Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra
Guatemalan Journal of Earth Sciences
Vol. 13, Núm. 1, 2026 | ISSN impreso 2410-728X | ISSN electrónico 3106-0056
https://www.geologiausac.com

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Mapeo de inundaciones con Sentinel-1 tras Eta e Iota (2020): experiencia formativa en el Valle de Sula y Guatemala

Flood mapping with Sentinel-1 after storms Eta and Iota (2020): a training experience in the Sula Valley and Guatemala

Jaime Requena[1,*], Diego L. Mendoza M.[2] y Victor O. Bac G.[2]

[1] Asociación Guatemalteca de Geociencias Ambientales (ASGA), Ciudad de Guatemala, Guatemala.
[2] Carrera de Geología, Centro Universitario del Norte (CUNOR), Universidad de San Carlos de Guatemala, Cobán, Alta Verapaz, Guatemala.
*** Autor de correspondencia:** jaimereq@gmail.com
Correos: dm7171779@gmail.com; bacgodinezvictoromar@gmail.com
ORCID: Jaime Requena https://orcid.org/0000-0001-7833-4957

Recibido: 20/10/2026 | **Aceptado:** 16/11/2026 | **Publicado:** 27/11/2026

Resumen

Las tormentas Eta e Iota causaron en noviembre de 2020 inundaciones extensas en Centroamérica. Este trabajo presenta un proceso formativo en el que estudiantes de la Carrera de Geología del Centro Universitario del Norte (CUNOR) aplicaron técnicas de radar de apertura sintética (SAR) aprendidas en capacitaciones de ARSET (NASA) y Copernicus LAC (ESA). El Valle de Sula (Honduras) sirvió como caso de entrenamiento y, después, dos grupos replicaron la metodología en el valle del Polochic y en Campur (Alta Verapaz, Guatemala). Se usaron imágenes Sentinel-1 GRD (modo IW, polarización VV/VH) preprocesadas en SNAP; el agua se clasificó por umbrales de retrodispersión y la inundación se aisló por detección de cambios respecto de una imagen previa al evento. En el Valle de Sula se identificaron 19 229.8 ha inundadas el 19/11/2020, concentradas en Villanueva, El Progreso y Choloma. En el Polochic, la inundación alcanzó su máximo (5 212 ha) el 7/11/2020 y el 80 % del agua drenó en tres semanas. En Campur, una depresión kárstica sin drenaje superficial, el agua siguió acumulándose hasta alcanzar 98.1 ha el 1/12/2020; la validación con un ortomosaico de dron dio un índice F1 de 0.79. Se afectaron cultivos de arroz, granos básicos, café y cardamomo, y 30 poblados con unos 5 800 habitantes. El flujo de trabajo, basado en datos y software libres, es replicable con fines académicos y de gestión del riesgo.

Palabras clave: detección de cambios; Eta e Iota; inundaciones; radar de apertura sintética; Sentinel-1

Abstract

Storms Eta and Iota caused widespread flooding across Central America in November 2020. This paper presents a training process in which Geology students at the Centro Universitario del Norte (CUNOR) applied synthetic aperture radar (SAR) techniques learned through ARSET (NASA) and Copernicus LAC (ESA) training courses. The Sula Valley (Honduras) served as the training

case, after which two groups replicated the methodology in the Polochic valley and in Campur (Alta Verapaz, Guatemala). Sentinel-1 GRD images (IW mode, VV/VH polarization) were preprocessed in SNAP; water was classified using backscatter thresholds, and flooding was isolated through change detection against a pre-event image. In the Sula Valley, 19 229.8 ha were flooded on 19 November 2020, concentrated in Villanueva, El Progreso and Choloma. In the Polochic valley, flooding peaked at 5 212 ha on 7 November 2020, and 80 % of the water drained within three weeks. In Campur, a karst depression without surface drainage, water kept accumulating until it reached 98.1 ha on 1 December 2020; validation against a drone orthomosaic yielded an F1 score of 0.79. Rice, staple grains, coffee and cardamom crops were affected, as well as 30 settlements with about 5 800 inhabitants. The workflow, based on open data and software, is replicable for academic and disaster risk management purposes.

Keywords: change detection; Eta and Iota; floods; Sentinel-1; synthetic aperture radar

Cómo citar este artículo (APA 7.ª ed.)

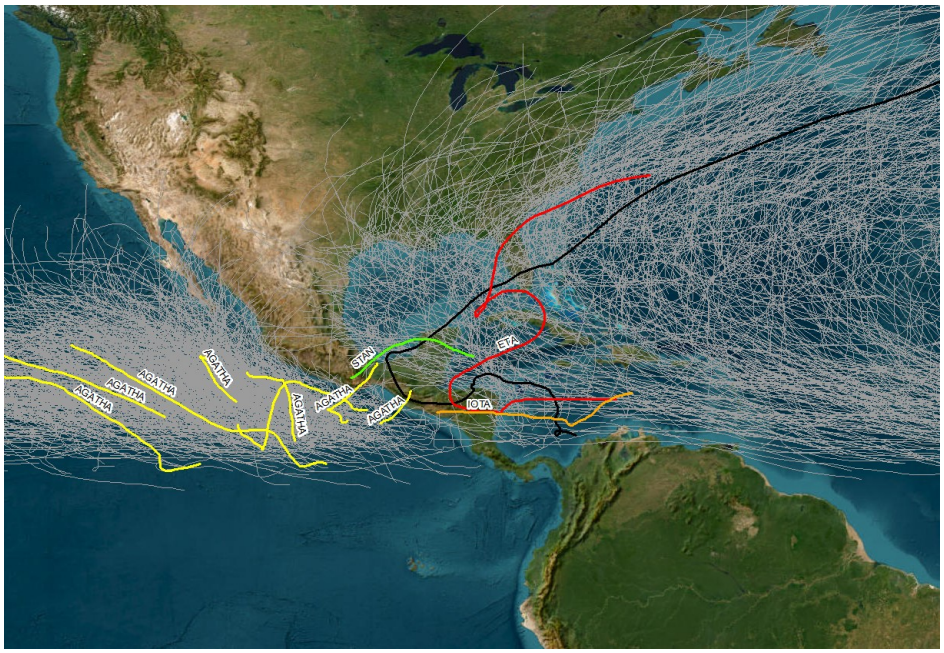
Requena, J., Mendoza M., D. L., & Bac G., V. O. (2026). Mapeo de inundaciones con Sentinel-1 tras Eta e Iota (2020): experiencia formativa en el Valle de Sula y Guatemala. *Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra, 13*(1), 67–82.

1. Introducción

El huracán Eta tocó tierra en Nicaragua el 3 de noviembre de 2020 con categoría 4, e Iota lo hizo casi en el mismo lugar el 17 de noviembre (Copernicus, 2020). Las lluvias acumuladas desbordaron los ríos Ulúa y Chamelecón en el Valle de Sula, una de las principales zonas urbanas, industriales y agrícolas de Honduras. En Guatemala, las inundaciones afectaron sobre todo Alta Verapaz e Izabal, a lo largo de los ríos Polochic y Chixoy, además de inundaciones por flujo subterráneo en terrenos kársticos, como en Campur, San Pedro Carchá (Agencia Ocote, 2021). La Figura 1 muestra las trayectorias de los ciclones del Atlántico y resalta los más perjudiciales para Guatemala, cuyos impactos se resumen en la Tabla 1.

Figura 1

Trayectorias de los ciclones tropicales del Atlántico (1980–2026), con los más perjudiciales para Guatemala resaltados, entre ellos Eta e Iota



Nota. Elaborado con datos de trayectorias del *National Hurricane Center* (2026).

Tabla 1

Impactos en Guatemala de los ciclones tropicales más perjudiciales (1980–2026)

Evento	Año	Categoría máxima	Fallecidos	Damnificados	Pérdidas (US$ millones)	Caso emblemático
Mitch	1998	Huracán 5	268	106 000	748	—
Stan	2005	Huracán 1	670	495 927[a]	988	Deslave de Panabaj
Agatha	2010	Tormenta tropical	193	104 052	982	Hundimiento en la zona 2
Eta e Iota	2020	Huracán 4	60	1 782 560	775	Deslizamiento de Quejá

Nota. Pérdidas en dólares del año del evento (Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia [SEGEPLAN], 2023). Fallecidos y damnificados según CONRED y CEPAL; las cifras varían entre fuentes. [a] Personas afectadas.

Durante estos eventos, la nubosidad persistente limita el uso de sensores ópticos. El radar de apertura sintética (SAR) emite su propia señal de microondas y observa la superficie a través de las nubes, de día y de noche. El agua en calma refleja la señal lejos del sensor (reflexión especular) y aparece oscura, lo que permite delimitarla con umbrales de retrodispersión (Tiwari et al., 2020; Twele et al., 2016). La misión Sentinel-1 proporciona imágenes en banda C, gratuitas y con 10 m de píxel en el producto GRD (Torres et al., 2012); en 2020 operaban los satélites 1A y 1B, que repetían una misma geometría cada 6 días. Durante Eta e Iota, UNOSAT y el Servicio de Gestión de Emergencias de Copernicus produjeron mapas rápidos de inundación con estos datos (Copernicus, 2020; UNOSAT, 2020a), aunque limitados a fechas y áreas específicas.

El Programa de Capacitación en Percepción Remota Aplicada de la NASA ofrece cursos abiertos sobre SAR para desastres, incluido el mapeo de inundaciones con Sentinel-1 en *Google Earth Engine* y SNAP (*Applied Remote Sensing Training Program* [ARSET], 2019, 2022). De forma complementaria, Copernicus LAC Panamá impartió el curso práctico *Técnicas avanzadas de monitoreo de desastres con teledetección*, con un módulo de monitoreo de inundaciones con Sentinel-1 en SNAP y SIG (Copernicus LAC/ESA, 2025). Ambos contenidos se adaptaron a la formación de estudiantes de Geología del CUNOR: el Valle de Sula sirvió como caso de entrenamiento y dos grupos de trabajo replicaron el estudio en el valle del Polochic y en Campur.

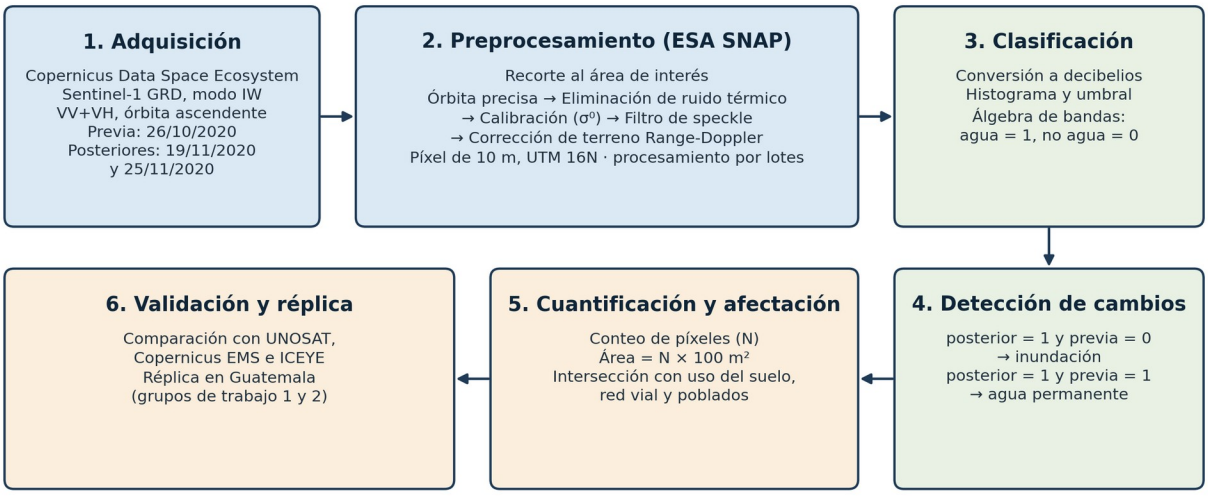
Los objetivos fueron: (a) delimitar y cuantificar el área inundada en el Valle de Sula durante Eta e Iota con Sentinel-1; (b) separar el agua de inundación del agua permanente mediante detección de cambios; (c) transferir la metodología a estudiantes de Geología del CUNOR y replicarla en zonas inundables de Guatemala; y (d) analizar la afectación en usos del suelo, red vial y centros poblados.

2. Metodología

El estudio combinó un componente formativo y uno técnico. El flujo técnico integra la adquisición de imágenes, el preprocesamiento en SNAP, la clasificación del agua, la detección de cambios, la cuantificación, el análisis de afectación y la validación (Figura 2). Todos los datos y el software son de acceso libre.

Figura 2

Flujo de trabajo para el mapeo de inundaciones con Sentinel-1



Nota. Elaboración propia.

2.1 Diseño del proceso formativo

El proceso tuvo tres fases. En la **capacitación base** se tomaron como referencia los cursos de ARSET (2019, 2022) y de Copernicus LAC/ESA (2025), que cubren los fundamentos del radar, la descarga de datos y el mapeo de inundaciones. En el **entrenamiento con el caso del Valle de Sula**, estudiantes de los últimos años de la

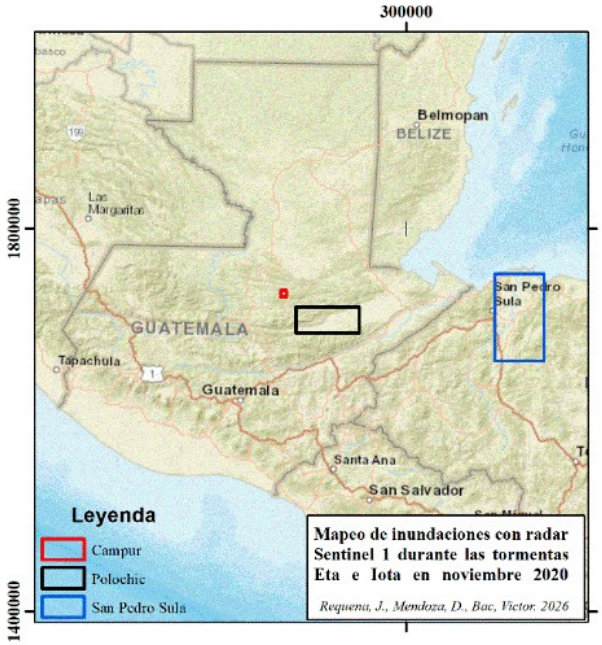
Carrera de Geología reprodujeron el flujo completo —descarga en el Copernicus Data Space Ecosystem, gráfico de preprocesamiento en SNAP, clasificación del agua y cuantificación en QGIS— durante al menos 7 horas teóricas y 5 prácticas, en septiembre de 2026. En la **réplica en Guatemala**, el grupo 1 trabajó en el valle del Polochic y el grupo 2 en los alrededores de Campur, al norte de San Pedro Carchá; cada grupo seleccionó sus imágenes, definió sus umbrales y validó sus resultados.

2.2 Áreas de estudio

El Valle de Sula es una planicie aluvial del noroeste de Honduras drenada por los ríos Ulúa y Chamelecón hasta el mar Caribe; incluye San Pedro Sula, Choloma, La Lima, El Progreso y Villanueva. El área analizada abarca 7 348.8 km^2 (15.05°–15.86° N, 88.13°–87.36° O). En Guatemala, el valle del Polochic y las riberas del lago de Izabal son producto de la depresión tectónica asociada a la falla del Polochic (área analizada: 1 673.9 km^2). Campur, en San Pedro Carchá, se ubica en el cinturón plegado de Alta Verapaz, con desarrollo de paisaje kárstico (área analizada: 39.5 km^2). Ambas zonas se eligieron por su recurrencia de inundaciones, su afectación durante Eta e Iota y la disponibilidad de productos de referencia (Figura 3).

Figura 3

Ubicación de las áreas de estudio en Honduras y Guatemala



2.3 Datos

Se utilizaron productos Sentinel-1 Level-1 GRD (GRDH) en modo *Interferometric Wide* (IW), polarización dual VV+VH y órbita ascendente, descargados del Copernicus Data Space Ecosystem (Tabla 2). En el Valle de Sula todas las escenas comparten la órbita relativa 165, lo que garantiza la misma geometría antes y después del evento. Para la corrección de terreno se usaron los modelos SRTM 1 Sec y Copernicus DEM GLO-30 (European Space Agency [ESA], 2021). En Guatemala se empleó información más detallada: un modelo digital de elevación

fotogramétrico (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación [MAGA], 2006), convertido a una rejilla de 5 m con resolución efectiva de ~15 m, el mapa de uso del suelo (MAGA, 2020), la red vial y los centros poblados con población del Censo 2002 (Instituto Nacional de Estadística [INE], 2003).

Tabla 2

Imágenes Sentinel-1 utilizadas

Área	Satélite y órbita relativa	Fecha previa	Fechas posteriores
Valle de Sula	S1A y S1B, órbita 165	26/10/2020	13/11, 19/11 (máximo) y 25/11/2020
Valle del Polochic	S1A, órbita 63	26/10/2020	7/11, 19/11, 1/12 y 13/12/2020
Campur	S1A, órbita 63	26/10/2020	7/11, 19/11 y 1/12/2020

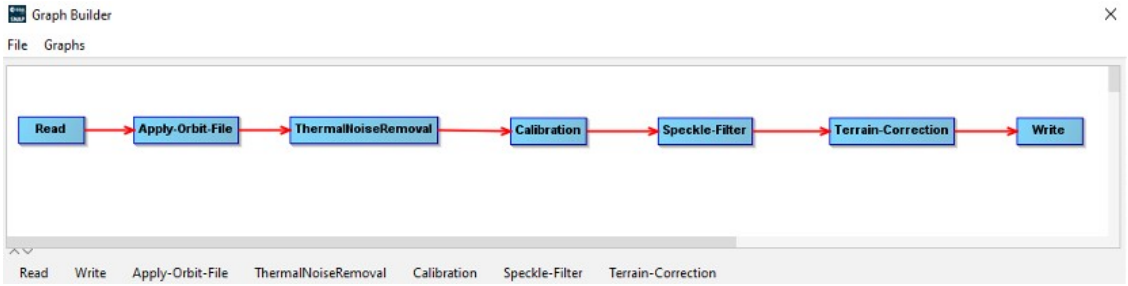
Nota. Contiene datos modificados de Copernicus Sentinel (2020), procesados por ESA. Los identificadores completos de los productos están disponibles a solicitud de los autores.

2.4 Preprocesamiento

Cada escena se recortó al área de interés y se procesó con un gráfico de SNAP (ESA, 2025) aplicado por lotes (*Batch Processing*), que encadena: corrección de órbita precisa; eliminación de ruido térmico, relevante sobre todo en VH; calibración radiométrica a coeficiente de retrodispersión sigma0 (σ^0); filtro de *speckle* Lee de 7 × 7 píxeles; y corrección de terreno *Range-Doppler* con píxel de 10 m, remuestreo bilineal y proyección WGS 84 / UTM 16N (EPSG:32616) (Figura 4).

Figura 4

Gráfico de preprocesamiento construido en el Graph Builder de SNAP



2.5 Clasificación del agua y detección de cambios

El coeficiente σ^0 en escala lineal se expresa en decibelios con la ecuación 1:

$$\sigma^0(dB) = 10 \cdot log_{10}(\sigma^0) \quad (1)$$

En el Valle de Sula y en el Polochic se aplicó un umbral fijo en la polarización VV, que mostró la mejor separación entre agua y tierra, definido en el mínimo del histograma entre ambos picos. En Campur, el umbral fijo no detectaba la inundación, por lo que se aplicó detección de cambios con umbrales automáticos por fecha: un píxel es agua nueva si su retrodispersión cae respecto del 26/10/2020 —umbral de Kittler e Illingworth (1986)— y además queda oscuro —umbral de Otsu (1979) más 1 dB de holgura—, con crecimiento de regiones hasta el 75 % del umbral de cambio (Tabla 3). En los tres casos, la inundación corresponde a los píxeles con agua en la fecha posterior y sin agua en la previa; los píxeles con agua en ambas fechas se

consideraron agua permanente. En QGIS se usó la calculadora ráster: ("post@1" = 1) AND ("pre@1" = 0).

Tabla 3
Umbrales utilizados para separar agua y no agua

Área	Fecha	Método	Umbral
Valle de Sula	19/11/2020	Umbral fijo, VV	$\sigma^o < 0.025$ (≈ −16.0 dB)
Valle del Polochic	Todas	Umbral fijo, VV	$\sigma^o < 0.02$ (≈ −17.0 dB)
Campur	7/11/2020	Cambio y oscuridad, VV y VH	Caída ≤ −2.29 dB; $\sigma^o < -9.57$ dB
Campur	19/11/2020	Cambio y oscuridad, VV y VH	Caída ≤ −1.79 dB; $\sigma^o < -10.14$ dB
Campur	1/12/2020	Cambio y oscuridad, VV y VH	Caída ≤ −2.75 dB; $\sigma^o < -13.30$ dB

Nota. En Campur, umbrales promedio de VV y VH calculados sobre 19, 14 y 26 teselas bimodales, respectivamente; umbral de crecimiento de regiones de −1.72, −1.34 y −2.06 dB.

2.6 Cuantificación y análisis de afectación

Los rásteres binarios, generados por SNAP en punto flotante, se convirtieron a enteros para obtener el número de píxeles inundados (N). Con píxeles de 10 × 10 m, el área se calculó con la ecuación 2:

$$A(ha) = (N \times 100) / 10\,000 \qquad (2)$$

En el Valle de Sula se superpusieron las áreas inundadas sobre los principales centros poblados. En Guatemala, las máscaras se convirtieron a polígonos y se intersectaron con el mapa de uso del suelo, la red vial y los centros poblados. Un poblado se consideró «dentro» si su píxel estaba inundado y «cerca» si había inundación a 250 m o menos; en las vías se midieron los kilómetros sobre píxeles inundados y en el uso del suelo, las hectáreas inundadas por clase.

2.7 Validación

En el Valle de Sula, los resultados se compararon con los productos de Copernicus EMS y el informe de ICEYE (2020). En Campur se compararon con ortomosaicos de dron del 10 y 19 de noviembre y con imágenes Sentinel-2, mediante el índice F1. Para Guatemala se dispone además de las capas de agua de UNOSAT del 18 y 23 de noviembre de 2020 (UNOSAT, 2020a, 2020b).

3. Resultados

3.1 Valle de Sula

El 19 de noviembre de 2020, las tormentas Eta e Iota mantenían inundadas 19 229.8 ha (192.3 km^2) del Valle de Sula, el 2.62 % del área analizada (Tabla 4). El histograma de σ^0 VV de esa fecha muestra la separación entre el agua y la tierra, con el umbral en 0.025 (Figura 5).

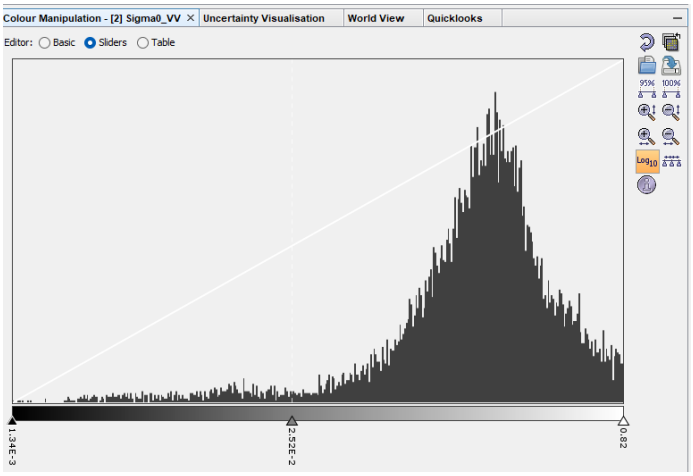
Tabla 4
Superficie de agua e inundación en el Valle de Sula el 19 de noviembre de 2020

Clase	Píxeles	Área (ha)	% del área analizada
Inundación por Eta e Iota	1 922 978	19 229.8	2.62
Agua permanente	151 001	1 510.0	0.21
Total de agua	2 073 979	20 739.8	2.82

Nota. Área analizada: 734 877.6 ha (7 348.8 km²).

Figura 5

Histograma de σ⁰ VV (escala lineal) de la imagen del 19 de noviembre de 2020 en el Valle de Sula

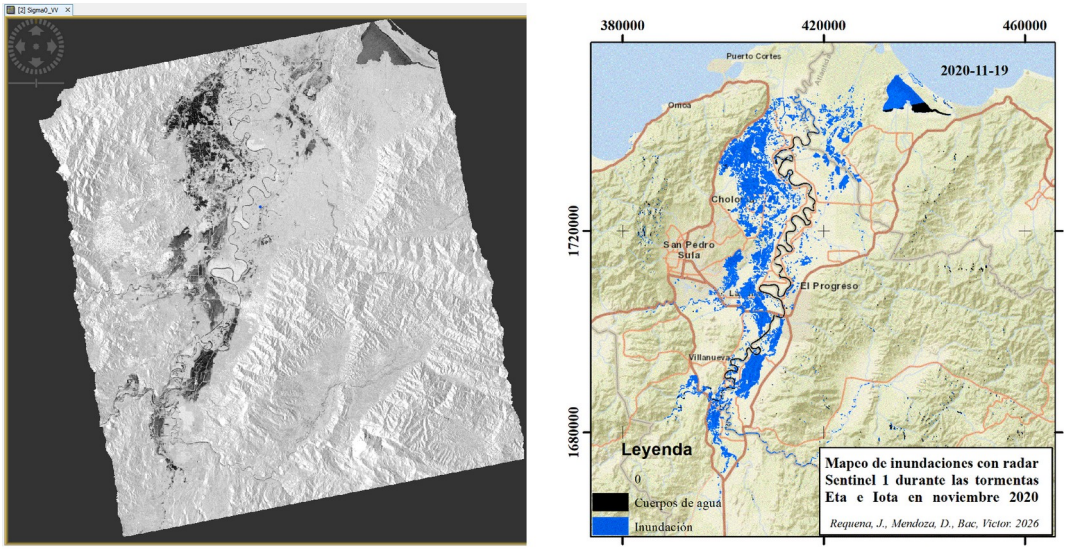


Nota. El cursor central marca el umbral de 0.025 (≈ −16 dB).

La binarización y su superposición sobre los centros poblados muestran que la inundación se concentró a lo largo de los cauces del Ulúa y el Chamelecón, y que las localidades más afectadas fueron Villanueva, El Progreso y Choloma (Figura 6). Destaca además una extensa zona costera inundada al oeste de Tela, de unas 3 221 ha, de las que solo 673 ha tenían agua antes del evento.

Figura 6

Valle de Sula el 19 de noviembre de 2020: (a) retrodispersión σ⁰ VV y (b) área inundada



Nota. Contiene datos modificados de Copernicus Sentinel (2020), procesados por ESA.

3.2 Valle del Polochic

El Polochic se comportó como una planicie aluvial: se inundó y drenó con rapidez. El máximo observado fue de 5 212 ha el 7 de noviembre, cuatro días después de Eta, equivalente al 3.11 % del área analizada (167 391 ha); el 1 de diciembre quedaban 1 119 ha, es decir, el 80 % ya había drenado (Tabla 5). La lámina de agua fue somera, con una profundidad media de 0.25 a 0.41 m según el modelo de elevación. Los ríos desbordados fueron el Polochic, el Zarco, el Cahabón y el Jolomjixqui. Eta tuvo mayor impacto que Iota: el área inundada del 7 de noviembre duplicó la del 19 de noviembre, e Iota, que llegó cuando el agua de Eta descendía, añadió 569 ha nuevas sin superar el pico anterior (Figura 7). Las fuentes de agua permanente (ríos, lagunas y humedales) sumaban 6 214 ha el 26 de octubre.

Tabla 5

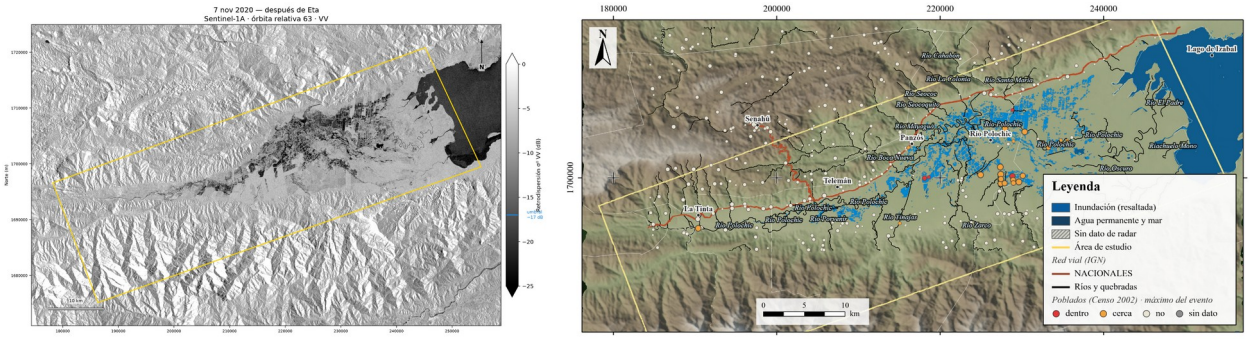
Área inundada por fecha en las zonas de Guatemala

Zona (área analizada)	Fecha	Área inundada (ha)	% del área analizada
Valle del Polochic (167 391 ha)	7/11/2020 (máximo)	5 212	3.11
	1/12/2020	1 119	0.67
Campur (3 947.8 ha)	7/11/2020[a]	37.1	0.94
	19/11/2020	50.1	1.27
	1/12/2020 (máximo)	98.1	2.49

Nota. [a] Baja confianza: según el dron del 10 de noviembre, el radar registró solo ~1/5 del agua real en esa fecha.

Figura 7

Valle del Polochic el 7 de noviembre de 2020: (a) retrodispersión σ⁰ VV y (b) inundación, centros poblados y red vial afectados



(a) (b)

Nota. Sentinel-1A IW GRD (Copernicus, ESA) procesado en SNAP. Polígono amarillo: área de estudio; tonos oscuros: baja retrodispersión (agua lisa).

El impacto social se registró en Santa Catalina La Tinta y Panzós (Alta Verapaz) y en El Estor (Izabal), pero se concentró en Panzós, en la confluencia de los ríos Polochic y Cahabón, con el 80 % de la población afectada (Tabla 6). Sumando todas las fechas, se afectaron 25 poblados rurales con 2 977 habitantes: 1 537 hombres y 1 440 mujeres; 1 546 niños de 0 a 14 años y 75 personas mayores de 65. Las comunidades más afectadas fueron Imposible, Las Pacayas, San Vicente II, Lagartos y Pueblo Viejo. En la red vial se registraron 0.17 km de

caminos rurales y 5 km de vías de primer orden sobre píxeles inundados.

Tabla 6
Centros poblados dentro y cerca de las zonas inundadas

Zona	Municipio	Poblados afectados	Población afectada
Valle del Polochic	Panzós	19	2 374
	El Estor	5	372
	Santa Catalina La Tinta	1	231
Campur	San Pedro Carchá	5	2 805
Total		30	5 782

Nota. Población del Censo 2002 (Instituto Nacional de Estadística [INE], 2003).

La huella acumulada (superficie inundada en al menos una fecha) fue de 5 919 ha: 3 095 ha de uso agropecuario —sobre todo arroz, granos básicos y pastos—, 2 597 ha de humedales y zonas inundables, 167 ha de cuerpos de agua y 60 ha de bosque y matorral (Tabla 7). El principal daño económico es agrícola, pues el arroz y los granos básicos son cultivos de subsistencia y de ingreso en la zona.

Tabla 7
Superficie inundada por clase de uso del suelo en el valle del Polochic

Clase de uso del suelo	Huella inundada (ha)	% de la clase inundado
Humedal con vegetación	1 250.8	7.8
Arroz	1 227.8	31.5
Granos básicos (maíz y frijol)	933.4	3.1
Pradera pantanosa	794.1	33.1
Zonas inundables	543.6	27.5
Pasto cultivado	459.4	28.3
Pasto natural	330.2	4.8
Palma de aceite	143.9	1.7
Lago, laguna o laguneta	114.5	1.9
Vegetación arbustiva baja	55.1	0.3
Río	52.1	3.3
Otras clases[a]	14.2	—
Total	5 919.1	

Nota. Clases del mapa de uso del suelo de MAGA (2020). [a] Humedal con bosque, playas y arenales, bosque latifoliado, huerto y banano-plátano.

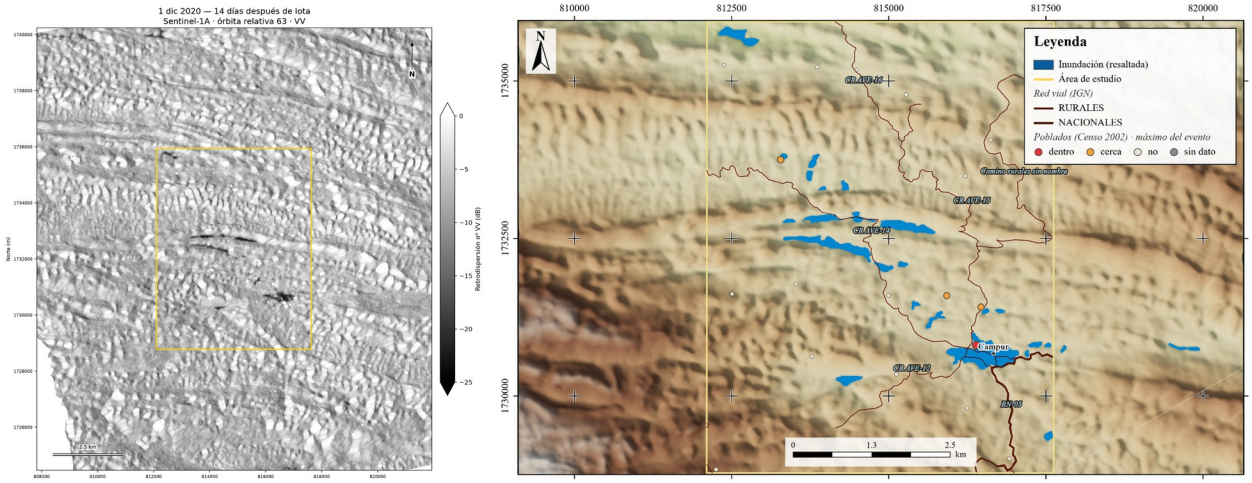
3.3 Campur

Campur se ubica en una depresión kárstica sin desagüe superficial (dolinas, uvalas y poljes). Después de Eta e Iota, el agua se acumuló en estas estructuras y siguió subiendo durante semanas: de 37.1 ha el 7 de noviembre a 98.1 ha el

1 de diciembre, el 2.49 % del área analizada (Tabla 5; Figura 8). Con el umbral absoluto de −17 dB la inundación no se detectaba: las lagunas kársticas son estrechas, su superficie se vuelve rugosa por el viento y la lluvia, y el filtro de *speckle* las mezcla con las laderas, por lo que el agua quedaba entre −10 y −12 dB; en cambio, la caída respecto de la fecha seca era clara, de −3 a −10 dB. La comparación con el ortomosaico de dron del 19 de noviembre dio un F1 de 0.79, y con Sentinel-2, de 0.66 a 0.73.

Figura 8

Campur: (a) retrodispersión σ⁰ VV del 1 de diciembre de 2020 y (b) área inundada, centros poblados y red vial



Nota. Sentinel-1 IW GRD (Copernicus, ESA) procesado en SNAP. Polígono amarillo: área de estudio; tonos oscuros: baja retrodispersión.

Los impactos sociales se concentraron en la comunidad de Campur, donde se ubican la mayor parte de la población y los comercios: 5 poblados con 2 805 habitantes (1 176 hombres, 1 133 mujeres y 496 niños). Respecto al uso del suelo se inundaron 65.8 ha de café y cardamomo, 24.3 ha de huertos, 14.3 ha de cardamomo y 1.8 ha de bosque latifoliado (MAGA, 2020), y en la red vial, 2.42 km de caminos vecinales.

4. Discusión

La imagen del Valle de Sula del 19 de noviembre se adquirió dos días después de que Iota tocara tierra y 16 días después de Eta, cuando ambas tormentas sumaban su efecto sobre la planicie. Aun así, el pico pudo ocurrir entre adquisiciones, por lo que el área obtenida es un valor mínimo. ICEYE (2020), con imágenes SAR comerciales de alta revisita, estimó profundidades promedio de 1 a 2 m en la misma zona, muy superiores a las del Polochic.

Las tres zonas muestran comportamientos hidrológicos distintos. El Valle de Sula y el Polochic son planicies fluviales donde el agua alcanzó su máximo poco después de las tormentas y luego drenó; en el Polochic, el pico de Eta superó al de Iota y el 80 % del agua desapareció en tres semanas. En Campur, en cambio, la inundación por ascenso del agua subterránea en depresiones kársticas siguió creciendo hasta diciembre, como se documentó también en Sesajal (Agencia Ocote, 2021). Esta diferencia tiene implicaciones para la gestión del riesgo: en el karst, la afectación se prolonga

semanas después del evento y el monitoreo debe mantenerse.

La umbralización presenta limitaciones conocidas. En zonas urbanas, la doble reflexión entre edificios y agua aumenta la señal y oculta la inundación, y bajo vegetación densa, como palmares y humedales con bosque, ocurre un efecto similar, por lo que el método tiende a subestimar el área inundada. En Campur, además, el umbral fijo falló por la rugosidad y el tamaño reducido de las lagunas, y la detección de cambios con umbrales automáticos resolvió el problema. La validación de Campur (F1 = 0.79) es comparable con la de estudios similares: Tiwari et al. (2020) obtuvieron una exactitud global superior al 94 % con Sentinel-1 y el umbral de Otsu, y Vanama et al. (2020), un 82 % validado en campo. NASA DEVELOP (2021) también encontró extensiones de inundación similares con imágenes ópticas y SAR tras Eta e Iota.

Otras limitaciones son: el intervalo de 12 días entre observaciones de un solo satélite en el Polochic, que deja sin datos los días posteriores a cada tormenta; el modelo de elevación de 2006, que solo permite estimar profundidades; y el uso de la población del Censo 2002 representada como puntos, que solo permitió utilizar el criterio de cercanía de 250 m, que puede subestimar la afectación en asentamientos dispersos.

Desde la perspectiva formativa, el caso del Valle de Sula permitió que los estudiantes dominaran el flujo completo antes de aplicarlo a un área nueva. Las dificultades técnicas más frecuentes fueron los errores del Graph Builder de SNAP cuando el nodo de recorte no tiene región definida, el manejo de rásteres de punto flotante sin tabla de atributos y la configuración de la proyección para calcular áreas. Documentar estas soluciones facilita replicar el método en otros cursos.

5. Conclusiones y recomendaciones

1. Sentinel-1 permitió delimitar la inundación de Eta e Iota en el Valle de Sula pese a la nubosidad: 19 229.8 ha inundadas el 19 de noviembre de 2020, concentradas en Villanueva, El Progreso y Choloma.

2. La detección de cambios entre imágenes de la misma órbita relativa separó el agua de inundación del agua permanente. En las planicies fluviales, la polarización VV con umbral fijo (≈ −16 a −17 dB) fue suficiente; en el karst se requirieron umbrales automáticos de cambio.

3. Los grupos de trabajo replicaron la metodología en Guatemala: 5 212 ha inundadas en el valle del Polochic (7/11/2020) y 98.1 ha en Campur (1/12/2020), con dinámicas opuestas de drenaje rápido y acumulación prolongada.

4. La intersección con uso del suelo, red vial y poblados identificó como coberturas más afectadas el arroz (1 227.8 ha) y los granos básicos (933.4 ha) en el Polochic, y el café y cardamomo (65.8 ha) en Campur, con 30 poblados y unos 5 800 habitantes afectados.

5. La adaptación de las capacitaciones de ARSET y Copernicus LAC a la Carrera de Geología del CUNOR demostró que el flujo, basado en datos y software libres, es replicable, escalable y útil para instituciones como CONRED y COPECO.

Se recomienda: actualizar la población expuesta con el Censo 2018 del INE y completar las capas de poblados, vías y ríos, ausentes en el 27 % del área del Polochic; detectar la vegetación inundada mediante el doble rebote (aumento de

σ^0 VV o de la razón VV/VH) y la coherencia interferométrica; acortar el intervalo entre observaciones con Sentinel-1B y la órbita descendente para captar el pico real, entre el 4 y el 6 de noviembre; validar en campo con marcas de agua y testimonios en Panzós y El Estor, contrastando con los registros de daños agrícolas del MAGA; e incorporar imágenes ópticas Sentinel-2, modelación hidráulica y radares en banda L como NISAR, que penetran mejor la vegetación.

Agradecimientos

Al Programa de Capacitación en Percepción Remota Aplicada (ARSET) de la NASA y a Copernicus LAC de la Agencia Espacial Europea, por los materiales de capacitación y el acceso libre a los datos Sentinel-1. A los estudiantes de la Carrera de Geología del CUNOR que integraron los grupos de trabajo. A Requena Renato y Requena Fabio, por la programación en Python que permitió visualizar de forma interactiva la información generada en este proyecto y facilitar su difusión.

Contribución de los autores

Los autores no proporcionaron un desglose individualizado de sus contribuciones según la taxonomía CRediT al momento de la entrega del manuscrito; sin embargo, todos los autores declaran haber participado en la elaboración del trabajo y aprueban la versión final publicada.

Financiamiento

Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Disponibilidad de datos

Las imágenes Sentinel-1 son de acceso libre en el Copernicus Data Space Ecosystem. Los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles a través del autor de correspondencia previa solicitud razonable.

Referencias

Agencia Ocote. (2021, 6 de mayo). *Los impactos de Eta y Iota en Guatemala y sus implicaciones sobre el riesgo*. Después de las tormentas. https://despuesdelastormentas.agenciaocote.com/2021/05/06/los-impactos-de-eta-y-iota-en-guatemala-y-sus-implicaciones-sobre-el-riesgo/

Applied Remote Sensing Training Program. (2019). *SAR for disasters and hydrological applications* [Curso en línea]. NASA. https://www.earthdata.nasa.gov/learn/trainings/sar-disasters-hydrological-applications

Applied Remote Sensing Training Program. (2022). *Disaster assessment using synthetic aperture radar* [Curso en línea]. NASA. https://appliedsciences.nasa.gov/get-involved/training/english/arset-disaster-assessment-using-synthetic-aperture-radar

Copernicus. (2020). *OBSERVER: Hurricane affected countries in Central America supported by the Copernicus Emergency Management Service*. https://www.copernicus.eu/en/news/news/observer-hurricane-affected-countries-central-america-supported-copernicus-emergency

Copernicus LAC/ESA. (2025). *Técnicas avanzadas de monitoreo de desastres con teledetección. Caso práctico: monitoreo de inundaciones con Sentinel-1* [Curso en línea]. Copernicus LAC Panamá.

European Space Agency. (2021). *Copernicus DEM GLO-30* [Conjunto de datos]. https://doi.org/10.5270/ESA-c5d3d65

European Space Agency. (2025). *SNAP: Sentinel Application Platform* (Versión 13.0) [Software]. https://step.esa.int

ICEYE. (2020). *Flooding from Hurricane Iota in Sula Valley, Honduras* [Informe técnico]. https://www.iceye.com/hubfs/Downloadables/ICEYE_Flood_Briefing_Hurricane_Iota_Honduras_2020.pdf

Instituto Nacional de Estadística. (2003). *XI Censo Nacional de Población y VI de Habitación 2002*. INE.

Kittler, J., & Illingworth, J. (1986). Minimum error thresholding. *Pattern Recognition, 19*(1), 41–47. https://doi.org/10.1016/0031-3203(86)90030-0

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. (2006). *Modelo digital de elevación y ortofotos de Guatemala* [Conjunto de datos digital]. MAGA.

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. (2020). *Mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra*. MAGA.

NASA DEVELOP. (2021). *Central America disasters: Using Earth observations to map flooding for disaster monitoring, inform potential risk, and prepare for possible response* (Informe técnico 20210026458). NASA Technical Reports Server. https://ntrs.nasa.gov/citations/20210026458

National Hurricane Center. (2026). *GIS archive: Tropical cyclone best track* [Conjunto de datos]. National Oceanic and Atmospheric Administration. https://www.nhc.noaa.gov/gis/

Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 9*(1), 62–66. https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076

Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia. (2023). *Estrategia para cálculo de daños, pérdidas, costos adicionales e impacto humano*. SEGEPLAN. https://portal.segeplan.gob.gt/segeplan/wp-content/uploads/2023/10/Doc.-DALA.pdf

Tiwari, V., Kumar, V., Matin, M. A., Thapa, A., Ellenburg, W. L., Gupta, N., & Thapa, S. (2020). Flood inundation mapping–Kerala 2018: Harnessing the power of SAR, automatic threshold detection method and Google Earth Engine. *PLOS ONE, 15*(8), e0237324. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237324

Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B., Floury, N., Brown, M., Navas Traver, I., Deghaye, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L'Abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., … Rostan, F. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment, 120*, 9–24. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028

Twele, A., Cao, W., Plank, S., & Martinis, S. (2016). Sentinel-1-based flood mapping: A fully automated processing chain. *International Journal of Remote Sensing, 37*(13), 2990–3004. https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1192304

UNOSAT. (2020a). *Satellite detected waters in Alta Verapaz, Izabal and Zacapa departments of Guatemala as of 18 November 2020* [Conjunto de datos]. Humanitarian Data Exchange. https://data.humdata.org/dataset/waters-in-alta-verapaz-izabal-and-zacapa-departments-of-guatemala-as-of-18-november-2020

UNOSAT. (2020b). *Satellite detected water in Izabal department of Guatemala as of 23 November 2020* [Mapa]. https://unosat.org/static/unosat_filesystem/2987/UNOSAT_A3_Natural_Landscape_TC20201119GTM_Izabal_23112020.pdf

Vanama, V. S. K., Mandal, D., & Rao, Y. S. (2020). GEE4FLOOD: Rapid mapping of flood areas

using temporal Sentinel-1 SAR images with Google Earth Engine cloud platform. *Journal of Applied Remote Sensing, 14*(3), 034505. https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.034505

Sobre los autores

Jaime Eduardo Requena Fernández

Ingeniero geólogo graduado de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), con especialización en Análisis de Cuencas Sedimentarias y Geología del Petróleo por la Universidad del Estado de Río de Janeiro (UERJ), Brasil, y estudios en la Maestría en Gestión de Recursos Hidrogeológicos de la Facultad de Ingeniería de la USAC. Ha sido profesor y coordinador de la Carrera de Geología del Centro Universitario del Norte (CUNOR-USAC). Su trayectoria profesional se centra en la aplicación de tecnologías geoespaciales a las geociencias: cartografía geológica, teledetección, sistemas de información geográfica (SIG), análisis de imágenes satelitales ópticas y de radar, fotogrametría con drones, tecnología LiDAR y modelado geológico e hidrogeológico tridimensional. Sus principales áreas de interés son la evaluación de amenazas y riesgos geológicos, los movimientos de ladera, los agrietamientos y asentamientos del terreno, la prospección de materias primas y el análisis de procesos geológicos mediante la observación y el modelado espacial. Correo: jaimereq@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7833-4957

Diego Mendoza

Técnico en Geología formado en la Carrera de Geología del Centro Universitario del Norte (CUNOR) de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC). Tiene formación y experiencia en reconocimiento geológico, trabajo de campo y cartografía geológica. Como parte de su formación desarrolló su Trabajo Final de Campo, cuyos resultados presentó ante el Consejo Municipal de Desarrollo (COMUDE) de San Cristóbal Verapaz, con lo que contribuyó a divulgar información geocientífica para el conocimiento y la gestión del territorio. Correo: dm7171779@gmail.com.

Victor Bac

Estudiante con pensum cerrado de la Carrera de Geología del Centro Universitario del Norte (CUNOR) de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC). Su formación abarca las distintas disciplinas de las ciencias geológicas, entre ellas la cartografía geológica, la geología estructural, la geomorfología y el reconocimiento de campo. Su interés académico se orienta al estudio de los procesos geológicos y a su aplicación en el análisis e interpretación de las características geológicas del territorio guatemalteco. Correo: bacgodinezvictoromar@gmail.com.

CC BY-NC-SA 4.0 Creative Commons

© 2026 Los autores. Este artículo se publica en acceso abierto bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0). Se permite copiar, redistribuir y adaptar la obra con fines no comerciales, siempre que se cite la autoría y la publicación original en la Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra y que las obras derivadas se distribuyan con la misma licencia.