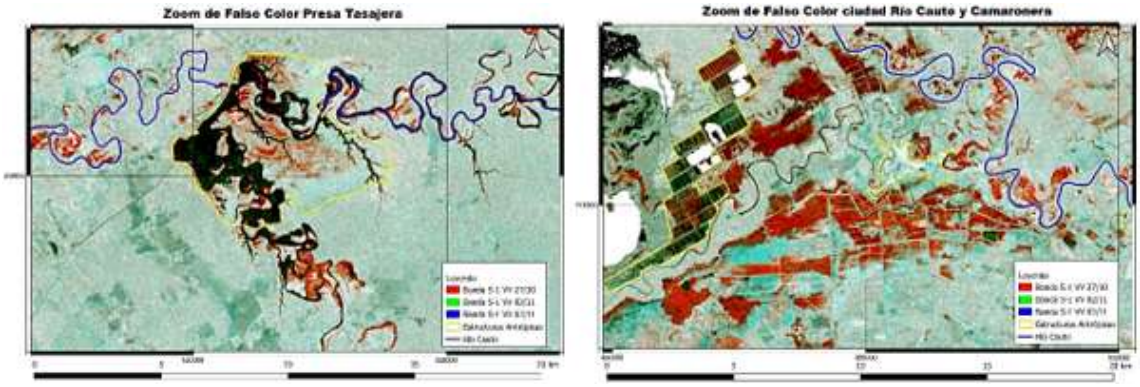


Figura 3. Zoom del Falso Color para zonas de la presa Tasajeras y la ciudad de Río Cauto.

La figura 4 muestra los resultados obtenidos de la Clasificación Supervisada más detallados que los generados por la Clasificación No Supervisada. A pesar de que la Clasificación No Supervisada (figura 4c) genera una clase que incluye las posibles zonas de aguas superficiales, la Clasificación Supervisada genera una división de clases dentro de las propias aguas superficiales (figura 4d), delimitando valores más bajos, con una superficie más lisa, de otras posibles aguas superficiales con valores bajos, pero más elevados que los mencionados, posiblemente asociados a aguas con una superficie de dispersión menos lisa, probablemente vinculadas a aguas de escurrimiento aun activas días después del paso del huracán.

En la Figura 4 se muestra una zona de inundación en el área de un antiguo meandro abandono del río Cauto, seco antes del paso del ciclón (figura 4a), con acumulación de agua luego del huracán (figura 4b). También se observa la diferenciación entre la Clasificación No Supervisada (figura 4c) donde se muestran en color rojo las zonas de aguas superficiales; mientras la Clasificación Supervisada (figura 4d) muestra una diferenciación entre aguas superficiales de color azul y otras zonas asociadas a estas aguas posiblemente de escurrimiento, pero con características y comportamientos diferentes (color rojo), debido también a la poca profundidad de estas aguas.

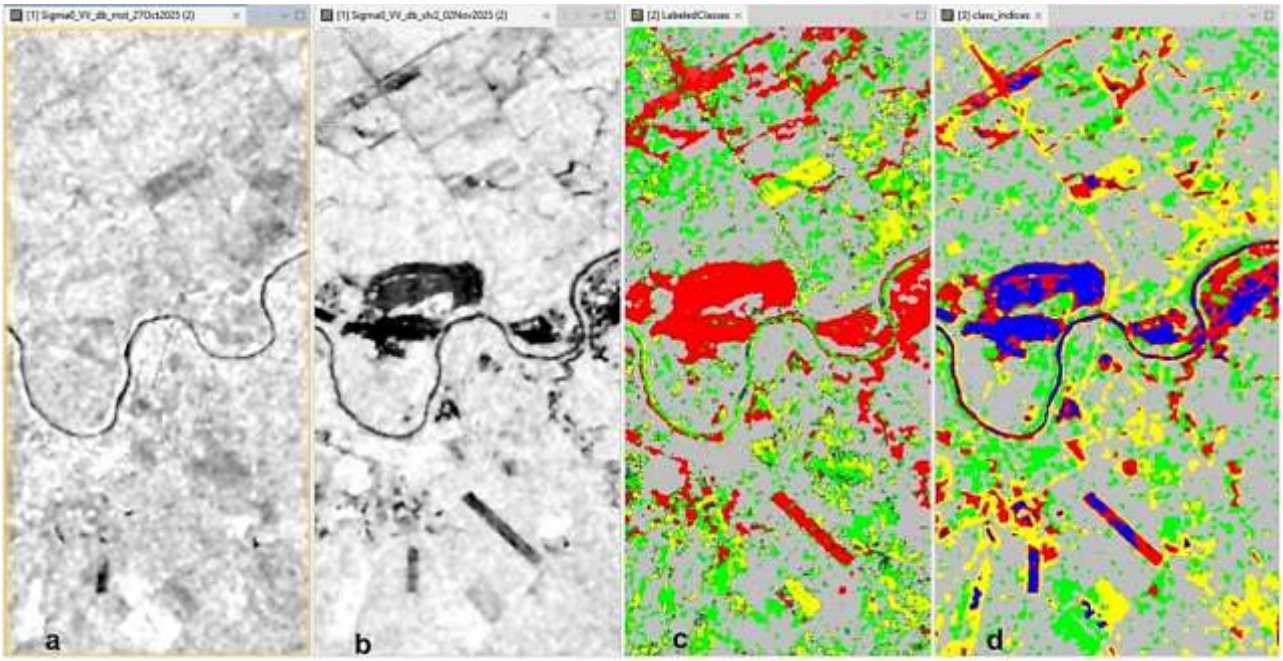


Figura 4. Comparación de imágenes en SNAP con las clasificaciones para un meandro abandonado. a) Antes del paso del huracán (VV 27 de octubre). b) Después del paso del huracán (VV 2 de noviembre). c) Clasificación No Supervisada. d) Clasificación Supervisada.

La figura 5 muestra un análisis para zonas alrededor de la presa Tasajera. Se visualizan las áreas con aguas superficiales antes del paso del huracán (figura 5a), áreas con aguas superficiales después del paso del huracán (figura 5b), así como la imagen de Clasificación No Supervisada (figura 5c) y Clasificación Supervisada con *Random Forest* (figura 5d).

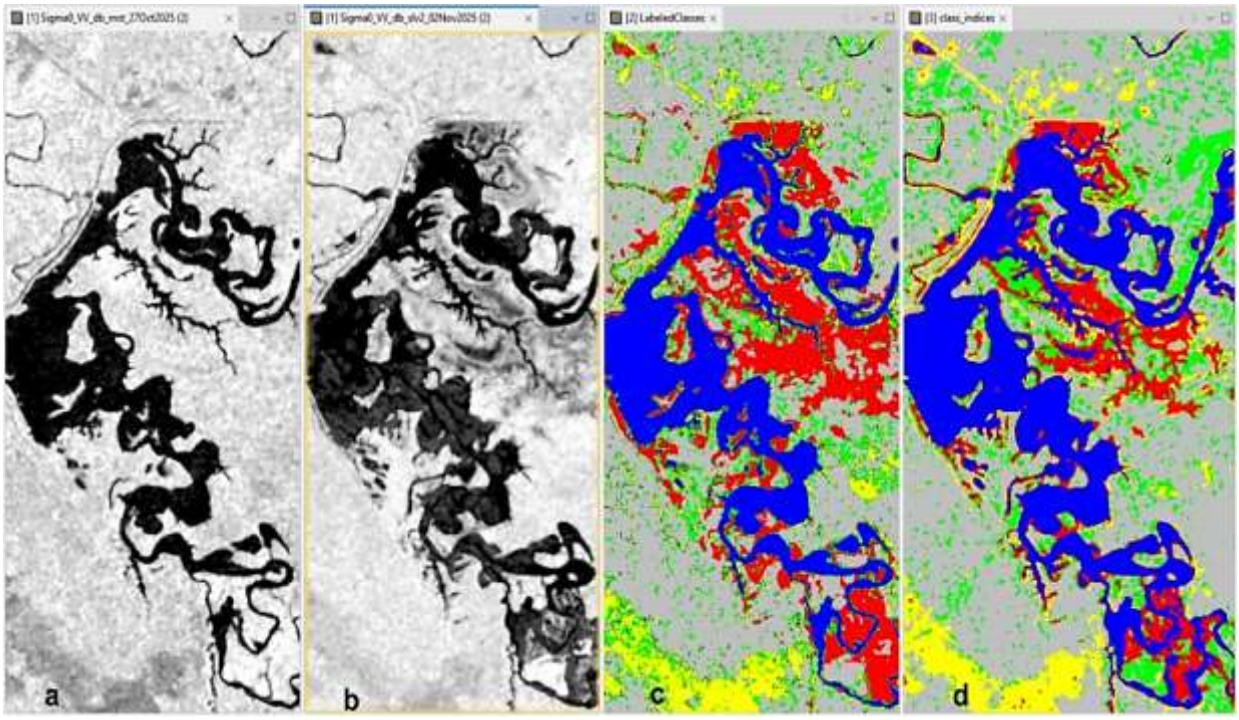


Figura 5. Comparación de imágenes en SNAP con las clasificaciones para la presa Tasajera. a) Antes del paso del huracán (VV 27 de octubre). b) Después del paso del huracán (VV 2 de noviembre). c) Clasificación No Supervisada. d) Clasificación Supervisada.

En la figura 5 se destacan las zonas donde la Clasificación No Supervisada solo genera una clase (color rojo), mientras la Clasificación Supervisada si discrimina al menos dos clases diferentes por sus características (colores azul y rojo). En este caso incluso se aprecia como zonas que para la Clasificación No Supervisada, no son áreas con aguas superficiales, para la Clasificación Supervisada si lo son, permitiendo refinar aún más la delimitación de las áreas inundadas.

3.2. Delimitación de áreas inundadas

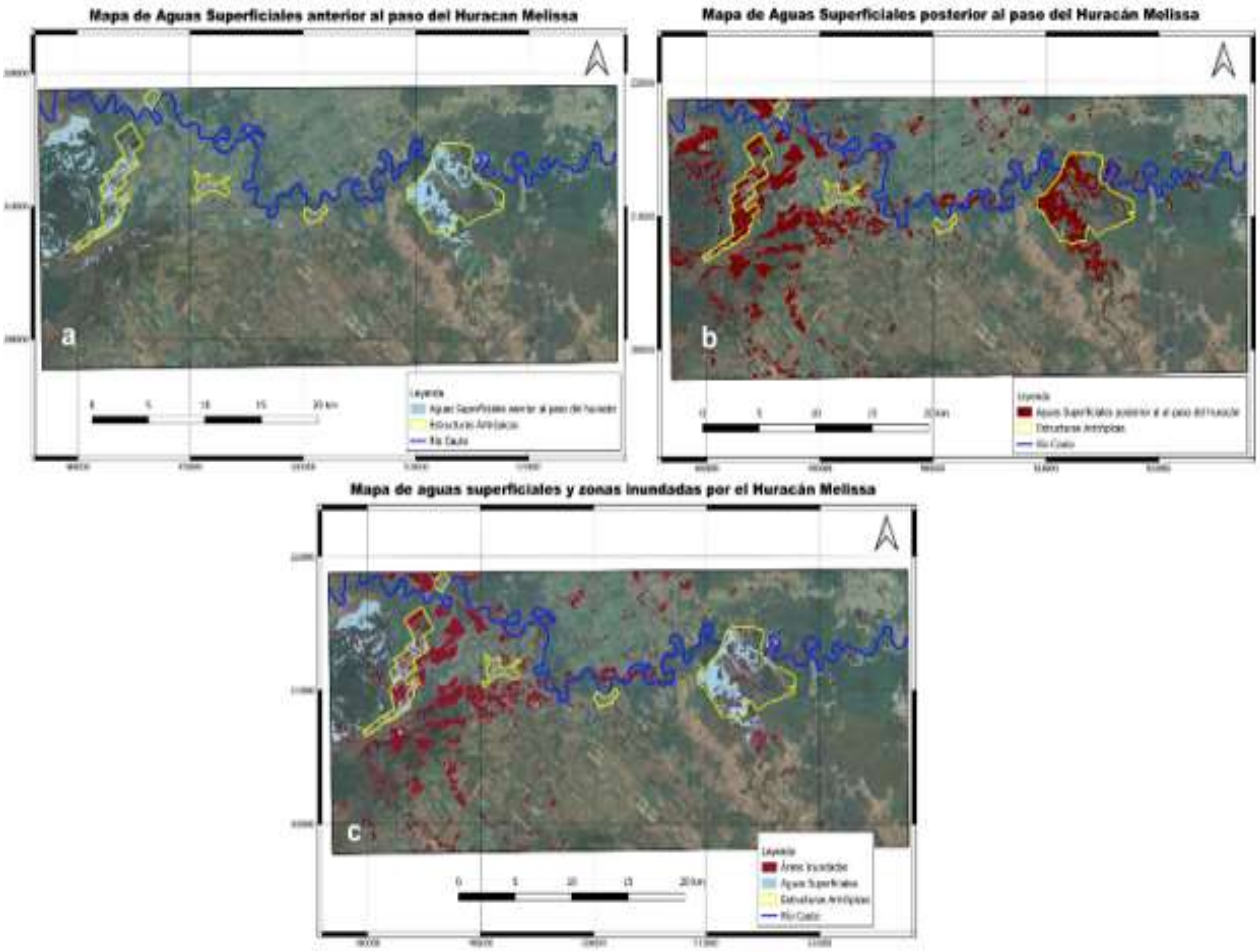


Figura 6. Mapas de aguas superficiales en el área de estudio. a) Aguas superficiales antes del paso del huracán. b) Aguas superficiales después del paso del huracán. c) Aguas superficiales y aguas de inundación.

La figura 6 muestra las zonas donde coinciden las aguas superficiales antes y después del paso del huracán Melissa. Se observan las áreas donde antes no había agua, pero con acumulaciones luego de las intensas lluvias.

La máscara donde se muestras las aguas superficiales y las de inundación fue sometida a una reclasificación, para generar una nueva máscara donde se visualicen únicamente las áreas inundadas por el huracán Melissa (Figura 7).

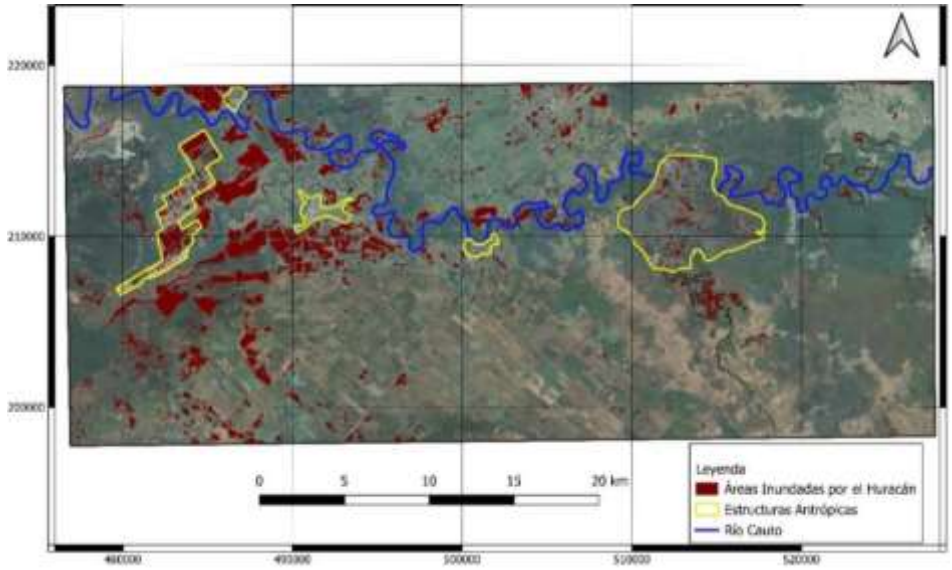


Figura 7. Mapas de áreas inundadas tras el paso del huracán Melissa.

Una vez creado un mapa donde aparecen cartografiadas las áreas inundadas, es posible lograr acercamientos a las zonas de mayor interés, con fin de mostrar las afectaciones más significativas en cuanto a las inundaciones (Figura 8).

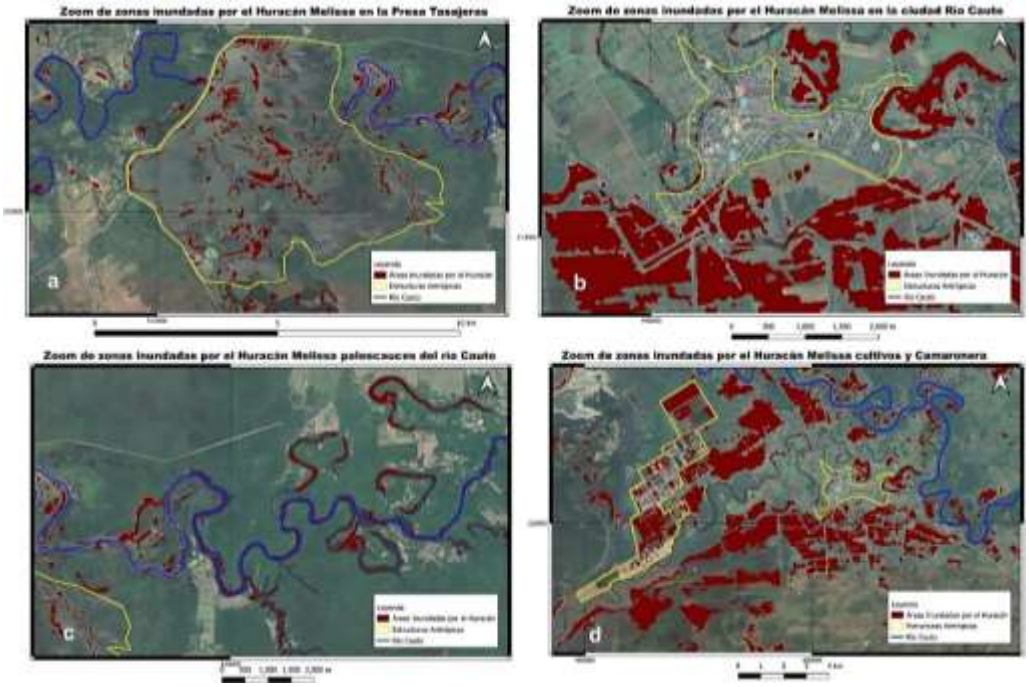


Figura 8. Zoom de las zonas vinculadas con inundaciones. a) Presa Tasajera. b) Ciudad de Río Cauto. c) Meandros abandonados. d) Ciudad, Camaronera Calisur y áreas de cultivo de arroz.

Las inmediaciones de la presa Tasajera no muestran grandes inundaciones (figura 8a), lo cual es una evidencia del correcto trabajo realizado por el personal laborante, los

cuales tenían definidas las cantidades de aguas que la presa podía contener y, por ende, se encontraban preparados para enfrentar el azote del huracán.

La figura 8b muestra cómo la ciudad de Río Cauto, no sufrió demasiados impactos en cuanto a inundaciones asociadas a las intensas lluvias del huracán. Los alrededores de la ciudad sí muestran grandes extensiones de zonas inundadas, esencialmente áreas de cultivos y meandros abandonados del antiguo cauce del río Cauto.

Por su parte, en la figura 8c se observa un área con predominio de meandros abandonados del río Cauto, que volvieron a contener aguas. Sin embargo, las inundaciones no se extendieron demasiado fuera de las áreas de estos antiguos cauces, por ello la sencilla delimitación de las áreas inundadas.

La figura 8d muestra una vista más amplia de las áreas de la ciudad de Río Cauto, la Camaronera Calisur y las áreas de cultivos de arroz al Sur de ambas. Estas áreas de cultivo tienden a ser bajas y en muchas etapas del año están cubiertas de aguas. Por lo tanto, son áreas favorables para las inundaciones, sin que esto sea un impacto demasiado negativo, en dependencia de las etapas en que se encuentre el cultivo. Se nota la acción antrópica en estas zonas que han sido inundadas, donde se evidencia patrones lineales rectos y de áreas regulares en las zonas inundadas, asociados a los límites de los campos de cultivos, además de poder apreciar este fenómeno en las zonas inundadas dentro de la Camaronera. Sin embargo, en la parte central de esta área, así como en la porción Suroccidental asoman áreas más irregulares en las zonas inundadas.

Se debe prestar atención a las áreas cercanas a la Camaronera, zonas más propensas a las inundaciones. Es importante tener cartografiados los meandros abandonados y los paleocauces del río Cauto, pues constituyen zonas inundables. Son aspectos a tener en consideración para proyecciones constructivas a futuro, con vistas de crecimiento de la actividad antrópica en la región.

3.3. Cuantificación de áreas inundadas

Como se muestra en la tabla 1 solo el 6,84 % del área total fue afectada por inundaciones como consecuencia del paso del huracán Melissa.

Tabla 1. Extensión de las aguas superficiales en el área de estudio

Elementos	Área (Km^2)	Porcentaje (%)
Área de estudio	1065.89	100
Aguas superficiales antes del huracán	34.47	3.23
Aguas superficiales después del huracán	107.33	10.07
Aguas de inundación	72.86	6.84

A pesar de las intensas lluvias acompañante de un huracán de esa intensidad, las principales afectaciones socio-económicas declaradas por las autoridades del territorio no estuvieron ligadas directamente con inundaciones, siendo los factores a considerar otros, como los deslizamientos, fuertes vientos y aguas de escurrimiento.

4. Conclusiones

Se demostró la eficacia de la integración de imágenes SAR Sentinel-1, procesadas con el *software* SNAP y analizadas en QGIS, para la evaluación cuantitativa y espacial de las inundaciones provocadas por el huracán Melissa (octubre de 2025) en el tramo medio-bajo del río Cauto. La metodología aplicada permitió superar las limitaciones tradicionales asociadas a la nubosidad tropical y generar información geoespacial de alta confiabilidad en un tiempo reducido.

Se cuantificó que, dentro del área de estudio de 1 065,893 km², las aguas superficiales aumentaron de 34,474 km² (3,23 %) antes del evento a 107,333 km² (10,07 %) después del paso del huracán. Las áreas inundadas específicamente por Melissa alcanzaron 72,859 km², equivalentes al 6,84 % de la superficie total analizada. Estos resultados confirman la hipótesis planteada y validan la utilidad de las imágenes Sentinel-1 para la delimitación precisa de zonas inundadas y la identificación de cambios morfológicos en cauces fluviales.

Las principales afectaciones se concentraron en los meandros abandonados y paleocauces del antiguo río Cauto, así como en las zonas bajas dedicadas al cultivo de arroz y las inmediaciones de la camaronera Calisur. En contraste, la ciudad de Río Cauto y las áreas adyacentes a la presa Tasajera registraron impactos mínimos, lo que evidencia la efectividad de las medidas de gestión hidráulica implementadas en la presa. La clasificación supervisada con *Random Forest* demostró mayor precisión y detalle que la clasificación no supervisada, permitiendo discriminar diferentes tipos de cuerpos de agua y refinar la cartografía de inundación.

Desde el punto de vista geo-ambiental, los resultados ponen de manifiesto la alta vulnerabilidad de los paleocauces y las planicies aluviales de la cuenca del Cauto ante eventos hidrometeorológicos extremos, agravada por el cambio climático. La acción antrópica (patrones rectilíneos de cultivos y camaroneras) modula la distribución de las inundaciones, generando tanto riesgos como oportunidades de manejo.

La integración de teledetección SAR y herramientas de código abierto (SNAP-QGIS) se consolida como una herramienta potente y confiable para la gestión de riesgos geo-ambientales en contextos tropicales. Los resultados obtenidos fortalecen la capacidad de respuesta del país ante el cambio climático y demuestran la relevancia de la Ingeniería Geológica en la construcción de territorios más resilientes.

5. Recomendaciones

Incorporar los mapas de inundación en los planes de ordenamiento territorial y de defensa civil de los municipios involucrados, así como mantener el monitoreo sistemático mediante Sentinel-1 para actualizar la cartografía de riesgos ante futuros eventos.

Implementar sistemas de monitoreo continúo basados en imágenes SAR, que permitan detectar en tiempo real la expansión de áreas inundadas y apoyar la toma de decisiones en situaciones de emergencia, especialmente durante la temporada ciclónica.

Fortalecer la gestión de riesgos en zonas agrícolas, mediante la planificación de cultivos resistentes a inundaciones en las terrazas bajas y paleocauces, y la adopción de prácticas de manejo sostenible en áreas propensas a anegamiento.

Desarrollar planes de contingencia comunitarios, que incluyan protocolos de evacuación y protección de infraestructuras, especialmente en localidades cercanas al río Cauto y a la presa Tasajera, así como en las áreas identificadas como de alta vulnerabilidad.

Actualizar los mapas de peligro por inundación del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos incorporando la cartografía detallada de paleocauces y meandros abandonados (escala 1:25 000 o superior), ya que estos elementos geomorfológicos demostraron ser los primeros en reactivarse durante Melissa.

Evaluar el impacto de los diques y obras hidráulicas existentes sobre la dinámica de inundación, considerando la posibilidad de crear áreas de desbordamiento controlado para reducir la presión sobre el cauce principal en eventos extremos.

Referencias bibliográficas

Ab-Rahman, A.A., Abd-Mojib, N., Adhalysha-Ahli, N., Ab-Latip, A.S., & Mohd-Taib, A. (2023). The capability of SNAP software application to identify landslide using InSAR technique. *Physics and Chemistry of the Earth, 131,* 10347. https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103427

Blanco, A.R., &. Salvia, M.M. (2024). Cartografía comparada de inundaciones con imágenes SAR. Caso Río Santa Lucía. *Boletín Geográfico, 46*, 12-28. https://revele.uncoma.edu.ar/index.php/geografia/article/view/5375

Burrough, P.A., McDonnell, R.A., & Lloyd, C.D. (2015). *Principles of geographical information systems* (3rd ed.). Oxford University Press, Oxford. https://books.google.com.cu/books/about/Principles_of_Geographical_Information_S.html?id=kvoJCAAAQBAJ&redir_esc=y

Casella, A., Barrionuevo, N., Pezzola, A., & Winschel, C. (2018). *Pre-procesamiento de imágenes satelitales del sensor Sentinel 2A y 2B con el software SNAP 6.0.* Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires. https://es.scribd.com/document/686309140/TutorialSNAP-preproc-ACasellaetal-2018

Center for Research on the Epidemiology of Disasters. (CRED). (2020). Disaster Year in Review 2019. *Cred Crunch,* (50). https://cred.be/sites/default/files/CC58.pdf

Cruz Torres, I., Pérez Rivas, G., & Hidalgo Mayo, A. (2025). Climatología de los ciclones tropicales en la provincia Holguín en el período 1851-2023. *Revista Cubana de meteorología, 31*(1). http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2664-08802025000100010&script=sci_arttext

Conatti, C., Nicholas, K., Fedele, G., Delforge, D., Speybroeck. N., Moraga, P., Blatter, J., Below, R., & Zvoleff, A. (2024). Global hotspot of climate-related disasters. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 109*. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104488

Fragoso-Campón, L., & Quirós, E. (2019). Sentinel Toolbox Application (SNAP) aplicado a la clasificación supervisada de imágenes PNOA. *Libro de actas del XVIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección*, 263-266. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7441143

Galbán, L., & Pérez, A.S. (2026). Inundaciones y cambio climático: Un análisis actualizado. *Revista Geográfica*, (169), 101–125. https://doi.org/10.35424/regeo.169.2024.3646

Ibarra, E., & Rodríguez, A.T. (2023). Identificación de potenciales afectaciones por instalaciones turísticas en drenajes de la cuenca hidrográfica del Río Cuale-Pitillal (zona costera de Puerto Vallarta, México). *Agua y Territorio*, (22), 199-214. https://doi.org/10.17561/at.22.6772

Konapala, G., Kumar, S.V., & Ahmad, S.K. (2021). Exploring Sentinel-1 and Sentinel-2 diversity for flood inundation mapping using deep learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *180*, 163-173. https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU21/EGU21-10445.html

Ollero, A. (2025). Espacio para el río y para la inundación: adaptación y resiliencia. *Cuadernos de Geografía, 114-115*, 85-106. https://doi.org/10.7203/CGUV.114-15.31754

Pech-May, F., Álvarez-Cárdenas, O., & Ríos-Toledo, G. (2025). Flood Mapping through Sentinel-1, Sentinel-2 Imagery and U-NET Deep Learning Model. *Computación y Sistemas, 9*(1), 393–407. https://doi.org/10.13053/CyS-29-1-5539

Pérez Rodríguez, S., Porres García, M.A., & Fernández Lorenzo, J.M. (2024). Impacto de los ciclones tropicales en el distrito físico-geográfico La Habana-Matanzas. Período 2000-2020. *Revista Cubana de Meteorología, 30*(1), e07. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=701977979007

Ramón Puebla, A.M., Salinas, E., & Acevedo, P. (2011). La determinación de los conflictos de uso del territorio: cuenca Alta del Río Cauto. Cuba. *Terra, 27(42),* 47-71. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72121706003.pdf

Ramos, L.E. (2025). Dos mil veinticuatro: año de tormentas y huracanes. *Revista Cubana de Meteorología*, *31*(1), 1-3. https://cu-id.com/2377/v31n1e01

Ruiz-Siles, Y. (2025). Ciclones tropicales en el Atlántico Caribe. Un balance desde la historia climatológica. *Revista de Historia, 91*, 1-35. https://doi.org/10.15359/rh.91.7

Sánchez Hernández, J.V., Pech-May, F., Sánchez Jacinto, H.G., & Magaña-Govea, J. (2021). Mapeo de inundaciones utilizando imágenes satelitales SAR en Google Earth Engine. *Research in Computing Science, 150*(4), 83-95. https://www.rcs.cic.ipn.mx/2021_150_4/

Sánchez, Y.S., de Miguel Fernández, C., & Rochenel, S. (2013). Caracterización hidrogeológica del Valle del Cauto, Cuba. *Minería y Geología*, *29*(2), 16-34. https://www.redalyc.org/pdf/2235/223528710002.pdf

Sandoval-Díaz, J., Muñoz, M.N., & Martínez, D.C. (2023). Revisión sistemática sobre la capacidad de adaptación y resiliencia comunitaria ante desastres socionaturales en América Latina y el Caribe. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, *7*(2), 187-203. https://doi.org/10.55467/reder.v7i2.132

Santana Castro, A.G., Montilla Pacheco, A.J., & Jarre Castro, E.J. (2025). Geomática aplicada a la cartografía de desastres en el cantón Portoviejo, Manabí, Ecuador. *Revista Científica Multidisciplinaria, 6*(10), 144-152. https://doi.org/10.56124/ubm.v6i10.018

Sevillano Rodríguez, M.E., Bravo Peña, L.C., Alatorre Cejudo, L.C., & Salcedo Hurtado, E.J. (2020). Identificación de zonas de inundación a partir de imágenes (SAR) y de eventos históricos de inundación: caso de estudio Santiago de Cali, Colombia. *Cuadernos Geográficos*, *59*(2), 308-329. https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v59i2.9641

Suazo-Muñoz, C., Sandoval-Díaz, J., & Navarrete-Valladares, C. (2025). Participatory methodologies in community-based disaster risk management: a systematic review of experiences in Latin America. *Perspectiva Geográfica*, *30*(2). https://doi.org/10.19053/uptc.01233769.18772

Tiampo, K.F., Huang, L., Simmons, C., Woods, C., & Glasscoe, M.T. (2022). Detection of flood extent using Sentinel-1A/B synthetic aperture radar: an application for Hurricane Harvey, Houston, TX. *Remote Sensing*, *14*(9), 2261. https://doi.org/10.3390/rs14092261

Wohl, E., Fryirs, K., Grabowski, R.C., Morrison, R.R., & Sear, D. (2024). Enhancing the natural absorbing capacity of rivers to restore their resilience. *BioScience, 74*(11), 782-796. https://doi.org/10.1093/biosci/biae090

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de autoría según taxonomía CRediT

Rafael Alejandro Arias La O: Curación de contenidos/Investigación/Recursos materiales/ Software/Visualización/Redacción -borrador original

Dioelis Rafael Guerra Santiesteban: Conceptualización/Metodología/Administración del proyecto/Redacción – revisión y edición

José Antonio Alayo Llorén: Análisis formal de los datos/Supervisión/Validación