Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra

Guatemalan Journal of Earth Sciences

Volumen 13 | Enero - diciembre 2026 | Número 1



Revista anual de la Carrera de Geología
Universidad de San Carlos de Guatemala

ISSN electrónico 3106-0056
ISSN impreso 2410-728X

RGCT

Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra

Guatemalan Journal of Earth Sciences

VOLUMEN 13 · NÚMERO 1 · 2026

CARRERA DE GEOLOGÍA · 50 AÑOS · 1976 · 2026 · CUNOR · USAC · COBÁN

Número publicado en el marco de los

50 años de la Carrera de Geología

Centro Universitario del Norte (CUNOR) · 1976–2026

EDITOR EN JEFE · COEDITORA

Luis Alfredo Godoy Morales · Andrea María Reiche de la Cruz

Carrera de Geología
Centro Universitario del Norte (CUNOR)
Universidad de San Carlos de Guatemala
Cobán, Alta Verapaz, Guatemala

ISSN impreso 2410-728X | ISSN electrónico 3106-0056 | www.geologiausac.com

Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra

Guatemalan Journal of Earth Sciences

Vol. 13, núm. 1, enero a diciembre 2026 | ISSN impreso 2410-728X | ISSN electrónico 3106-0056

COMITÉ EDITORIAL / *Editorial Board*

Editor en jefe

Ing. Geól. Luis Alfredo Godoy Morales

Carrera de Geología, Centro Universitario del Norte, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

luis.godoy@profesor.usac.edu.gt

https://orcid.org/0009-0004-8554-1734

La integración completa del Comité Editorial se presenta en la página correspondiente de este número.

PRODUCCIÓN / *Production*

Diseño, diagramación y portada: Ing. Geól. Luis Alfredo Godoy Morales

Corrección de estilo: Comité Editorial RGCT

Revisión de textos en inglés: Comité Editorial RGCT

FOTO DE PORTADA / *Cover photo*

Pliegues en filitas expuestos en un corte de la carretera CA-14, km 143, aldea Santa Bárbara, San Jerónimo, Baja Verapaz, Guatemala. El talud deja al descubierto las estructuras plegadas de la roca metamórfica; la persona sirve de escala. *Fotografía: Luis Alfredo Godoy Morales, 16 de abril de 2026.*

Folds in phyllites exposed in a road cut on highway CA-14, km 143, Santa Bárbara village, San Jerónimo, Baja Verapaz, Guatemala. A person provides scale.

CONTENIDO DEL NÚMERO / *Contents*

Seis artículos —cinco de investigación y uno de revisión— sobre micropaleontología y facies cretácicas, sismicidad, vulcanología, movimientos de ladera, mapeo de inundaciones con radar e hidrogeología costera de Guatemala.

DATOS DE LA PUBLICACIÓN / *Publication data*

Publicación: 27 de noviembre de 2026, Centro Universitario del Norte (CUNOR), Cobán, Alta Verapaz

Periodicidad: anual

Sitio web: https://revistasguatemala.usac.edu.gt/rgct/es

Carrera de Geología: https://www.geologiausac.com

Indexación y directorios: Latindex (Directorio); Editorial Data (directorio abierto de revistas científicas)

La correspondencia debe dirigirse a:

Ing. Geól. Luis Alfredo Godoy Morales

Carrera de Geología, Centro Universitario del Norte (CUNOR)

Universidad de San Carlos de Guatemala

7.ª calle 1-11 zona 6, Cobán, Alta Verapaz, Guatemala

PBX: 7956 6600, ext. 209

Correo: rgct.editorial@gmail.com

LICENCIA Y RESPONSABILIDAD / *License and disclaimer*

CC BY-NC-SA 4.0 Creative Commons

© 2026 Los autores. Este número 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.

Los artículos publicados en este número fueron sometidos a revisión por pares. El contenido, los datos y las opiniones de cada artículo son responsabilidad exclusiva de sus autores y no reflejan necesariamente la posición de la Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra, de la Carrera de Geología del CUNOR ni de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra
Guatemalan Journal of Earth Sciences
Vol. 13, núm. 1, enero a diciembre 2026 | ISSN impreso 2410-728X | ISSN electrónico 3106-0056

Comité Editorial

Editorial Board

EDITOR EN JEFE */ Editor-in-Chief*

Ing. Geól. Luis Alfredo Godoy Morales
Carrera de Geología, Centro Universitario del Norte (CUNOR), Universidad de San Carlos de Guatemala, Cobán, Alta Verapaz, Guatemala
luis.godoy@profesor.usac.edu.gt
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8554-1734

COEDITORA */ Co-Editor*

M.A. Ing. Geól. Andrea María Reiche de la Cruz
Carrera de Geología, Centro Universitario del Norte (CUNOR), Universidad de San Carlos de Guatemala, Cobán, Alta Verapaz, Guatemala
andrea.reiche@profesor.usac.edu.gt
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1751-7122

EDITORES DE SECCIÓN */ Section Editors*

Ing. Geól. Luis Alfonso Laj Hun
Carrera de Geología, Centro Universitario del Norte (CUNOR), Universidad de San Carlos de Guatemala, Cobán, Alta Verapaz, Guatemala
geoluis04@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0548-564X

Alejandra Marisol Mendoza Martínez
Carrera de Geología, Centro Universitario del Norte (CUNOR), Universidad de San Carlos de Guatemala, Cobán, Alta Verapaz, Guatemala
geologia.cunor@usac.edu.gt

Ing. Civil José Leonardo Rodas Barrios
Carrera de Geología, Centro Universitario del Norte (CUNOR), Universidad de San Carlos de Guatemala, Cobán, Alta Verapaz, Guatemala
leonardorodas.cunor@gmail.com

PRODUCCIÓN */ Production*

Diseño, diagramación y portada: Ing. Geól. Luis Alfredo Godoy Morales
Corrección de estilo: Comité Editorial RGCT
Revisión de textos en inglés: Comité Editorial RGCT

Contacto editorial:

rgct.editorial@gmail.com · https://revistasguatemala.usac.edu.gt/rgct/es · https://www.geologiausac.com

RGCT

Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra

Guatemalan Journal of Earth Sciences

Vol. 13, núm. 1, enero a diciembre 2026 | ISSN impreso 2410-728X | ISSN electrónico 3106-0056

Contenido

Contents

EDITORIAL */ Editorial*

Medio siglo de geología desde Cobán ..... **v**
Half a century of geology from Cobán
Comité Editorial RGCT

ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN */ Research articles*

1 **Reconocimiento microfaunal y de facies de las formaciones cretácicas al este del anticlinal Rubelsanto, Chisec, Alta Verapaz** **1**
Microfaunal and facies recognition of the Cretaceous formations east of the Rubelsanto anticline, Chisec, Alta Verapaz
Gabriela Alejandra Coronado Urrutia y Sergio David Morán Ical

2 **Secuencia sísmica de Santa María de Jesús–Palín (julio 2025): implicaciones para la tectónica activa y el campo de esfuerzos local** **19**
Santa María de Jesús–Palín seismic sequence (July 2025): implications for active tectonics and the local stress field
José Tojil, Helén Marina Morán Chén, Kevin Chún Quinillo y Josué Cuzco

3 **Caracterización preliminar de la erupción del volcán de Fuego del 2–4 de agosto de 2026** **31**
Preliminary characterization of the eruption of Fuego volcano on August 2–4, 2026
Carla María Fernanda Chún Quinillo, Dulce González, Kevin Chún Quinillo y Wendel Alexander Gutiérrez Paxtor

4 **Análisis geométrico del deslizamiento Las Cuevas, Chitul, Santa Cruz Verapaz, Guatemala** **51**
Geometric analysis of the Las Cuevas landslide, Chitul, Santa Cruz Verapaz, Guatemala
Sergio David Morán Ical, Luis Alfredo Godoy Morales, Andrea María Reiche de la Cruz y Brayan Vásquez

5 **Mapeo de inundaciones con Sentinel-1 tras Eta e Iota (2020): experiencia formativa en el Valle de Sula y Guatemala** **67**
Flood mapping with Sentinel-1 after storms Eta and Iota (2020): a training experience in the Sula Valley and Guatemala
Jaime Requena, Diego L. Mendoza M. y Victor O. Bac G.

ARTÍCULO DE REVISIÓN */ Review article*

6 **Modelos predictivos y gestión hidrogeológica para la intrusión de agua salada en acuíferos costeros de Guatemala** **83**
Predictive models and hydrogeological management of saltwater intrusion in coastal aquifers of Guatemala
Rudy Machorro Sagastume

RGCT

Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra

Guatemalan Journal of Earth Sciences

Vol. 13, núm. 1, enero a diciembre 2026 | ISSN impreso 2410-728X | ISSN electrónico 3106-0056

EDITORIAL

Sección: Editorial

Autoría: Comité Editorial RGCT

Medio siglo de geología desde Cobán

Half a century of geology from Cobán

En 2026, la Carrera de Geología del Centro Universitario del Norte (CUNOR) cumple 50 años. Medio siglo de clases, giras de campo, tesis y generaciones de geólogas y geólogos que aprendieron a leer el territorio guatemalteco desde Cobán. Una revista no alcanza para resumir esa historia, pero sí puede mostrar en qué anda hoy la geología que se hace en el país. Eso es, en buena medida, lo que reúne este número.

Este es el primer número del Vol. 13 de la *Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra*. Este mismo año, la revista publicó también el Vol. 13, Número Especial, con la memoria del VI Congreso Guatemalteco de Geociencias Ambientales (VI CGGA 2026), celebrado en octubre en las Verapaces bajo el lema «Evaluando peligros geológicos para la protección comunitaria». Aquel número reunió los resúmenes de las ponencias; este Vol. 13, núm. 1, presenta seis artículos completos que pasaron por revisión por pares y por el proceso editorial habitual de la revista.

El número abre con el trabajo de Gabriela Alejandra Coronado Urrutia y Sergio David Morán Ical sobre la microfauna y las microfacies de las formaciones cretácicas Cobán, Campur y Angostura al este del anticlinal Rubelsanto, en Chisec. El artículo surge de la tesis de grado de Coronado Urrutia en la Carrera de Geología del CUNOR. Es geología de base —estratigrafía, láminas delgadas, microfósiles— y es también el tipo de estudio con el que la Carrera ha ido completando, tesis tras tesis, el conocimiento geológico de las Verapaces.

Los dos artículos siguientes provienen del Instituto de Investigaciones de Ingeniería, Matemática y Ciencias Físicas (in3) de la Universidad Mariano Gálvez de Guatemala. Tojil y colaboradores analizan la secuencia sísmica de Santa María de Jesús–Palín de julio de 2025: su evolución espacio-temporal, los mecanismos focales y el campo de esfuerzos local, con implicaciones para la tectónica activa de la región. Chún Quinillo y colaboradores, del Observatorio Guatemalteco de Vigilancia Volcánica, ofrecen una primera caracterización de la erupción del volcán de Fuego del 2 al 4 de agosto de 2026, con monitoreo sísmico, imágenes satelitales y simulaciones de corrientes de densidad piroclástica y de lahares. Publicar un análisis así a menos de cuatro meses del evento muestra lo que puede aportar una revista nacional: rapidez, sin renunciar a la revisión.

Desde la propia Carrera, los profesores Sergio David Morán Ical, Luis Alfredo Godoy Morales y Andrea María Reiche de la Cruz, junto con Brayan Vásquez, egresado de la Carrera, estudian el deslizamiento de Las Cuevas, en Chitul, Santa Cruz Verapaz, que en agosto de 2024 obstruyó parcialmente la CA-14 y dejó sin energía eléctrica a Santa Cruz y San Cristóbal Verapaz durante varios días. Su análisis muestra cómo una falla orientada de forma desfavorable, la disolución kárstica y el corte al pie del talud se combinaron con las lluvias de la semana previa. Requena, Mendoza y Bac, de la Asociación Guatemalteca de Geociencias Ambientales (ASGA) y del CUNOR, relatan una experiencia formativa: el mapeo de inundaciones con radar Sentinel-1 en el

Valle de Sula durante las tormentas Eta e Iota, que estudiantes de la Carrera replicaron después en el valle del Polochic y en Campur. Es un buen ejemplo de cómo los datos y programas de libre acceso pueden llegar a las aulas y, desde ahí, a las comunidades afectadas.

Cierra el número una revisión de Rudy Machorro Sagastume sobre los modelos predictivos de la intrusión de agua salada en acuíferos costeros y las pautas para su gestión en Guatemala, un tema que ganará importancia a medida que crezcan la demanda de agua en las costas y el nivel del mar.

La portada también mira hacia la CA-14. En el km 143, en la aldea Santa Bárbara, San Jerónimo, Baja Verapaz, un corte de la carretera deja al descubierto pliegues en filitas: estructuras que registran la deformación de estas rocas metamórficas y que cualquiera puede ver desde el camino. La elegimos porque resume algo que la Carrera ha enseñado durante cincuenta años: la geología está en los afloramientos, a la orilla de la carretera, esperando que alguien se detenga a observarla. Unos kilómetros más adelante, en esa misma vía, ocurrió el deslizamiento de Las Cuevas; aprender a leer esas rocas es también una forma de prevenir.

Agradecemos a los autores, que atendieron con paciencia las observaciones de revisores y editores; a los revisores, cuyo trabajo anónimo sostiene la calidad de cada artículo, y a quienes, a lo largo de cinco décadas, han hecho de la Carrera de Geología del CUNOR un lugar donde se forman profesionales y se produce conocimiento sobre nuestro territorio. Que este número sea una manera de celebrarlo.

Invitamos a docentes, estudiantes, egresados y colegas de otras instituciones a enviar sus manuscritos al Vol. 14 de la *Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra*, que se publicará en 2027. Animamos en particular a quienes presentaron trabajos en el VI CGGA a convertir sus resúmenes en artículos completos. Los lineamientos para autores están disponibles en revistasguatemala.usac.edu.gt/rgct, y cualquier consulta puede dirigirse a rgct.editorial@gmail.com.

Comité Editorial
Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra
Cobán, Alta Verapaz, 27 de noviembre de 2026

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

Reconocimiento microfaunal y de facies de las formaciones cretácicas al este del anticlinal Rubelsanto, Chisec, Alta Verapaz

Microfaunal and facies recognition of the Cretaceous formations east of the Rubelsanto anticline, Chisec, Alta Verapaz

Gabriela Alejandra Coronado Urrutia[1,*] y Sergio David Morán Ical[1]

[1] Carrera de Geología, Centro Universitario del Norte (CUNOR), Universidad de San Carlos de Guatemala, Cobán, Alta Verapaz, Guatemala.

*** Autora de correspondencia:** coronadourrutia@gmail.com
Correo: katmical@profesor.usac.edu.gt
ORCID: Gabriela Alejandra Coronado Urrutia https://orcid.org/0009-0005-8912-5989; Sergio David Morán Ical https://orcid.org/0009-0006-0898-4683

Recibido: 03/08/2026 | **Aceptado:** 10/09/2026 | **Publicado:** 27/11/2026

Resumen

La montaña Rubelsanto forma parte de una estructura plegada y fallada, conformada por rocas calcáreas del Cretácico. Estratigráficamente abarca un intervalo de rocas calcáreas que corresponden a las formaciones Cobán, Campur y Angostura. Según los tipos de microfacies estándar (SMF), las características de estas formaciones se ubicaron dentro de los ambientes deposicionales de margen de plataforma profunda, *foreslope*, margen de plataforma de arrecifes, plataforma retrabajada, plataforma abierta (*lagoon*) y plataforma restringida. Microfósiles como miliólidos, *Merlingina cretacea*, *Biloculina* sp., *Nummoloculina heimi* y *Dicyclina schlumbergeri* fueron reconocidos y asignados a la Formación Cobán, mientras que *Vaughanina cubensis*, *Orbitoides apiculata*, *Sulcoperculina vermunti* y *Sulcoperculina globosa* se asignaron a la Formación Campur y, finalmente, *Chubbina jamaicensis*, Discocyclinidae, Pavonitinidae, *Cuneolina pavonia parva*, textuláridos, *Quinqueloculina* y fragmentos de algas, coral y rudistas, a la Formación Angostura.

Palabras clave: formaciones cretácicas; microfacies; microfauna; Rubelsanto

Abstract

Rubelsanto Mountain is part of a folded and faulted structure made up of Cretaceous limestones. Stratigraphically, it comprises an interval of carbonate rocks belonging to the Cobán, Campur and Angostura formations. Based on Standard Microfacies Types (SMF), these formations were placed in deep shelf margin, foreslope, platform-margin reef, winnowed platform edge, open platform (lagoon) and restricted platform depositional environments. Microfossils such as miliolids, *Merlingina cretacea*, *Biloculina* sp., *Nummoloculina heimi* and *Dicyclina schlumbergeri* were recognized and assigned to the Cobán Formation; *Vaughanina cubensis*, *Orbitoides apiculata*, *Sulcoperculina vermunti* and *Sulcoperculina globosa* to the Campur

Formation; and *Chubbina jamaicensis*, Discocyclinidae, Pavonitinidae, *Cuneolina pavonia parva*, textulariids, *Quinqueloculina* and fragments of algae, corals and rudists to the Angostura Formation.

Keywords: Cretaceous formations; microfacies; microfauna; Rubelsanto

Cómo citar este artículo (APA 7.ª ed.)
Coronado Urrutia, G. A., & Morán Ical, S. D. (2026). Reconocimiento microfaunal y de facies de las formaciones cretácicas al este del anticlinal Rubelsanto, Chisec, Alta Verapaz. *Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra, 13*(1), 1–17.

1. Introducción

Desde el contexto regional, podríamos considerar que el "anticlinal de Rubelsanto", pertenece a una serie de estructuras de origen tectónico, correspondiente al cinturón plegado y fallado de Chiapas-Guatemala que forma un arco este-oeste. Localmente se ha nombrado a este conjunto de trazas antiformes y sinformes como el cinturón plegado de Alta Verapaz. Los estratos de rocas calcáreas y clásticas del Mesozoico principalmente forman en su conjunto amplias planicies, como altos topográficos como la montaña Rubelsanto.

El análisis que se propone, se basa principalmente en el reconocimiento sobre el contenido de la microfauna, existentes en las formaciones cretácicas, principalmente formación Cobán, Campur y Angostura. Los recorridos realizados dentro de esta zona, permitió colectar y ubicar espacialmente una serie de muestras de calizas, las cuales se prepararon en el laboratorio petrográfico de la Carrera de Geología del Centro Universitario del Norte, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

La interpretación de las estructuras presentadas en el mapa geológico es el resultado del análisis tanto del modelo del terreno, así como de imágenes digitales, que permitieron delinear los potenciales rasgos estructurales. Por lo que, su caracterización, requiere su reconocimiento en campo, tanto en los cortes de carretera como de exposiciones existentes en el interior de la montaña Rubelsanto. La principal vía de acceso es sobre la Franja Transversal del Norte (FTN), principal vía ubicada al norte de la montaña (Figura 1), que comunica a las localidades de Playa Grande y Raxruhá (Figura 1).

Figura 1

Ubicación del sitio de estudio (recuadro en rojo) dentro de su contexto regional en el departamento de Alta Verapaz



2. Metodología

2.1 Análisis de la información existente

En esta etapa se recopiló y analizó la información concerniente a investigaciones realizadas con anterioridad en el área, tanto de mapas geológicos, como de informes de estudios locales y regionales. Se consultó material bibliográfico que incluyó libros y revistas, así como fuentes web y otros medios electrónicos. Asimismo, se analizó fotografías aéreas, ortofotos, que ayudaron a delimitar las unidades geológicas, suficiente para llevar a cabo dicho proyecto.

2.2 Visita de campo

Se visitó el lugar de trabajo, con el objetivo de realizar el reconocimiento del área, para luego hacer el levantamiento geológico respectivo a través del método de caminamiento. Mediante el caminamiento (carreteras, veredas y quebradas) se recopilaron datos estructurales y litológicos, ubicación de afloramientos y toma de muestras considerando los distintos tipos texturales de las calizas, con el objeto de poder reconocer a que formación estratigráfica pertenecen, concerniente al cuadrángulo Canrujá, escala 1:50 000, serie 2163 IV. Las muestras permitieron observar la presencia del contenido microfaunal, para luego ser corroborados mediante el análisis de laboratorio. El datum utilizado para el mapa base y GPS corresponde al sistema WGS84.

2.3 Laboratorio

Consistió en la preparación de secciones delgadas de las rocas recolectadas. Lo anterior con el objeto de hacer un análisis de microfacies (Flügel, 2010) de las diferentes unidades litológicas expuestas en el área, determinando así

subambientes sedimentarios, así como la clasificación de Dunham (1962) y Folk (1959) para determinar las características texturales. Esta etapa se llevó a cabo en el laboratorio petrográfico del Centro Universitario del Norte.

3. Resultados

3.1 Geología del sitio

Basados en la caracterización de las formas de los microorganismos contenidos en las diferentes muestras, logramos organizar en función de ello la estratigrafía reconociendo la presencia de las formaciones: *Cobán, Campur y Angostura*, formaciones pertenecientes al Cretácico medio a superior. Otra unidad reconocida a lo largo de los caminamientos fue la formación Sepur, conformada de una secuencia monótona de lutitas y areniscas. Las siguientes notas, están enfocados en las unidades calcáreas, como objeto de estudio.

3.2 Formación Cobán

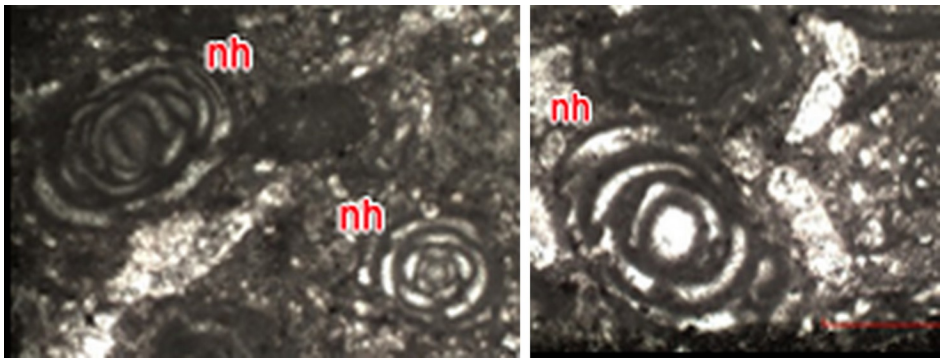
Se ha identificado principalmente al norte del anticlinal, una estructura con tendencia N70W, correspondiente al complejo cinturón plegado y fallado de Chiapas-Alta Verapaz. Para ubicación y distribución se tomaron cuatro muestras (Ar15 Ar18, Ar58 y Ar69), donde se identificaron con un porcentaje de 30% a 40% de presencia de *Nummoloculina heimi* (Figura 2) y *Biloculina sp*.

Otras formas de microorganismos corresponden a: *Merlingina cretacea* y *Dicyclina schlumbergeri*. Siendo *N. heimi* el microfósil de referencia para la formación Cobán.

En muestra de campo, la roca se observa con una coloración gris, una textura wackestone, packstone y grainstone, encontrándose levemente meteorizada, formando suelos residuales de textura arcillosa.

Figura 2

Foraminífero perteneciente a la Formación Cobán, miembro superior



Nota. Nummoloculina heimi (nh).

3.3 Formación Campur

Esta formación es la de mayor presencia en el área de estudio cerca de la localidad de Tierra Linda 1, San Carlos y cerca del arroyo El Santo. Según el análisis de secciones delgadas, ya que en campo se confunde con la Formación Cobán. Posee una fauna típica de arrecife y de aguas profundas.

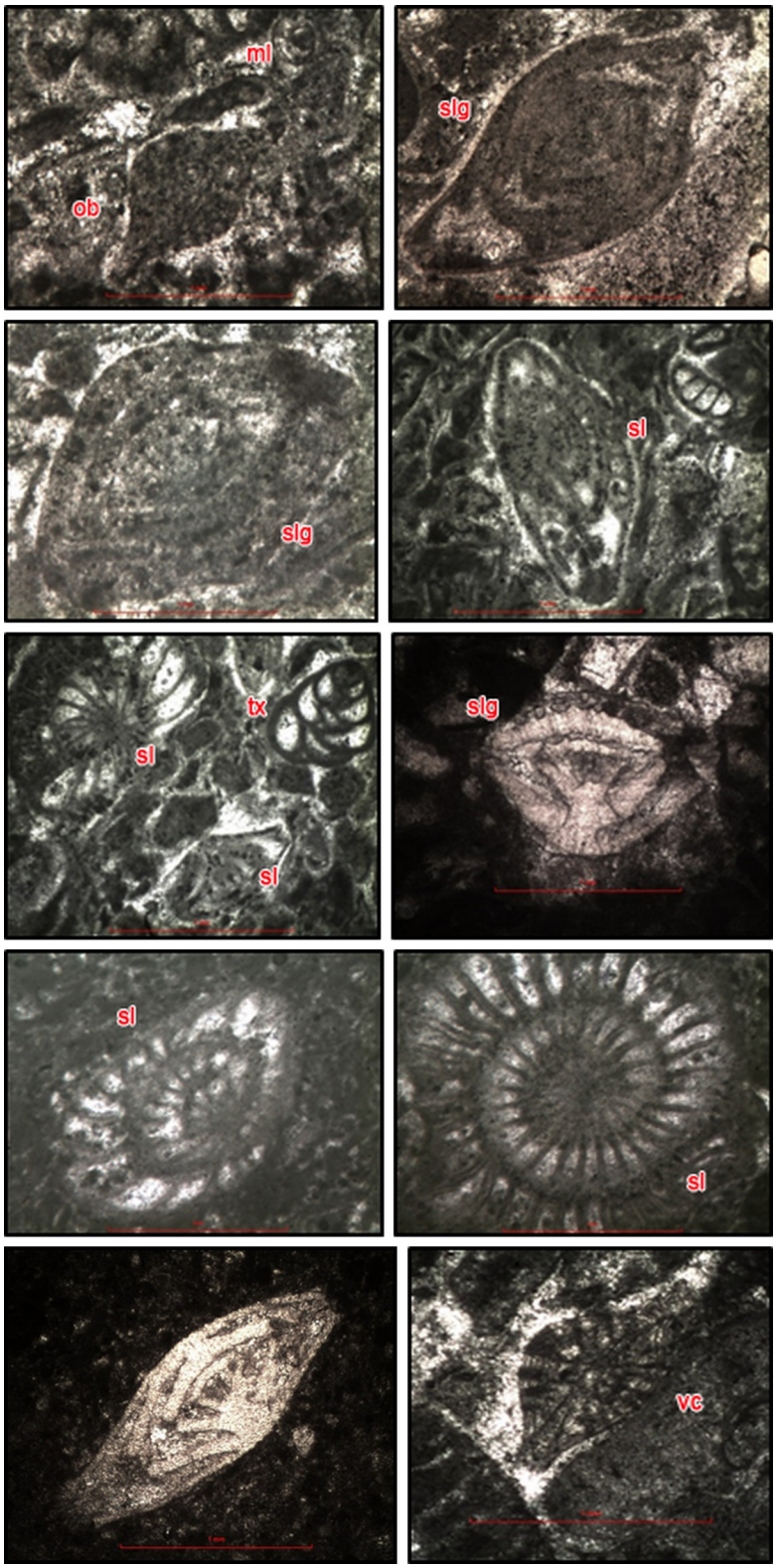
En campo, la roca se observa de gris claro a beige, karstificada, presentando una textura wackestone-packstone.

Las muestras representativas para esta formación, según lo observado en secciones delgadas son: Ar11, Ar29, Ar48, Ar50, Ar63, Ar65, Ar81, Ar90, Ar100 y Ar101. Presentan una textura que va de packstone a grainstone, bioesparita, siendo la Ar65 una wackestone biomicrita (Figura 3).

La microfauna encontrada principalmente es *Sulcoperculina* con un 20-40% de presencia siendo en las de mayor incidencia en las muestras Ar65 y Ar81, miliólidos con un 10-20%, *Merlingina cretacea* 5%, textuláridos 15%, alveolínidos 5-10%, *Dicyclina schlumbergeri* 5-15%, fragmentos de rudistas 10-20%, fragmentos de algas 5-10%, también se encontraron *Vaughanina cubensis* (10%), *Orbitoides apiculata* (20%) y *Sulcoperculina globosa* (15%), variando el porcentaje en cada una de las muestras (Figura 3).

Figura 3

Principales formas de microorganismos asignados a la Formación Campur



Nota. Sulcoperculina (sl), textulárido (tx), *Orbitoides apiculata* (ob), *Sulcoperculina globosa* (slg), miliólido (ml), *Vaughanina cubensis* (vc).

3.4 Formación Angostura

Las rocas de la Formación Angostura, consiste en calizas fosilíferas y dolomías con intercalaciones de margas. Sus límites, aunque tectónicos, están asociados a la formación Campur, extremo este y sur del área.

En el análisis de laboratorio, se lograron identificar como parte de esta formación las muestras Ar14, Ar34 (ubicadas al lado izquierdo del eje del anticlinal), Ar36 y Ar46 ubicadas al suroeste del área de estudio, con una textura packstone a grainstone, bioclástica y bioesparita peletoidal.

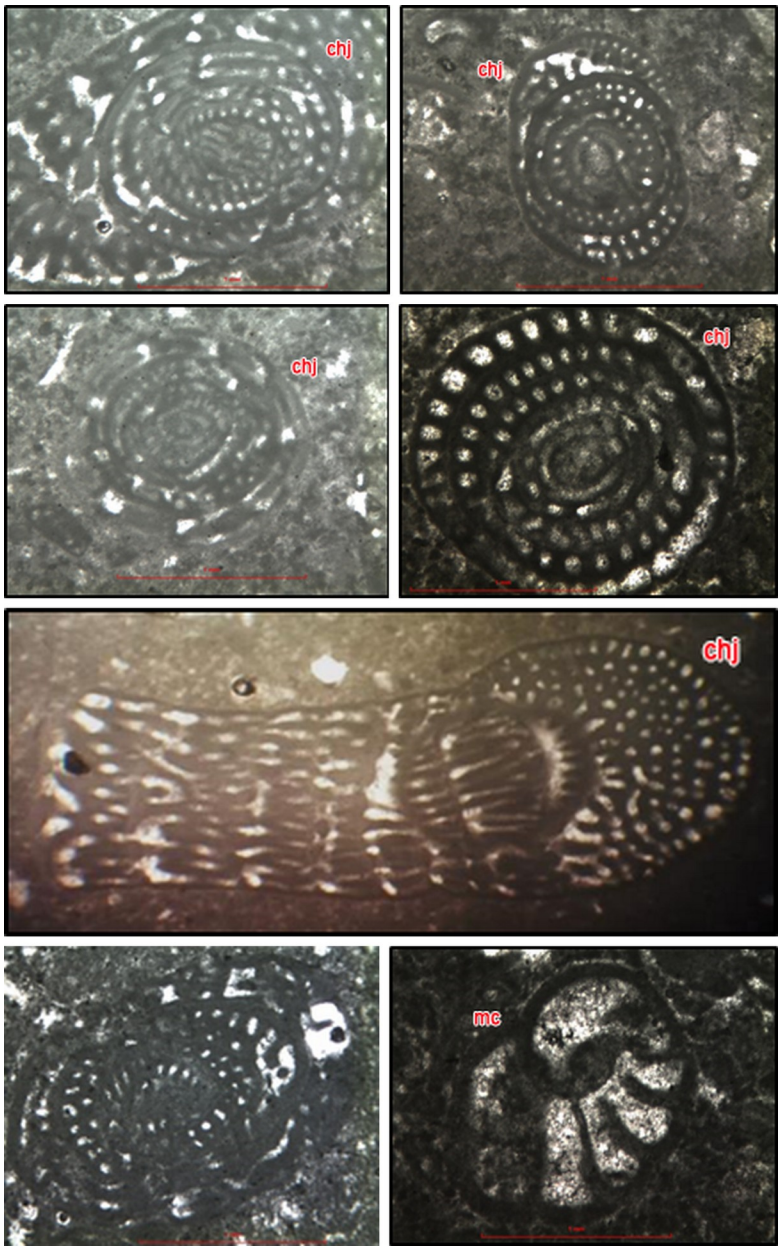
La Ar14 se clasificó en sección delgada, como una caliza bioclástica peletoidal, con una textura packstone. En campo, las calizas exhiben una coloración gris claro, con una textura wackestone, afectado por procesos kársticos.

Los microfósiles encontrados en esta muestra son: *Dicyclina schlumbergeri* (15%), textuláridos (10%), miliólidos (20%), *Merlingina cretacea* (10%), *Chubbina jamaicensis* (35%) (Figura 4).

La muestra Ar34, observada al microscopio, es una caliza bioclástica, de textura packstone a grainstone, bioesparita. En campo, la roca se observa beige claro, con textura packstone, karstificada, levemente meteorizada y fracturada. Se encontraron microfósiles como *Chubbina jamaicensis* (25%), miliólidos (20%), textuláridos (15%), *Merlingina cretacea* (10%) (Figura 4). *Chubbina jamaicensis es el foraminífero de referencia para esta formación.*

Figura 4

Diferentes cortes de foraminíferos bentónicos y otros de la Formación Angostura en la zona este del anticlinal de Rubelsanto



Nota. Chubbina jamaicensis (chj), *Merlingina cretacea* (mc).

Con respecto a sus límites, se han interpretado en su mayor parte de tipo tectónico, pero algunos indicadores suponen su contacto estratigráfico de tipo transicional, aunque por la cobertura vegetal dificulta caracterizar dicho límite estratigráfico. El contacto superior de la Cobán de acuerdo con Vinson (1962), es conformable y gradual hacia la Formación Campur que se distingue por su contenido de microfósiles, estratificación más delgada y lisa, y una textura fina.

4. Discusión

4.1 Características de las calizas

A manera de contrastar las características litológicas observadas en muestra de mano, se puede decir que los distintos ejemplares de roca del área cubierta se pueden agrupar en las facies según se lista en la Tabla 1. Así mismo, a manera de relacionar estas características (escala macro) con la microfacies, se asigna un color (arbitrario), para su contraste con la identificación de zonas y SMF, mostradas en la Tabla 2.

Tabla 1

Principales facies calcáreas dentro del contexto de la montaña Rubelsanto

Facies	Color asignado
Facies de caliza bioclástica	
Facies de caliza mudstone	
Facies de caliza bioclástica peletoidal	
Facies de caliza litoclástica	
Facies de caliza arrecifal	
Facies de caliza bioclástica con nódulos de arcilla	
Facies de caliza cristalina	

Nota. El color se asigna de forma arbitraria para relacionar las facies de muestra de mano con las microfacies de la Tabla 2.

4.2 Análisis de microfacies con base en los modelos SMF

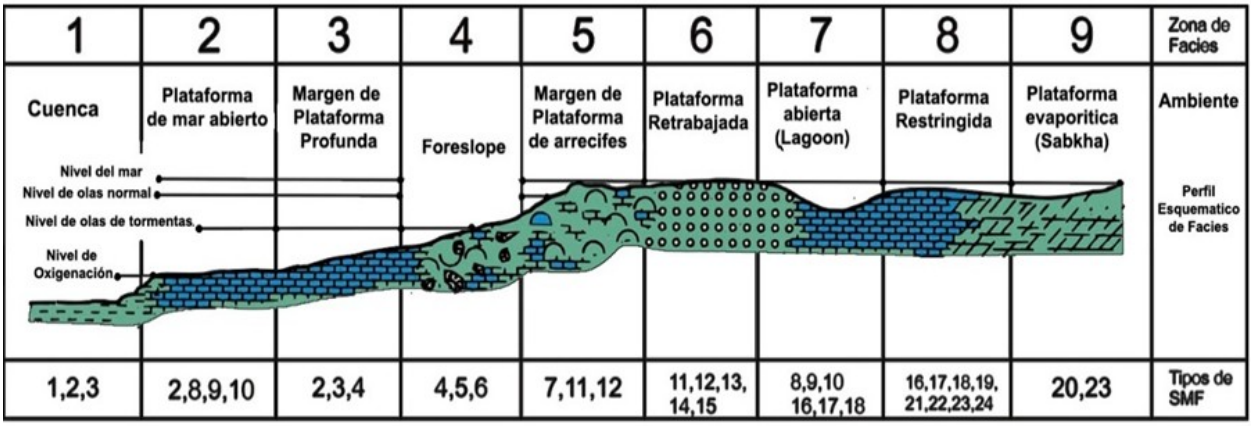
Una microfacie es el estudio y caracterización de facies sedimentarias, mediante el análisis de secciones delgadas de una muestra de roca, teniendo como objetivo principal, la caracterización de las rocas carbonatadas, determinando: el tipo, forma y tamaño del grano, el tipo y forma de los fósiles, el cemento o matriz y la fábrica de los granos, los cuales son relacionados con las condiciones de deposición, logrando interpretar su ambiente sedimentario.

Para el análisis de microfacies se utilizó la propuesta de Wilson (1975, como se citó en Boggs, 1992, p. 463) y Flügel (2010), los cuales proponen un número restringido de tipos de microfacies, como un modelo para determinar las microfacies carbonatadas, sin considerar la edad de las rocas.

El estudio de las microfacies de Wilson (1975) denominada: Standard microfacies types (SMF), pueden ser agrupadas dentro de *"zonas"* de facies, las cuales son utilizadas luego para construir un modelo deposicional generalizado para las rocas carbonatadas (Figura 5).

Figura 5

Ambientes de depositación generalizados, zonas de facies y tipos de SMF



Nota. Tomado de Espinel y Hurtado (2010).

De acuerdo con el modelo SMF (Figura 5) se ha reconocido las distintas SMF para las muestras colectadas (Tabla 2), donde las principales zonas según nuestro análisis fueron: *3, 4, 5, 6, 7 y 8* (Figura 5 y Tabla 2).

Tabla 2

Caracterización e identificación de zonas y tipos de SMF de las muestras

ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	ZONA 5	ZONA 6	ZONA 7	ZONA 8	ZONA 9	MUESTRA	Formación
						10			Ar 6	
						18			Ar 7	Angostura
						18			Ar 9	Campur
				11					Ar 11	Campur
				11					Ar 12	Campur
				11					Ar 13	
						18			Ar 14	Angostura
			5						Ar 15	Cobán
						9			Ar 17	Cobán
				11					Ar 18	
				11					Ar 19	Cobán
							16		Ar 20	Campur
				11					Ar 21	Campur
				11					Ar 25	Angostura
				11					Ar 26	Angostura
						16			Ar 27	Angostura
			4						Ar 29	Campur
				11					Ar 31	Campur
				11					Ar 32	Campur
				11					Ar 34	
							18		Ar 35	Angostura
		4							Ar 36	Angostura
						17			Ar 39	
				11					Ar 41	Angostura
						18			Ar 42	Angostura
						11			Ar 45	Angostura
				11					Ar 46	Angostura
				11					Ar 48	Campur
				11					Ar 50	
			5						Ar 52	Campur
						17			Ar 55	Angostura
						16			Ar 56	
						11			Ar 58	Cobán
						7			Ar 60	
				11					Ar 61	
			5						Ar 63	Cobán
			5						Ar 65	Campur
					14				Ar 68	Campur
				11					Ar 69	
						18			Ar 70	
						18			Ar 71	Cobán
						10			Ar 72	Cobán
						18			Ar 75	Cobán
						18			Ar 76	Cobán
					11				Ar 77	Cobán
					11				Ar 78	Angostura
					11				Ar 79	Angostura
					11				Ar 80	Campur
		4							Ar 81	Campur
						18			Ar 83	Campur
					11				Ar 84	
				11					Ar 85	Angostura
					11				Ar 86	Angostura
			5						Ar 87	Angostura
			4						Ar 90	Campur
						10			Ar 92	Campur
			4						Ar 93	Campur
				11					Ar 94	Campur
				11					Ar 95	Campur
				11					Ar 97	Campur
				11					Ar 98	Campur
						18			Ar 99	Campur
				11					Ar 100	Campur
				11					Ar 101	Campur

La **zona de facie 3** se denomina ambiente de margen de plataforma profunda, aquí se ubican las muestras representativas Ar36 y Ar81, que representan sitios cercanos al ambiente de margen de plataforma de arrecife, esto corresponden a muestras obtenidas de las formaciones Campur y Angostura (Tabla 2). Las muestras distintivas para el ambiente de Foreslope o **zona de facie 4**, se encuentran las muestras Ar29 y Ar93 que se relacionan con un tipo SMF 4, que corresponde a microbrecha o packstone bioclástico-litoclástico; mientras las muestras Ar15, Ar52, Ar63, Ar65 y Ar87 corresponden a un tipo SMF 5, packstone floatstone o grainstone bioclástico.

Estos tipos de SMF (4-5) se refieren principalmente a la constitución de bioclástos y algunos litoclástos, provenientes localmente o de la parte superior de los arrecifes, con probable influencia del oleaje. Las formaciones que presentan estas características son: Cobán, Campur y Angostura.

Para la **zona 5** o ambiente de margen de plataforma de arrecifes. Las muestras que sugieren y podemos localizar dentro de ese ambiente deposicional, es la SMF correspondiente al tipo 11, grainstone con bioclástos cubiertos por cemento de esparita, esta se refiere a bioclástos cementados con cemento esparítico, en donde los bioclástos pueden estar micritizados, en su mayoría corresponden a una facie bioclástica y facie arrecifal. Veinticuatro muestras con estas características pertenecen principalmente a la formación Campur y Angostura.

Este tipo de facie dependen de la energía del agua, la inclinación de la pendiente, la productividad orgánica, uniones, entrampamientos, cementación, entre otros. Se genera una alta acumulación de restos orgánicos, con lodo carbonatado, así como también asociaciones entre algas y corales principalmente. Por lo que, para esta zona, el contenido de la microfauna presente es muy variado.

El ambiente deposicional **zona 6**, plataforma retrabajada, se refiere a un ambiente de cambios constantes. Aquí se ubican las muestras Ar68 con un SMF 14 (lags), y las muestras Ar77, Ar78, Ar79, Ar80, Ar84, Ar86 con un SMF 11 (grainstone con bioclástos cubiertos por cemento de esparita). Entre estas, la mayoría corresponden a una facie de caliza bioclástica peletoidal. Representan las formaciones Angostura, Campur y Cobán, según la frecuencia.

El ambiente deposicional, plataforma abierta o lagoon, corresponde según el modelo, a la **zona 7**, se localiza en estrechas lagunas y bahías abiertas detrás del borde de plataforma externa. La profundidad del agua generalmente es somera.

Para este ambiente las muestras Ar6, Ar72 y Ar92 se clasifican dentro del tipo SMF 10, las cuales en los granos muestran características como una evidencia de formación en ambientes de alta energía, pero contienen una matriz lodosa. Las muestras Ar27 y Ar56 un tipo SMF 16, pelesparita o grainstone peletoidal. Estos se refieren en parte a las formaciones Cobán, Campur y Angostura.

El tipo SMF 17, se caracterizó para las muestras Ar39 y Ar55, las cuales muestran características como mezclas de facies peloides aislados, peloides aglutinados y granos agregados. Se determinó que las muestras Ar45 y Ar58 corresponden a un SMF 11, el cual refiere a un grainstone con bioclástos cubiertos por cemento de esparita. Correspondiendo a la Angostura y Cobán.

Las muestras Ar7, Ar9, Ar14, Ar42, Ar70, Ar71, Ar75, Ar76, Ar83 y Ar99 corresponden a un SMF 18, grainstone de foraminíferos o algas, consiste en concentraciones comúnmente mezcladas con peloides, se puede observar en algunas muestras la sustitución de calcita en los fósiles.

Se clasifica dentro del tipo SMF 9, la muestra Ar17, siendo una caliza wackestone bioclástica, y la muestra Ar60 a un tipo SMF 7.

El contenido micropaleontológico encontrado principalmente corresponde a alveolinidos, merlinginas, miliólidos, textulárido, sulcoperculina, dicyclina (macroforaminiferos), algunos fragmentos de coral, fragmentos de rudistas, fragmentos de algas calcáreas y pellets. Mostrando una textura grainstone en su mayoría y packstone-grainstone. Veintiún muestras

representan este tipo de zona, abarcando las tres formaciones.

La zona 8 corresponde al ambiente de plataforma restringida, aquí se incluyen la mayor parte de los sedimentos finos en lagunas muy someras y los sedimentos gruesos en canales de marea y playas locales. Son condiciones muy variables difíciles para los organismos.

Las muestras localizadas para este ambiente deposicional, se encuentran Ar20 con un tipo SMF 16, en donde caracteriza probablemente pelets fecales, mezclados con ostrácodos o foraminíferos; es una muestra de facie peletoidal de textura packstone-grainstone, con contenido micropaleontológico de *Nummoloculina heimi, miliólidos*, fragmentos de rudistas, merlinginas y sulcoperculinas; y la muestra Ar35 se relaciona con un SMF 18, grainstone de foraminíferos o algas, comúnmente mezcladas con peloides. El contenido microfosilífero consiste en miliólidos deformados, algas calcáreas y fragmentos de rudistas.

De igual manera, el análisis de microfacies también puede ser relacionada con el modelo propuesto por Flügel para los tipos RMF, ubicando las muestras recolectadas dentro de una rampa homoclinal. En este caso, este estudio se basó en el modelo según Wilson (1975, como se citó en Boggs, 1992, p. 463) y Flügel (2010).

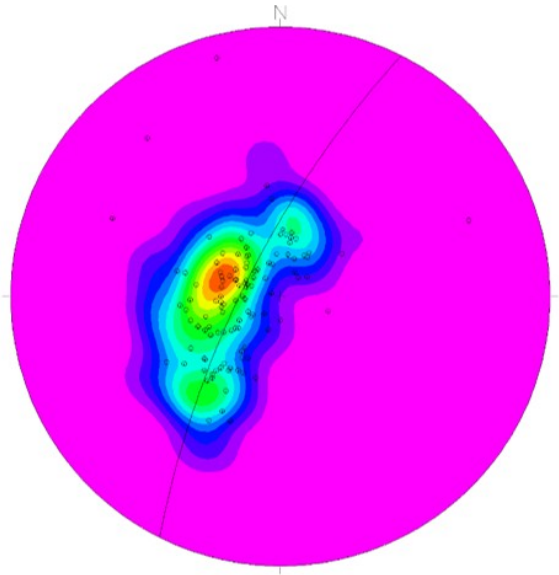
4.3 Distribución espacial de las formaciones

Considerando el contenido de microfósiles de referencia de cada formación en la región, se propone una distribución espacial de estas rocas en la parte este de la montaña Rubelsanto. Para la formación Cobán, se ha identificado al sur del sector de la localidad de Tierra Linda 2 extendiéndose hacia la aldea Verapaz. Luego las formaciones Campur y Angostura, se ubican en los alrededores de Tierra Linda 1 y San Carlos. Al sur de la estructura (pliegue), carretera que conduce a la localidad de la Aldea Yalchacte, se encuentran estas dos unidades.

Los planos de estratificación orientados y analizado mediante red estereográfica (Figura 6) definen una estructura plegada con un eje orientado 20°/N120, definiendo una inmersión hacia el sureste.

Figura 6

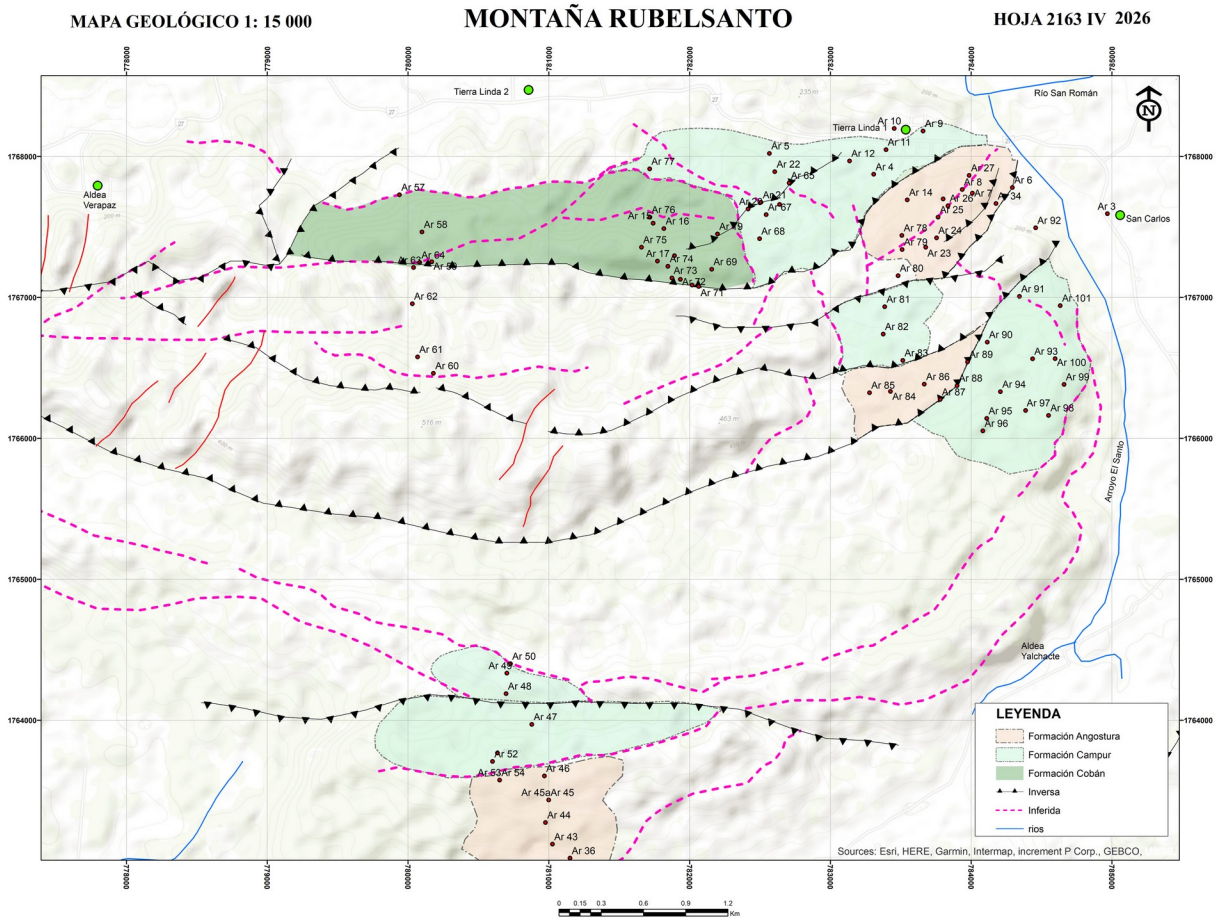
Red estereográfica con los contornos de igual densidad de polos de estratificación



Considerando los rasgos estructuras (lineamientos) analizados mediante modelo de elevación o imágenes digitales, se proponen una serie de estructuras de tipo inverso, las cuales a nuestro criterio ponen en contacto las tres unidades (Figura 7).

Figura 7

Mapa geológico del sector este de la montaña Rubelsanto, Alta Verapaz



5. Conclusiones

Se identificaron siete facies siendo estas: *caliza bioclástica*, con textura packstone-grainstone (bioesparita), *caliza peletoidal* (packstone-grainstone y wackestone), de *caliza bioclástica peletoidal* (wackestone grainstone), *caliza litoclástica*, *caliza arrecifal* (packstone-grainstone) y *caliza cristalina*, las cuales, de acuerdo con las características de formación tipo según el modelo SMF, se localizaron dentro de los ambientes deposicionales margen de plataforma profunda, *foreslope*, margen de plataforma de arrecifes, plataforma retrabajada, plataforma abierta (lagoon) y plataforma restringida.

Los microfósiles encontrados en las muestras de roca fueron: Miliólidos, *Merlingina cretacea*, Biloculina sp., *Nummoloculina heimi, Dicyclina schlumbergeri* asociadas a la formación Cobán, mientras que *Vaughanina cubensis*, *Orbitoides apiculata, Sulcoperculina vermunti y Sulcoperculina globosa* a la formación Campur y finalmente *Chubbina jamaicensis*, Discocyclinidae, Pavonitinidae, *Cuneolina pavonia parva*, Textuláridos, Quinqueloculina, fragmentos de algas, fragmentos de coral y de rudistas asignados a la formación Angostura.

La formación Campur, la de mayor predominancia dentro del área y validado a través de secciones delgadas con microfósiles

representativa de la formación como: Sulcoperculina vermunti, Sulcoperculina globosa, Vaughanina cubensis, y Orbitoides apiculata, basado en sus características microfaunales se clasifica dentro de los ambientes SMF, como ambientes de margen de plataforma de arrecifes, *foreslope* y margen de plataforma profunda. Con respecto a la formación Angostura se clasificó dentro de los ambientes SMF de plataforma abierta y margen de plataforma de arrecifes.

Sus contactos mayormente son tectónicas e interpretadas como fallas inversas, de tendencia este-oeste (E-W).

Agradecimientos

A los ingenieros geólogos Jorge de la Cruz y Carlos de León, quienes fueron un apoyo fundamental en el inicio de este proceso. A los comunitarios que acompañaron en las visitas de campo.

Contribución de los autores

Gabriela Alejandra Coronado Urrutia: conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, administración del proyecto, visualización y redacción (borrador original). Sergio David Morán Ical: análisis formal, supervisión, visualización y redacción (revisión y edición).

Financiamiento

Esta investigación no recibió financiamiento externo

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Disponibilidad de datos

Los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles a través del autor de correspondencia previa solicitud razonable.

Referencias

Ambientes y facies. (s. f.). Recuperado el 20 de noviembre de 2015, de http://www.geociencias.unam.mx/~rmolina/documents/Ambientesyfacies.pdf

Boggs, S., Jr. (1992). *Petrology of sedimentary rocks*. Macmillan.

Butterlin, J. (1981). *Claves para la determinación de macroforaminíferos de México y del Caribe, del Cretácico Superior al Mioceno Medio*. Instituto Mexicano del Petróleo.

Características de las series de suelo. (s. f.). Recuperado el 11 de mayo de 2015, de http://ide.segeplan.gob.gt/tablas/tablas_municipal/pdfs/10_Tablas_Suchi/Territorio3/tabla_41_10_03.pdf

Conkin, B., & Conkin, M. (1958). *Revision of the genus Nummoloculina and emendation of Nummoloculina heimi Bonet*. University of Cincinnati, Department of Geology and Geography.

Dionisio, M. (2006). *Diagnóstico socioeconómico, potencialidades productivas y propuestas de inversión* [Ejercicio Profesional Supervisado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Facultad de Ciencias Económicas.

Donnelly, T. W., Horne, G. S., Finch, R. C., & López Ramos, E. (1990). *Northern Central America: The Maya and Chortís blocks* (M. Chiquín, Trad.; cap. 3). Geological Society of America; CUNOR.

Dunham, R. J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. En W. E. Ham (Ed.), *Classification of carbonate rocks* (AAPG Memoir 1, pp. 108–121). American Association of Petroleum Geologists.

Espinel, V., & Hurtado, J. (2010). *Petrografía y análisis facial de las rocas calcáreas aflorantes de la sección Tunja–Villa de Leiva, Boyacá* [Trabajo de grado, Universidad de Caldas]. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

Flügel, E. (2010). *Microfacies of carbonate rocks: Analysis, interpretation and application* (2.ª ed.). Springer.

Folk, R. L. (1959). Practical petrographic classification of limestones. *AAPG Bulletin, 43*(1), 1–38.

Fourcade, E., Piccioni, L., Escribá, J., & Rosselo, E. (1999). Cretaceous stratigraphy and palaeoenvironments of the Southern Petén Basin, Guatemala. *Cretaceous Research, 20*(6), 793–811.

González, C. (2002). *Correlación y modelado geológico de las unidades del Cobán C1-C9 dentro del campo petrolero Rubelsanto, Chisec, Alta Verapaz* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Centro Universitario del Norte.

Grupo de Modelización Geoquímica, Universidad de Zaragoza. (s. f.). *Clasificación de rocas carbonatadas*. Recuperado el 15 de noviembre de 2015, de https://dokumen.tips/documents/clasificacion-de-rocas-carbonatadasgmg.html

Instituto Geográfico Nacional. (1980). *Mapa topográfico de Guatemala: Hoja Canrujá (2163 IV)* [Mapa, escala 1:50 000]. IGN.

Meteorización y erosión. (s. f.). Recuperado el 19 de mayo de 2015, de https://es.scribd.com/document/406072151/GEOLOGIA-Y-GEOMORFOLOGIA-docx

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. (2001). *Base de datos del Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica* [Base de datos]. SIG-MAGA.

Oviedo, A. (2005). *Rudistas del Cretácico Superior del centro al sureste de México (recuento sistemático de rudistas americanos)* [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona]. http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/3440/aog1de1.pdf

Pecheux Martin, J. (2002). *Desde miliólidos a alveolínidos (foraminíferos largos): la fauna del Cretácico Superior y del Terciario tardío de Chiapas (sureste de México)* [Tesis doctoral, Universidad de Niza].

Pérez Bol, E. R. (2000). *Léxico estratigráfico del Bloque Chortí en Guatemala* [Informe de graduación de técnico en geología, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Centro Universitario del Norte.

Scott, R. W. (1995). Cretaceous rudists of Guatemala. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 12*(2), 294–306.

Sosa Matta, C. N., Fuentes, M., & Bosbeli, M. (2006). *Diagnóstico socioeconómico, potencialidades productivas y propuestas de inversión* [Trabajo de grado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Facultad de Ciencias Económicas.

Suelos Chisec. (s. f.). Recuperado el 20 de julio de 2021, de http://www.deguate.com/municipios/pages/alta-verapaz/chisec/recursos-naturales.php

Vásquez Hernández, O. J. (2010). *Los microfósiles en las formaciones geológicas de Guatemala* [Material del curso de Micropaleontología]. Centro Universitario del Norte, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Vinson, G. L. (1962). Upper Cretaceous and Tertiary stratigraphy of Guatemala. *AAPG Bulletin, 46*(4), 425–456.

Wilson, J. L. (1975). *Carbonate facies in geologic history*. Springer-Verlag.

Sobre los autores

Gabriela Alejandra Coronado Urrutia

Ingeniera geóloga egresada de la Carrera de Geología del Centro Universitario del Norte (CUNOR) de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), en Cobán, Alta Verapaz. Este artículo surge de su trabajo de graduación. Correo: coronadourrutia@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8912-5989

Sergio David Morán Ical

Ingeniero geólogo y profesor de la Carrera de Geología del CUNOR-USAC desde 1998, donde imparte cursos teórico-prácticos y promueve la interacción de sus estudiantes con profesionales de otras universidades, así como la asesoría académica como proceso de mejora continua. Ha desarrollado proyectos de cartografía geológica nacional a escala 1:50 000, como los cuadrángulos Granados y El Chol y, en 2026, la hoja Cobán, lo que le ha permitido integrarse a grupos de investigación internacionales de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y de la Universidad de Missouri-Kansas City. Actualmente lidera el proyecto «Evaluación de amenaza natural y estado actual de la infraestructura de escuelas públicas», del programa IGeoEs, con el propósito de fortalecer las capacidades de la Comisión Escolar para la Reducción de Desastres (CERED) del Ministerio de Educación (MINEDUC) y de las municipalidades de Alta Verapaz. Correo: katmical@profesor.usac.edu.gt. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0898-4683

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.

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

Secuencia sísmica de Santa María de Jesús–Palín (julio 2025): implicaciones para la tectónica activa y el campo de esfuerzos local

Santa María de Jesús–Palín seismic sequence (July 2025): implications for active tectonics and the local stress field

José Tojil[1], Helén Marina Morán Chén[1,*], Kevin Chún Quinillo[1] y Josué Cuzco[1]

[1] Instituto de Investigaciones de Ingeniería, Matemática y Ciencias Físicas (in3), Universidad Mariano Gálvez de Guatemala, 3.ª avenida 9-00, zona 2, Interior Finca El Zapote, Ciudad de Guatemala, Guatemala.

*** Autor de correspondencia:** helen.moran@umg.edu.gt

Correos: jose.tojil@umg.edu.gt; kevin.chun@umg.edu.gt; josue.cuzco@umg.edu.gt

ORCID: José Tojil https://orcid.org/0009-0008-5432-2941; Helén Marina Morán Chén https://orcid.org/0009-0002-2802-0612; Kevin Chún Quinillo https://orcid.org/0000-0001-5996-1285; Josué Cuzco https://orcid.org/0000-0001-8924-7779

Recibido: 16/10/2026 | **Aceptado:** 15/11/2026 | **Publicado:** 27/11/2026

Resumen

En la región de Santa María de Jesús, Sacatepéquez, Guatemala, a partir del 8 de julio de 2025 se registró una secuencia sísmica caracterizada por un evento premonitor de magnitud ML 4.8, seguido por un sismo principal de Mw 5.7 y más de 800 réplicas. El objetivo de este estudio fue analizar la evolución espacio-temporal de la secuencia sísmica y caracterizar el campo de esfuerzos asociado, con el propósito de interpretar las implicaciones en la tectónica activa local. Con datos del Servicio Sismológico de Guatemala (SSG) y de estaciones de banda ancha (FDSN), se determinaron mecanismos focales mediante FMNEAR y a partir de estas soluciones se realizó la inversión del tensor de esfuerzos mediante STRESSINVERSE. Los resultados muestran un predominio de mecanismos de rumbo y un campo de esfuerzos caracterizados por σ_1 y σ_3 subhorizontales y σ_2 próximo a la vertical, consistente con un régimen de esfuerzos de tipo strike-slip. Se identificaron dos familias de planos nodales de orientación NE-SO y NO-SE, compatible con una configuración de fallamiento conjugado. La sismicidad presenta además una geometría aparente en forma de "L", con dos orientaciones principales. La integración de la sismicidad, los mecanismos focales y el campo de esfuerzos sugiere un control de estructuras corticales con diferentes orientaciones bajo un régimen de esfuerzos predominantemente transcurrente. Estos resultados aportan evidencia para caracterizar la tectónica activa y comprender las estructuras que acomodan la deformación cortical en la región de Santa María de Jesús–Palín.

Palabras clave: campo de esfuerzos; fallamiento de rumbo; mecanismos focales; tectónica activa

Abstract

In the Santa María de Jesús region of Sacatepéquez, Guatemala, beginning on July 8, 2025, a seismic sequence was recorded, characterized by a foreshock with a magnitude of ML 4.8,

followed by a mainshock with a magnitude of Mw 5.7 and more than 800 aftershocks. The objective of this study was to analyze the spatiotemporal evolution of the seismic sequence and characterize the associated stress field, with the aim of interpreting the implications for local active tectonics. Using data from the Guatemalan Seismological Service (SSG) and broadband stations (FDSN), focal mechanisms were determined using FMNEAR, and based on these solutions, the stress tensor was inverted using STRESSINVERSE. The results show a predominance of strike-slip mechanisms and a stress field characterized by subhorizontal σ1 and σ3 components and a nearly vertical σ2 component, consistent with a strike-slip stress regime. Two families of nodal planes with NE-SW and NW-SE orientations were identified, consistent with a configuration of conjugate faulting. Seismicity also shows an apparent "L"-shaped geometry with two main orientations. The integration of seismicity, focal mechanisms, and the stress field suggests control by crustal structures with different orientations under a predominantly strike-slip stress regime. These results provide evidence for characterizing active tectonics and understanding the structures that accommodate crustal deformation in the Santa María de Jesús–Palín region.

Keywords: active tectonics; focal mechanisms; stress field; strike-slip faulting

Cómo citar este artículo (APA 7.ª ed.)
Tojil, J., Morán Chén, H. M., Chún Quinillo, K., & Cuzco, J. (2026). Secuencia sísmica de Santa María de Jesús–Palín (julio 2025): implicaciones para la tectónica activa y el campo de esfuerzos local. *Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra, 13*(1), 19–30.

1. Introducción

La actividad sísmica de Guatemala responde a un contexto tectónico complejo en el que, además de las principales fuentes asociadas con los límites entre las placas de Norteamérica, Caribe y Cocos, existe sismicidad cortical relacionada con estructuras tectónicas localizadas dentro de la placa Caribe (Authemayou et al., 2011; Guzmán-Speziale & Molina, 2022; Garnier et al., 2022). Parte de la deformación tectónica se distribuye hacia el interior de la placa Caribe mediante estructuras secundarias, entre las que se encuentran las fallas Jalpatagua y Jocotán-Chamelecón, así como estructuras extensionales asociadas con los grabens de la Ciudad de Guatemala e Ipala. En este contexto el estudio de la sismicidad cortical y su relación con las estructuras tectónicas locales constituye un elemento importante para comprender cómo se distribuye la deformación y cuáles son las condiciones de esfuerzos que favorecen la actividad sísmica en la región.

Una de las áreas que ha registrado actividad cortical corresponde al sector comprendido entre Santa María de Jesús, Sacatepéquez, y Palín, Escuintla, donde se han documentado distintos episodios sísmicos durante los últimos años. En 2019 se registró actividad de tipo enjambre en el departamento de Sacatepéquez, principalmente en el flanco noreste del volcán de Agua (INSIVUMEH, 2019). Posteriormente, en enero de 2024, se registró una secuencia sísmica en el límite departamental entre Guatemala y Sacatepéquez (INSIVUMEH, 2024). Estos antecedentes evidencian la ocurrencia de sismicidad cortical en distintos períodos en sectores próximos al área de estudio y plantean

la necesidad de evaluar su posible relación con las estructuras tectónicas locales.

En este sector el 8 de julio de 2025 se inició una secuencia sísmica en la región de Santa María de Jesús–Palín, caracterizada por la ocurrencia de un evento precursor de magnitud local (ML) de 4.8, seguido por un evento principal de magnitud de momento (Mw) 5.7 y más de 800 réplicas hasta diciembre de 2025. La concentración espacial de los eventos y la disponibilidad de registros instrumentales permitieron analizar su evolución y relación con las estructuras tectónicas locales. En este contexto, la integración de la distribución de la sismicidad, los mecanismos focales y la inversión del campo de esfuerzos permite caracterizar el régimen tectónico predominante del área, contribuyendo a la comprensión de fuentes sismogénicas locales.

Para abordar estos aspectos el análisis de los mecanismos focales constituye una herramienta que permite caracterizar la cinemática y analizar su relación con las estructuras tectónicas. Sin embargo, su interpretación presenta limitaciones relacionadas con la incertidumbre de las observaciones y la ambigüedad entre los dos planos nodales de cada solución (Hardebeck & Shearer, 2002). De manera complementaria la inversión de mecanismos focales permite estimar las orientaciones de los esfuerzos principales y caracterizar el régimen de esfuerzos asociado con la actividad sísmica (Vavryčuk, 2014). La integración de estos resultados con el análisis espacial y temporal de la sismicidad proporciona una base para interpretar las características sismotectónicas de regiones donde las estructuras responsables de la actividad sísmica no están completamente identificadas.

Por todo lo anterior, el objetivo de este estudio es analizar la evolución espacio-temporal de la secuencia sísmica de Santa María de Jesús–Palín iniciada en julio de 2025 y caracterizar el campo de esfuerzos local asociado, con el propósito de interpretar sus implicaciones para la tectónica activa del sector. Para ello, se examinan la distribución espacial de la sismicidad, su comportamiento temporal y frecuencia–magnitud, así como los mecanismos focales determinados mediante FMNEAR (Delouis, 2014) y las orientaciones de los esfuerzos principales obtenida mediante la inversión del tensor de esfuerzos (Vavryčuk, 2014).

2. Materiales y métodos

La detección y localización de la secuencia sísmica se realizó a partir de los registros de la red instrumental del Servicio Sismológico de Guatemala (SSG), integrada por estaciones de banda ancha, período corto y acelerógrafos distribuidos en el territorio nacional. Se compiló un catálogo de eventos registrados del 8 de julio al 31 de diciembre de 2025, considerando localizaciones revisadas y un mínimo de seis fases sísmicas identificadas; para complementar la información, se incorporaron registros de estaciones internacionales disponibles mediante FDSN *Web Services de EarthScope Data Services* para mejorar la cobertura azimutal y aumentar el número de fases utilizadas en la localización hipocentral. Las señales fueron revisadas y procesadas manualmente mediante *scolv* de SeisComP. El análisis espacio-temporal consideró los eventos localizados entre 14.35°–14.55° N y 90.78°–90.60° O, considerando el tiempo de origen, localización hipocentral y magnitud. La distribución espacial de los eventos se representó cartográficamente para identificar patrones de concentración y su relación con las estructuras geológicas y la geometría de fallas del sector. A partir de esta información, se examinó la distribución espacial de la sismicidad para reconocer patrones de concentración y su posible relación con las estructuras geológicas y las fallas cartografiadas en el sector. La evolución temporal se evaluó mediante la distribución de

magnitudes, el número diario de eventos y el ajuste de las relaciones de Omori–Utsu y Gutenberg–Richter, utilizadas para caracterizar el decaimiento temporal de la actividad sísmica y la distribución frecuencia–magnitud, respectivamente (Guglielmi, 2017; Utsu et al., 1995; Palacios et al., 2006). Para caracterizar la geometría y cinemática de las fuentes sísmicas, se determinaron mecanismos focales mediante FMNEAR (Delouis, 2014), para eventos con ML ≥ 3.0, utilizando como criterios de selección un mínimo de 10 polaridades, cuatro formas de onda de diferentes estaciones y una adecuada cobertura azimutal. Las formas de onda fueron procesadas mediante filtros pasa banda definidos en función de la magnitud de cada evento y las soluciones focales obtenidas se analizaron mediante los parámetros de rumbo (strike), buzamiento (dip) y ángulo de deslizamiento (rake), además de los ejes de presión (P) y tensión (T), y se clasificaron según su régimen de fallamiento. Posteriormente, el campo de esfuerzos local se estimó mediante la inversión de los mecanismos focales utilizando STRESSINVERSE (Vavryčuk, 2014), a partir de los parámetros de entrada los valores de strike, dip y rake. Este procedimiento permitió obtener las orientaciones de los esfuerzos principales (σ_1, σ_2 y σ_3) y la relación de forma del tensor de esfuerzos (R). Finalmente, los resultados de la inversión se analizaron conjuntamente con la distribución espacial de la sismicidad, las orientaciones de los planos nodales y la información geológica disponible, incorporando además antecedentes sísmicos de 2019 y 2024, incluidos mecanismos focales representativos, para comparar las características espaciales y cinemáticas de los distintos períodos de actividad e interpretar sus implicaciones para la tectónica activa local.

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos permiten caracterizar la evolución espacio-temporal de la secuencia sísmica de Santa María de Jesús–Palín, las características geométricas y cinemáticas de los mecanismos focales y el campo de esfuerzos local. La integración de estos elementos proporciona una base para interpretar el comportamiento sismotectónico de la secuencia y discutir sus implicaciones para la tectónica activa del sector.

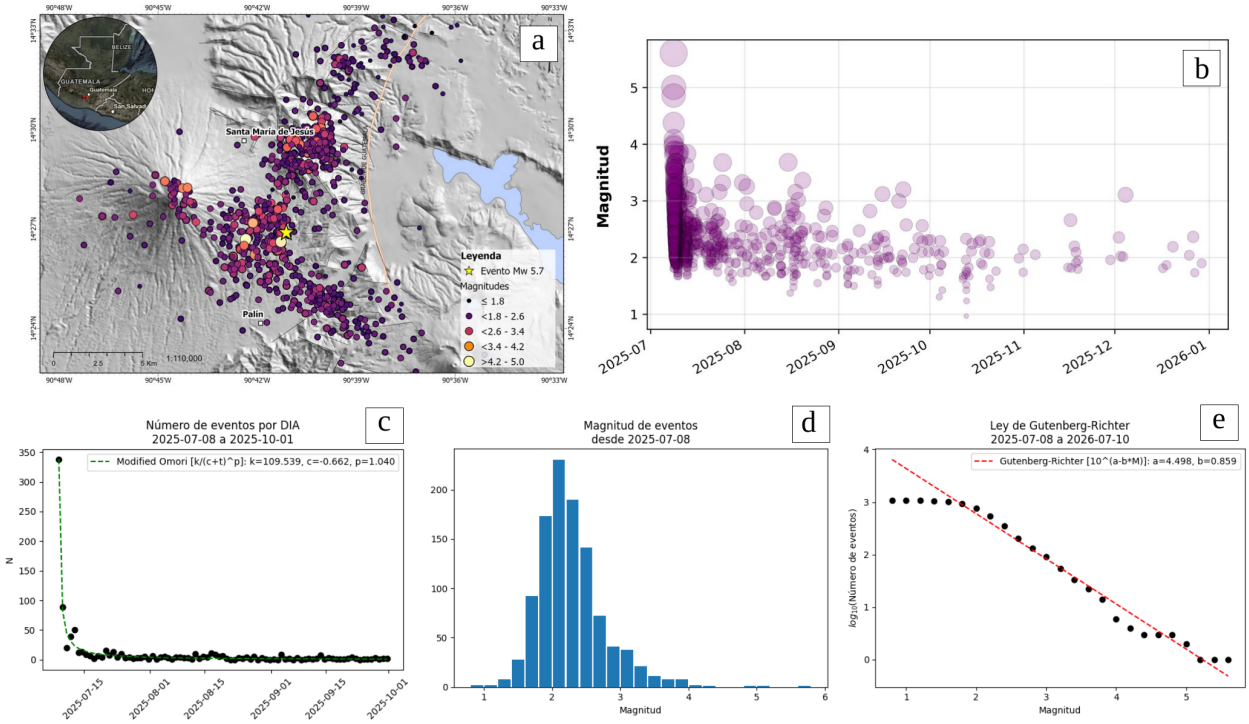
3.1 Evolución espacio-temporal de la secuencia

La distribución espacial de la secuencia sísmica muestra una concentración principal de epicentros en los alrededores de Santa María de Jesús y Palín, con una mayor densidad de eventos en el sector central del área de estudio y una distribución más dispersa hacia el norte (Figura 1a). Los agrupamientos presentan distintas orientaciones preferenciales, lo que permite reconocer variaciones en la disposición espacial de la sismicidad. Estas características proporcionan una base para examinar posteriormente su posible relación con las orientaciones de los planos nodales y las estructuras tectónicas del sector.

La evolución magnitud-tiempo (Figura 1b) muestra una disminución progresiva de la actividad posterior al evento principal, tanto en la frecuencia de ocurrencia como en las magnitudes registradas. El ajuste de la Ley Modificada de Omori-Utsu (Utsu et al., 1995) al número diario de réplicas proporciona valores de $k = 110 \pm 13$, $c = -0.66 \pm 0.06$ y $p = 1.04 \pm 0.08$ (Tabla 1). El valor de p, cercano a 1, es compatible con el comportamiento esperado para una secuencia principal-réplicas y describe un decaimiento rápido durante los primeros días, seguido por una tasa de ocurrencia considerablemente menor durante el resto del período analizado.

Figura 1

Distribución espacial de la secuencia y evolución magnitud-tiempo



Nota. a) Epicentros de la secuencia registrada a partir del 8 de julio de 2025; la estrella representa el evento principal (Mw 5.7). b) Magnitud de los eventos en función del tiempo. c) Número diario de eventos sísmicos y ajuste de la ley modificada de Omori-Utsu. d) Distribución de frecuencias de magnitud de los eventos registrados. e) Relación frecuencia-magnitud acumulada y ajuste de la ley de Gutenberg-Richter. Elaboración propia con datos del Servicio Sismológico de Guatemala (SSG).

La distribución de frecuencias de magnitud aumenta hacia magnitudes menores y alcanza su máxima frecuencia alrededor de M = 2.0, valor adoptado como magnitud de completitud (Mc). Considerando los eventos con magnitud igual o superior a este umbral, el ajuste de la relación Gutenberg-Richter (Gutenberg & Richter, 1944) proporciona a = 4.498 ± 0.017 y b = 0.859 ± 0.004. En conjunto, la evolución temporal, el decaimiento de la tasa de ocurrencia y la distribución frecuencia-magnitud permiten caracterizar el comportamiento de la secuencia. Estos resultados complementan el análisis de la distribución espacial de la sismicidad, los mecanismos focales y el campo de esfuerzos, proporcionando un contexto temporal y estadístico para interpretar la actividad sismotectónica del sector.

Tabla 1

Parámetros estadísticos de la secuencia sísmica de Santa María de Jesús–Palín

Parámetro	Valor	Descripción
Evento principal	5.7 Mw	Sismo principal de la secuencia
Período analizado	8 jul – 31 dic de 2025	Intervalo temporal del catálogo
N.º de eventos (total / M ≥ Mc)	884 / 681	Total de eventos / eventos con M ≥ 2.0
Mc	2.0	Magnitud de completitud
k	110 ± 13	Parámetro de productividad (Omori-Utsu)
c	−0.66 ± 0.06	Constante temporal (ley de Omori-Utsu)
p	1.04 ± 0.08	Tasa de decaimiento (ley de Omori-Utsu)
a	4.498 ± 0.017	Nivel de actividad (Gutenberg-Richter)
b	0.859 ± 0.004	Relación frecuencia-magnitud (Gutenberg-Richter)

Nota. Los parámetros k, c y p corresponden al ajuste de la ley modificada de Omori-Utsu; a y b, a la relación Gutenberg-Richter. Para el análisis frecuencia-magnitud se considera una magnitud de completitud Mc = 2.0. Elaboración propia con datos del Servicio Sismológico de Guatemala (SSG).

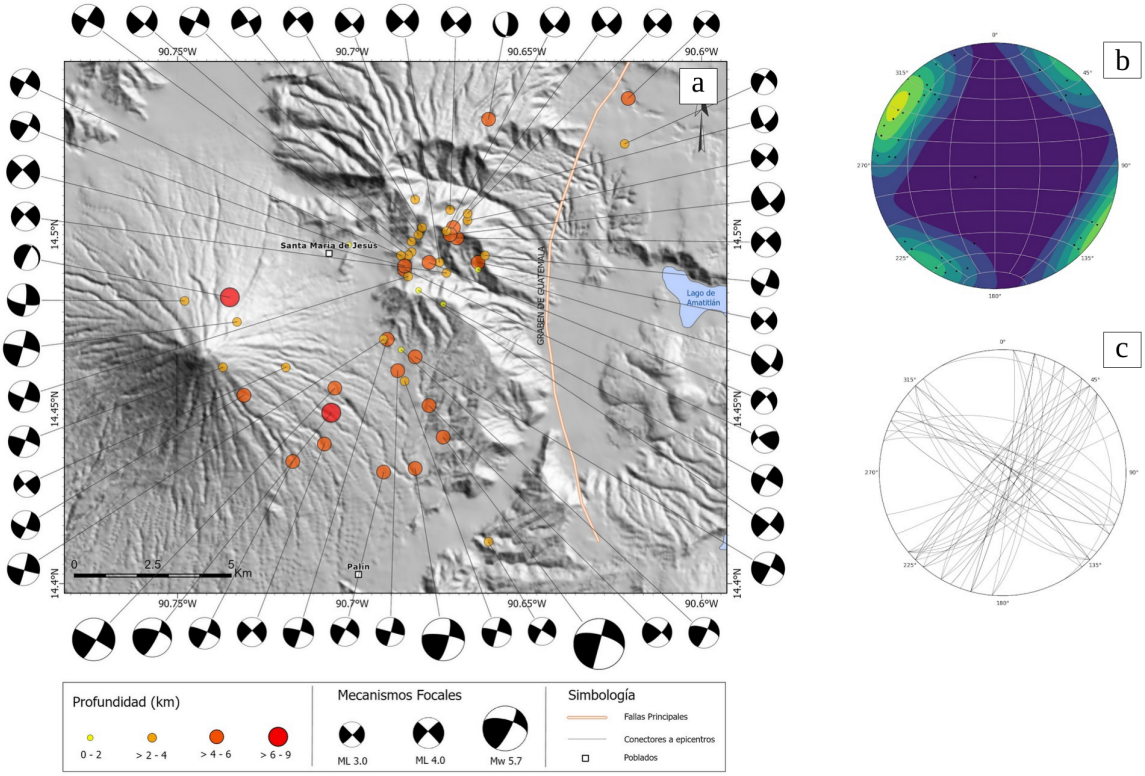
3.2 Geometría y cinemática de los mecanismos focales

Se obtienen 53 mecanismos focales para la secuencia de Santa María de Jesús-Palín (Figura 2a). El análisis de los parámetros de rumbo (strike) y buzamiento (dip) de los planos nodales permitió reconocer orientaciones preferenciales, con una concentración principal alrededor de 40°–50° y 220°–230°, correspondiente a una tendencia NE–SO, y otra aproximadamente entre 130°–140° y 310°–320°, con tendencia NO–SE (Figura 2c). A pesar de la dispersión entre las soluciones individuales, el diagrama de densidad (Figura 2b) permite distinguir estas orientaciones predominantes. Asimismo, los buzamientos se concentran principalmente entre 70° y 90°, lo que indica un predominio de planos nodales de inclinación alta a subvertical.

La clasificación de los 53 mecanismos focales muestra un predominio de soluciones de fallamiento de rumbo (strike-slip), con 43 mecanismos (81.1 %), seguidos por seis de fallamiento inverso (TF), dos inversos-oblicuos (TS), uno normal (NF) y uno normal-oblicuo (NS). Esta distribución evidencia que la cinemática transcurrente constituye el tipo de movimiento predominante durante la secuencia, aunque también se identifican componentes de deformación inversa y normal en una proporción menor.

Figura 2

Distribución espacial de los mecanismos focales y orientación de los planos nodales de la secuencia sísmica de Santa María de Jesús–Palín



Nota. a) Distribución espacial de los mecanismos focales según la localización y magnitud de los eventos. b) Diagrama estereográfico de densidad de orientaciones de los planos nodales. c) Proyección estereográfica de los planos nodales mediante círculos máximos. Elaboración propia con datos del Servicio Sismológico de Guatemala (SSG).

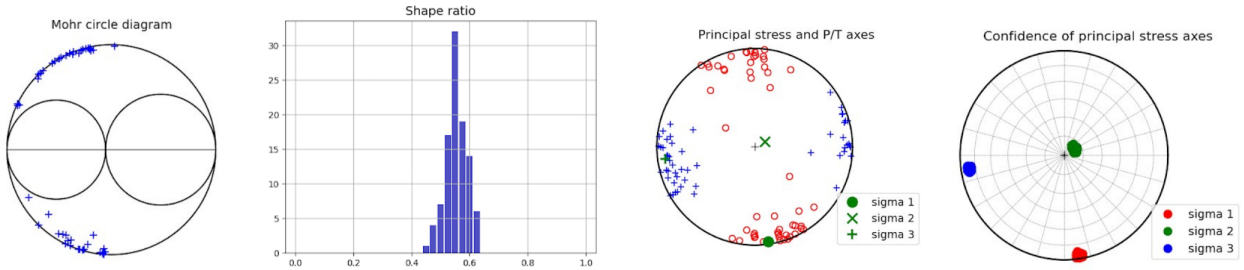
Las orientaciones preferenciales de los planos nodales (Figura 2c), junto con el predominio de mecanismos de rumbo y altos ángulos de buzamiento sugieren la posible participación de estructuras corticales con diferentes orientaciones, sin embargo, los mecanismos focales definen dos planos nodales posibles para cada evento y, por sí solos, no permiten determinar con certeza cuál corresponde al plano físico activado. Por esta razón, la interpretación de las posibles estructuras involucradas se realiza considerando conjuntamente la distribución espacial de la sismicidad, las orientaciones de los planos nodales y el campo de esfuerzos obtenido mediante la inversión.

3.3 Campo de esfuerzos local

La inversión de los 53 mecanismos focales permitió estimar el campo de esfuerzos local asociado con la secuencia sísmica de Santa María de Jesús–Palín. Los esfuerzos principales presentan las siguientes orientaciones: σ_1 con azimut 171.7° e inmersión de 3.3°, σ_2 con azimut 61.3° e inmersión de 80.7°, y σ_3 con azimut 262.2° e inmersión de 8.7°. Estos resultados indican que σ_1 y σ_3 son subhorizontales, con orientaciones aproximadas N–S y E–O, respectivamente, mientras que σ_2 presenta una orientación cercana a la vertical. Esta configuración corresponde a un régimen de esfuerzos predominantemente transcurrente, consistente con el predominio de mecanismos focales de rumbo identificado en la secuencia.

Figura 3

Resultados de la inversión del tensor de esfuerzos de la secuencia sísmica



Nota. a) Diagrama de Mohr de los esfuerzos normalizados. b) Distribución de la relación de forma (R) del tensor de esfuerzos. c) Proyección estereográfica de los ejes P y T de los mecanismos focales y de los esfuerzos principales (σ_1, σ_2 y σ_3). d) Orientación de los ejes principales del tensor de esfuerzos y sus regiones de confianza. Resultados obtenidos mediante STRESSINVERSE. Elaboración propia a partir de datos del Servicio Sismológico de Guatemala (SSG).

La distribución de los ejes P y T (Figura 3c) muestra una concentración de los ejes P próxima a la orientación de σ_1 y de los ejes T alrededor de σ_3, lo que evidencia coherencia entre las orientaciones derivadas de los mecanismos focales y el tensor de esfuerzos estimado. La inversión proporciona además una relación de forma R ≈ 0.53, cuya distribución se concentra alrededor del valor estimado. En el círculo de Mohr, los planos considerados muestran dos agrupaciones con signos opuestos de esfuerzo cortante. En conjunto, estos resultados permiten examinar la compatibilidad entre las orientaciones de los planos nodales, la cinemática de los mecanismos focales y el campo de esfuerzos local, proporcionando elementos para discutir la posible participación de estructuras con distintas orientaciones en la actividad sismotectónica del sector.

3.4 Implicaciones para la tectónica activa

La integración de la distribución espacial de los eventos, los mecanismos focales y el campo de esfuerzos permite reconocer una tendencia NO–SE que podría estar asociada con la orientación de estructuras corticales activas en el área de estudio (Figura 4). La disposición de los epicentros, en conjunto con las soluciones de los mecanismos focales, es compatible con un régimen de deformación predominantemente transcurrente, en el cual algunas estructuras de orientación NO–SE podrían presentar una componente de movimiento lateral derecho o dextral. Los mecanismos focales correspondientes a la actividad sísmica de 2019 y 2024 también muestran características compatibles con fallamiento de rumbo, lo que sugiere que este tipo de deformación no se limita a la secuencia de julio de 2025, sino que podría estar relacionado con la actividad recurrente de estructuras corticales en la región.

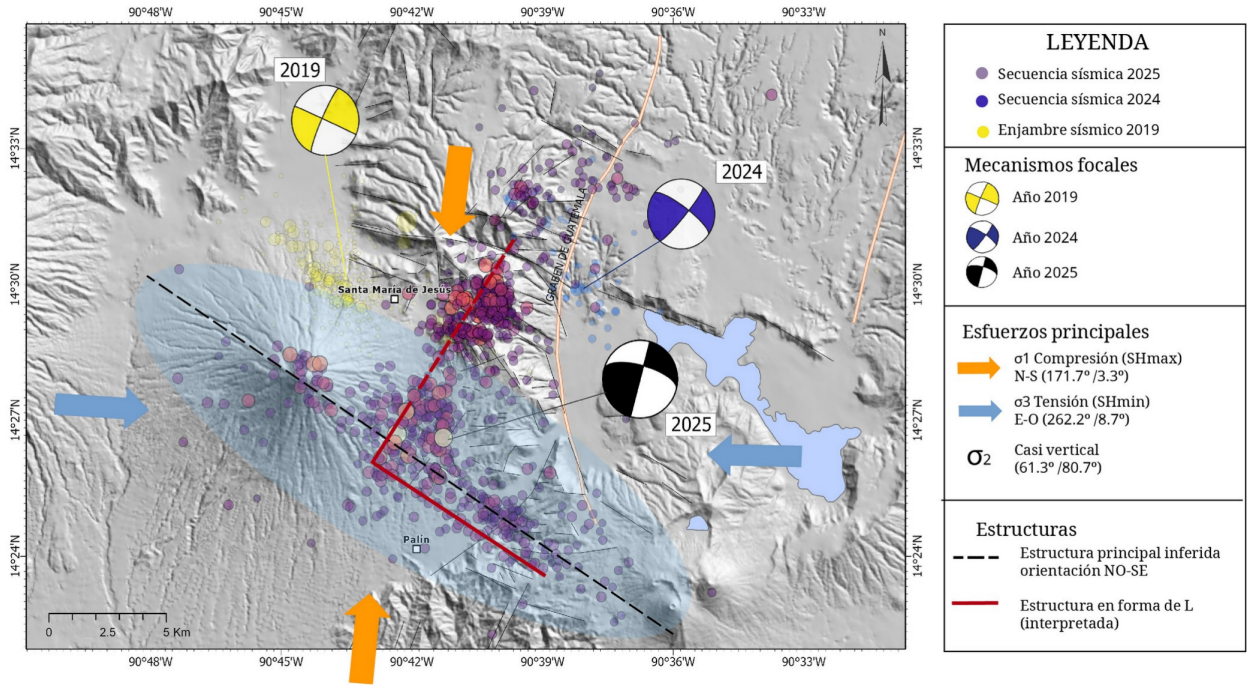
El predominio de mecanismos focales de tipo transcurrente es coherente con los resultados de la inversión del campo de esfuerzos, caracterizado por un esfuerzo principal máximo (σ_1) aproximadamente horizontal y orientado N–S, un esfuerzo principal mínimo (σ_3) aproximadamente horizontal y orientado E–O, y un esfuerzo intermedio (σ_2) cercano a la vertical. Esta configuración corresponde a un régimen de esfuerzos predominantemente transcurrente (*strike-slip*) y es compatible con la actividad de estructuras de distintas orientaciones bajo un mismo campo de esfuerzos.

Asimismo, la distribución epicentral de la sismicidad muestra una geometría aparente en forma de "L", definida por concentraciones de eventos con orientaciones diferentes (Figura 4). Esta configuración se distingue al considerar

conjuntamente la secuencia de 2025 y la actividad sísmica registrada en años anteriores. La disposición espacial observada podría reflejar la participación de más de una estructura cortical, en lugar de una ruptura concentrada sobre un único plano de falla. Sin embargo, esta interpretación requiere considerar la distribución de los hipocentros en profundidad y la posible relación entre las distintas concentraciones de sismicidad.

Figura 4

Distribución de la sismicidad de 2019, 2024 y 2025 e interpretación sismotectónica del sector



Nota. Distribución espacial de la sismicidad y mecanismos focales representativos de la registrada en 2019, 2024 y 2025 y las orientaciones de los esfuerzos principales. La línea negra discontinua representa la orientación inferida de una posible estructura sismogénica NO–SE, mientras que la línea roja indica una geometría estructural aparente en forma de "L", interpretada a partir de la distribución de los eventos. Las flechas representan las orientaciones horizontales de los esfuerzos principales σ_1 y σ_3. Elaboración propia con datos sismológicos del Servicio Sismológico de Guatemala (SSG).

La interpretación de estos resultados debe considerar la complejidad tectónica regional. Guzmán-Speziale y Molina (2022), en su revisión de la sismicidad y el fallamiento activo de Guatemala, describen diferentes fuentes de sismicidad cortical asociadas con los principales sistemas de fallas y otras estructuras tectónicas del país. Por su parte, Maurer et al. (2026), mediante la integración de información sísmica, geológica y geodésica, muestran que la deformación cortical en Guatemala no se concentra exclusivamente en las fallas principales, sino que también es acomodada por estructuras secundarias y deformación distribuida. En este contexto, las orientaciones preferenciales de la sismicidad y el campo de esfuerzos estimado para Santa María de Jesús–Palín son compatibles con la participación de estructuras corticales locales dentro de un marco regional de deformación complejo.

En el área de estudio, la identificación de dos familias de orientaciones, NE–SO y NO–SE, junto con los elevados ángulos de buzamiento de los planos nodales y el predominio de mecanismos de rumbo, plantea la posibilidad de una configuración de fallamiento conjugado. La disposición de ambas familias respecto al campo de esfuerzos estimado es compatible con la

existencia de estructuras de diferente orientación capaces de acomodar deformación transcurrente. No obstante, esta interpretación debe considerarse preliminar, debido a que la relación cinemática entre ambas familias y la identificación de los planos de falla efectivamente activados no han sido establecidas de manera independiente.

En conjunto, la secuencia de julio de 2025 aporta evidencia sismológica para caracterizar el régimen de esfuerzos y las posibles orientaciones y cinemáticas de las estructuras corticales involucradas en la actividad tectónica del sector Santa María de Jesús–Palín. La integración de estos resultados con los antecedentes sísmicos de 2019 y 2024 sugiere que la actividad transcurrente constituye una característica recurrente de la región. Sin embargo, la identificación de las estructuras responsables requiere información geológica y estructural complementaria, considerando la complejidad tectónica del área y la ambigüedad inherente a los planos nodales de los mecanismos focales. Por tanto, los resultados permiten establecer implicaciones para la tectónica activa local sin atribuir de manera definitiva la secuencia a una falla geológica específica.

4. Conclusiones

La secuencia sísmica de Santa María de Jesús–Palín de julio de 2025 presentó un comportamiento característico de una secuencia principal–réplicas, con una disminución progresiva en la frecuencia de ocurrencia de los eventos, descrita mediante la ley de Omori–Utsu con un valor de p = 1.04. Su distribución espacial, junto con los antecedentes de actividad sísmica registrados en 2019 y 2024, evidencia la ocurrencia recurrente de sismicidad cortical en esta región del centro-sur de Guatemala.

El análisis de 53 mecanismos focales mostró un predominio de soluciones de fallamiento de rumbo (*strike-slip*), correspondientes al 81.1 % del total. Asimismo, se identificaron dos familias principales de orientaciones de los planos nodales, aproximadamente NE–SO y NO–SE, con predominio de buzamientos elevados, características compatibles con una cinemática predominantemente transcurrente.

La inversión de los mecanismos focales permitió caracterizar un campo de esfuerzos consistente con un régimen transcurrente, definido por un esfuerzo principal máximo (σ_1) aproximadamente N–S y subhorizontal (azimut 171.7°, plunge 3.3°), un esfuerzo principal mínimo (σ_3) aproximadamente E–O y subhorizontal (azimut 262.2°, plunge 8.7°), y un esfuerzo intermedio (σ_2) cercano a la vertical (azimut 61.3°, plunge 80.7°). Esta configuración es compatible con la actividad de estructuras de distintas orientaciones bajo un mismo campo de esfuerzos.

La integración de la distribución espacial de la sismicidad, los mecanismos focales y el campo de esfuerzos sugiere la posible participación de estructuras corticales con diferentes orientaciones. La distribución epicentral presenta una geometría aparente en forma de "L", mientras que las orientaciones de los planos nodales podrían ser compatibles con una configuración de fallamiento conjugado. Sin embargo, la complejidad geológica del área y la ambigüedad inherente a los planos nodales impiden identificar de manera definitiva las fallas sismogénicas responsables de la secuencia.

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

Los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles a través del autor de correspondencia, Helén Morán (correo: helen.moran@umg.edu.gt), previa solicitud razonable

Referencias

Authemayou, C., Brocard, G., Teyssier, C., Simon-Labric, T., Guttiérrez, A., Chiquín, E. N., & Morán, S. (2011). The Caribbean–North America–Cocos triple junction and the dynamics of the Polochic–Motagua fault systems: Pull-up and zipper models. *Tectonics, 30*(3), TC3010. https://doi.org/10.1029/2010TC002814

Delouis, B. (2014). FMNEAR: Determination of focal mechanism and first estimate of rupture directivity using near-source records and a linear distribution of point sources. *Bulletin of the Seismological Society of America, 104*(3), 1479–1500. https://doi.org/10.1785/0120130151

Garnier, B., Tikoff, B., Flores, O., Jicha, B., DeMets, C., Cosenza-Muralles, B., Hernandez, D., Marroquin, G., Mixco, L., & Hernandez, W. (2021). An integrated structural and GPS study of the Jalpatagua fault, southeastern Guatemala. *Geosphere, 17*(1), 201–225. https://doi.org/10.1130/GES02243.1

Garnier, B., Tikoff, B., Flores, O., Jicha, B., DeMets, C., Cosenza-Muralles, B., Hernandez, W., & Greene, D. (2022). Deformation in western Guatemala associated with the NAFCA (North America–Central American Forearc–Caribbean) triple junction: Neotectonic strain localization into the Guatemala City graben. *Tectonics, 41*(2), e2021TC006739. https://doi.org/10.1029/2021TC006739

Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America, 34*(4), 185–188. https://doi.org/10.1785/BSSA0340040185

Guzmán-Speziale, M., & Molina, E. (2022). Seismicity and seismically active faulting of Guatemala: A review. *Journal of South American Earth Sciences, 115*, 103740. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103740

Hardebeck, J. L., & Shearer, P. M. (2002). A new method for determining first-motion focal mechanisms. *Bulletin of the Seismological Society of America, 92*(6), 2264–2276. https://doi.org/10.1785/0120010200

Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). (2019). *Reporte de la actividad sísmica tipo enjambre en el departamento de Sacatepéquez, durante los meses de marzo y abril de 2019* [Reporte técnico]. http://geo.insivumeh.gob.gt/REPORTES_SECCION_SISMOLOGIA/REPORTES_TECNICOS/2019/reporte_enjambre_sacatepequez.pdf

Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). (2024). *Secuencia sísmica en el límite departamental de Guatemala–Sacatepéquez* [Reporte técnico]. http://geo.insivumeh.gob.gt/REPORTES_SECCION_SISMOLOGIA/REPORTES_TECNICOS/2024/REPORTE-RT_INS_2024_01.pdf

Maurer, J., Eckert, A., Sun, Q., & Obrist-Farner, J. (2026). Deformation and earthquake potential on the North America–Caribbean–Cocos plate boundary system in Guatemala. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 131*(4), e2025JB032397. https://doi.org/10.1029/2025JB032397

Michael, A. J. (1984). Determination of stress from slip data: Faults and folds. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 89*(B13), 11517–11526. https://doi.org/10.1029/JB089iB13p11517

Servicio Sismológico de Guatemala (SSG). (s. f.). *Servicio Sismológico de Guatemala*.

Universidad Mariano Gálvez de Guatemala. https://ssg.gt/

Utsu, T., Ogata, Y., & Matsu'ura, R. S. (1995). The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity. *Journal of Physics of the Earth, 43*(1), 1–33. https://doi.org/10.4294/jpe1952.43.1

Vavryčuk, V. (2014). Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms. *Geophysical Journal International, 199*(1), 69–77. https://doi.org/10.1093/gji/ggu224

Zoback, M. L. (1992). First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 97*(B8), 11703–11728. https://doi.org/10.1029/92JB00132

Sobre los autores

José Antonio Tojil Jimenez

Licenciado en Física Aplicada egresado de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Actualmente trabaja en análisis de datos en temas de sismología. Entre sus intereses está la modelación y caracterización de la fuente sísmica. Cuenta con experiencia en automatización de procesos en monitoreo sísmico. Sus intereses académicos incluyen análisis de datos y señales geofísicas, análisis del campo magnético terrestre y algunos temas de meteorología. Correo: jose.tojil@umg.edu.gt. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5432-2941

Helén Marina Morán Chén

Ingeniera geóloga egresada de la Universidad de San Carlos de Guatemala y actualmente cursa la Maestría en Geomática. Cuenta con experiencia en análisis sísmico, elaboración de productos sismológicos y divulgación científica. Inició su trayectoria en sismología en el INSIVUMEH y actualmente se desempeña como analista de señales sísmicas en el Servicio Sismológico de Guatemala de la Universidad Mariano Gálvez. Correo: helen.moran@umg.edu.gt. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2802-0612

Kevin Carlos Enrique Chún Quinillo

Ingeniero Geólogo egresado del Centro Universitario del Norte (CUNOR) de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Actualmente cursa la Maestría en Geomática y cuenta con diplomados en Sismología y Medio Ambiente. Se desempeña como coordinador de Sismología e investigador del Servicio Sismológico de Guatemala (SSG), de la Universidad Mariano Gálvez de Guatemala, y participa en actividades de investigación y monitoreo volcánico en el Observatorio Guatemalteco de Vigilancia Volcánica (OGVV). Su experiencia científica comprende el monitoreo y análisis de señales sísmicas, la investigación de procesos volcánicos y la elaboración de mapas de peligros volcánicos, con énfasis en la evaluación y modelación de corrientes de densidad piroclástica y lahares. Asimismo, cuenta con experiencia en sistemas de información geográfica y análisis espacial aplicados al estudio de amenazas geológicas y la gestión del riesgo de desastres. Ha participado en congresos científicos internacionales e impartido charlas en el extranjero, contribuyendo al intercambio y la divulgación del conocimiento científico. Correo: kevin.chun@umg.edu.gt ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5996-1285

Josué Daniel Cuzco Rivera

Licenciado en Física Aplicada egresado de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Cuenta con experiencia en programación, análisis de datos, sismología, meteorología y divulgación científica. Inició su trayectoria profesional en INSIVUMEH, pasando primero por el departamento de Geofísica y luego por el de Meteorología. Actualmente se desempeña como analista de señales sísmicas en el Servicio Sismológico de Guatemala de la Universidad Mariano Gálvez, donde participa en actividades de análisis e investigación relacionadas con la sismología. Correo: josue.cuzco@umg.edu.gt ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8924-7779

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.

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

Caracterización preliminar de la erupción del volcán de Fuego del 2–4 de agosto de 2026

Preliminary characterization of the eruption of Fuego volcano on August 2–4, 2026

Carla María Fernanda Chún Quinillo[1,*], Dulce González[1], Kevin Chún Quinillo[1] y Wendel Alexander Gutiérrez Paxtor[1]

[1] Observatorio Guatemalteco de Vigilancia Volcánica (OGVV), Instituto de Investigaciones de Ingeniería, Matemática y Ciencias Físicas (in3), Universidad Mariano Gálvez de Guatemala, Ciudad de Guatemala, Guatemala.

*** Autor de correspondencia:** carla.chun@umg.edu.gt

Correos: dulce.gonzalez@umg.edu.gt; kevin.chun@umg.edu.gt; wendel.gutierrez@umg.edu.gt

ORCID: Carla María Fernanda Chún Quinillo https://orcid.org/0000-0003-4002-6320 Dulce González https://orcid.org/0000-0002-6314-7929 Kevin Chún Quinillo https://orcid.org/0000-0001-5996-1285; Wendel Alexander Gutiérrez Paxtor https://orcid.org/0009-0004-5493-2118

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

Resumen

Se caracterizaron de forma preliminar los cambios en el comportamiento eruptivo del volcán de Fuego durante la erupción del 2 al 4 de agosto de 2026, mediante la integración de observaciones de campo, imágenes satelitales y modelación numérica. La erupción presentó dos fases: la primera, asociada con actividad efusiva, explosiones estrombolianas y un flujo de lava hacia el suroeste; y la segunda, explosiva, con explosiones vulcanianas, columnas eruptivas sostenidas y generación de corrientes de densidad piroclástica, que produjeron depósitos en las barrancas Seca y Santa Teresa. En campo se identificaron aproximadamente 17 frentes o pulsos de corrientes de densidad piroclástica, con un alcance máximo observado de 6.8 km. Los depósitos varían desde componentes diluidos, asociados a oleadas piroclásticas, hasta facies más densas de bloques y ceniza. Con imágenes satelitales se delimitaron las zonas afectadas y se generó un modelo digital de elevación para analizar la distribución y el alcance de los flujos. Con esta información se realizaron simulaciones preliminares con TITAN2D para aproximar la dinámica, la dirección y el alcance de la componente granular densa de las corrientes, y se contrastaron con las evidencias de campo. Además, se empleó LAHARZ para estimar el alcance de los lahares que podría generar la removilización del material depositado hacia las partes media y baja de la cuenca del río Pantaleón. Los resultados constituyen un avance en la caracterización de la erupción y en la construcción de escenarios de afectación, sujetos a evaluaciones posteriores.

Palabras clave: corrientes de densidad piroclástica; imágenes satelitales; lahares; modelos numéricos

Abstract

A preliminary characterization was made of the changes in the eruptive behavior of Fuego volcano during the August 2–4, 2026 eruption, by integrating field observations, satellite imagery, and numerical modeling. The eruption consisted of two phases: an initial phase associated with effusive activity, Strombolian explosions, and a lava flow toward the southwest; and a second,

explosive phase with Vulcanian explosions, sustained eruption columns, and the generation of pyroclastic density currents, which produced deposits in the Seca and Santa Teresa ravines. Approximately 17 fronts or pulses of pyroclastic density currents were identified in the field, with a maximum observed runout of 6.8 km. The deposits range from dilute components associated with pyroclastic surges to denser block-and-ash facies. Satellite imagery was used to delineate the affected areas, and a digital elevation model was generated to analyze the distribution and extent of the flows. Using this information, preliminary TITAN2D simulations were conducted to approximate the dynamics, direction, and runout of the dense granular component of the currents, and the results were compared with field evidence. In addition, LAHARZ was used to estimate the runout of lahars that could result from the remobilization of the deposited material toward the middle and lower reaches of the Pantaleón River basin. These results represent a step forward in characterizing the eruption and developing impact scenarios, subject to further evaluation.

Keywords: lahars; numerical models; pyroclastic density currents; satellite imagery

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

Chún Quinillo, C. M. F., González, D., Chún Quinillo, K., & Gutiérrez Paxtor, W. A. (2026). Caracterización preliminar de la erupción del volcán de Fuego del 2–4 de agosto de 2026. *Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra, 13*(1), 31–50.

1. Introducción

El volcán de Fuego es uno de los volcanes más activos de Guatemala, durante los últimos años ha presentado diversos periodos de actividad estromboliana y en ocasiones vulcaniana con paroxismos, desde el año 2015 a la actualidad se han contabilizado 58 erupciones. Por lo que se han registrado cambios en su patrón eruptivo y en las características geomorfológicas de su entorno, particularmente en las barrancas donde se canalizan los productos volcánicos. Previo al evento eruptivo objeto de este estudio, no se habían registrado erupciones volcánicas desde el 3 de junio de 2025. Durante la fase eruptiva que tuvo lugar el 20 de julio se generaron corrientes de densidad piroclástica que descendieron por las barrancas Seca, Ceniza y Las Lajas, depositando material volcánico y modificando la geomorfología de la zona. Estos cambios como se ha observado en años anteriores generan lahares en época de lluvia, por lo que resulta necesario evaluar las modificaciones geomorfológicas generadas por este evento y su relación con la configuración actual de las barrancas. En este contexto es necesario plantearnos ¿qué cambios geomorfológicos se han generado por las corrientes de densidad piroclástica y el descenso de lahares en el área del volcán de Fuego? ¿Cuáles son los escenarios futuros que la generación de estos depósitos de corrientes de densidad piroclástica y lahares puede producir en el entorno volcánico?

El volcán Fuego se encuentra dentro de la cadena volcánica central guatemalteca, es el más

meridional de cuatro chimeneas que están alineadas en dirección norte-sur. Estas chimeneas, de norte a sur, son Yepocapa (3880 m), Acatenango (3976 m), Meseta (3600 m) y Fuego (3763 m). Yepocapa y Acatenango son estructuras relacionadas con el complejo Acatenango, mientras que el complejo Fuego está compuesto por las Fuego y Meseta (Chesner & Rose, 1984).

La actividad histórica del volcán de Fuego muestra eventos eruptivos registrados desde la época de la colonia, basados en observaciones documentadas del siglo XVI. De acuerdo a la base de datos del Programa Global de Vulcanismo del Instituto Smithsoniano, existen registros de erupciones desde el año 1531, además de evidencia geológica que muestra actividad volcánica mucho más antigua. A lo largo del tiempo el volcán ha presentado explosiones, emisiones de ceniza, flujos de lava y corrientes de densidad piroclástica (Global Volcanism Program, 2026).

TITAN2D es un modelo que utiliza ecuaciones promediadas en profundidad para representar la dinámica del flujo y permite estimar variables como la extensión alcanzada, la velocidad y el espesor del material movilizado. Permitiendo realizar simulaciones de distintos escenarios y evaluar el comportamiento potencial de los materiales a partir de las características del terreno y de los parámetros físicos definidos (Patra et al., 2005).

LAHARZ es un conjunto de herramientras que buscan automatizar la elaboración de mapas de zonas susceptibles a inundaciones por lahares, la metodología utiliza ecuaciones empíricas que relacionan el volumen estimado del flujo con las áreas potencialmente inundadas, integrando esta información con modelos digitales de elevación para representar la distribución espacial de la amenaza. La herramienta permite generar diferentes escenarios de inundación a partir de volúmenes hipotéticos de lahar, lo que facilita la comparación de posibles alcances y la identificación de sectores expuestos (Schilling, 1998).

Los mapas de amenaza volcánica son herramientras que permiten identificar las zonas que podrían ser afectadas por eventos eruptivos. Estos se elaboran a través de diversas metodologías las cuales pueden basarse en: la historia eruptiva del volcán, sus amenazas actuales, la frecuencia eruptiva y estudios geomorfológicos (Monsalve, 2000).

La identificación de las zonas que podrían ser afectadas por las amenazas volcánicas, como corrientes de densidad piroclástica y lahares, son de gran importancia para la población que se encuentra en los alrededores del entorno volcánico ya que estas pueden afectar de manera directa o indirecta a las comunidades y su medio de vida.

2. Materiales y métodos

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó una metodología que integra técnicas de monitorización volcánica, análisis de información satelital, datos geológicos recolectados en campo y modelación numérica y computacional de las amenazas. Estas herramientas permitieron caracterizar la actividad volcánica registrada antes, durante y después del evento eruptivo, así como evaluar los depósitos generados y los posibles escenarios asociados a la actividad futura del volcán de Fuego. Las técnicas de monitorización utilizadas

por el Observatorio Guatemalteco de Vigilancia Volcánica (OGVV) incluyen vigilancia en tiempo real y análisis probabilístico. Dentro de estas podemos mencionar: el registro sísmico, el cual nos permite analizar y caracterizar la actividad antes, durante y después del evento eruptivo; sensores remotos como la observación de la actividad volcánica a través de cámaras en tiempo real y el análisis de imágenes del Satélite Ambiental Operacional Geoestacionario GOES-19 (por sus siglas en inglés) para identificar zonas de alta temperatura y desplazamiento de ceniza; modelaciones probabilísticas de la dispersión de ceniza, utilizando registros del Centro de Asesoramiento sobre Ceniza Volcánica de Washington (Washington-VAAC, por sus siglas en inglés) y simulaciones con el Modelo de Dispersión de Ceniza Volcánica (ASH3D, por sus siglas en inglés) del Servicio Geológico de los Estados Unidos y utilizando métodos de interpolación para obtener las isolíneas de probabilidad de caída de ceniza. Para identificar los cambios geomorfológicos de la zona afectada por las corrientes de densidad piroclástica se realizó un recorrido de campo en las Barrancas Seca y Santa Teresa, para identificar las características físicas como color, textura, espesor, matriz, distribución y ubicación. El análisis de sensores remotos posterior al evento eruptivo para identificar cambios geomorfológicos y localización del depósito a través de: imágenes satelitales de la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) en donde se utilizaron imágenes ópticas Sentinel-2 de 10 y 20 m, el procesamiento de estas imágenes se realizó a partir de un sistema de información geográfica; el análisis de imágenes de radar de apertura sintética (SAR, por sus siglas en inglés) del satélite Sentinel-1. Para el procesamiento de imágenes Sentinel-1 se realizó mediante la plataforma Google Earth Engine (GEE), utilizando la colección COPERNICUS/S1_GRD correspondiente a productos Sentinel-1 Alcance Terrestre Detectado (GRD, por sus siglas en inglés). Se seleccionaron imágenes adquiridas en modo Franja Ancha Interferométrica (IW) y con polarización VV, debido a que esta configuración proporciona información de retrodispersión adecuada para realizar comparaciones espaciales de la superficie. A partir de la información obtenida con las técnicas mencionadas combinada con los antecedentes de actividad eruptiva histórica del volcán de Fuego, se realizaron simulaciones numéricas y computacionales de corrientes de densidad piroclástica utilizando el software TITAN2D y se identificaron escenarios de amenaza por lahares a través de la herramienta LAHARZ. El resultado de estas simulaciones permitió evaluar posibles escenarios de afectación derivados de la actividad volcánica futura y de los cambios geomorfológicos recientes en el entorno volcánico.

3. Resultados

3.1 Análisis de la monitorización volcánica previa a la erupción

Durante los meses previos a la erupción registrada en el mes de agosto, el volcán de Fuego presentó explosiones estrombolianas de intensidad débil, moderada y, ocasionalmente, fuerte. La acumulación progresiva de material en el cráter y sus alrededores produjo modificaciones en la configuración de esta zona, observándose cambios en la morfología del cráter y una apertura hacia el sector oeste.

El 20 de julio se registraron explosiones de intensidad moderada y algunas fuertes. Posteriormente, a las 11:00 horas (hora local), se registró el descenso de corrientes de densidad piroclástica. El inicio del evento estuvo asociado con un colapso ocurrido en el sector suroeste del cráter, que afectó las barrancas Seca y Santa Teresa. La acumulación previa de material en el contorno del cráter constituyó una condición favorable para la ocurrencia del colapso. Es importante que las explosiones fuertes pueden desencadenar colapsos debido a la vibración que estas originan en el conducto volcánico. La columna de ceniza fue transportada por el viento a distancias superiores a 40 km, principalmente hacia el noroeste, oeste y suroeste. Las proyecciones estimaron espesores de depósito de aproximadamente 1 mm en las zonas más cercanas al volcán, mientras que en las áreas más alejadas los espesores estimados alcanzaron aproximadamente 0.01 mm.

3.2 Desarrollo de la fase eruptiva del 2 al 4 de agosto

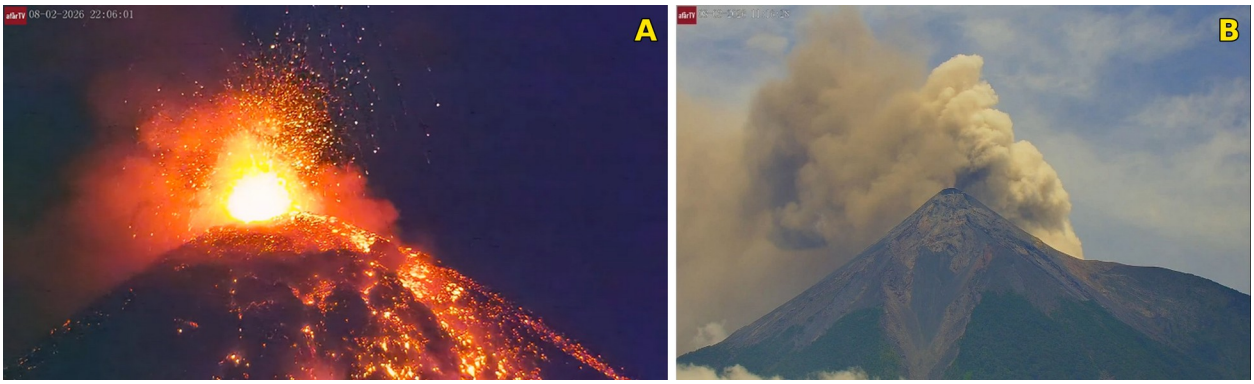
El 2 de agosto, durante horas de la tarde, se registró tremor de baja frecuencia y de duración prolongada, generando un leve incremento en la actividad sísmica comparado con las observaciones superficiales en donde se observaban explosiones estrombolianas, se comienza a notar el inicio de una etapa de actividad efusiva, durante la cual la mayoría de las avalanchas de material incandescente se concentraron al suroeste debido a que el conducto posee una dirección preferencial en dicha dirección.

La etapa efusiva estuvo caracterizada por explosiones estrombolianas constantes y cíclicas, que expulsaron abundante material volcánico, principalmente fragmentos de lava incandescente, los cuales generaron avalanchas sobre las laderas del volcán. Algunas de las explosiones produjeron columnas de gases y ceniza que fueron posteriormente transportadas por el viento. Esta actividad generó ondas de choque perceptibles por la población.

La actividad eruptiva persistió durante la noche y la madrugada. Sin embargo, en la mañana del 3 de agosto comenzaron a observarse cambios en las características de la actividad, que marcaron una transición hacia una nueva etapa del proceso eruptivo. El tremor de baja frecuencia presentó una mayor duración en el tiempo y a nivel superficial las explosiones vulcanianas se caracterizaron por ser fuertes y generar columnas de ceniza y caída de balísticos. En ocasiones, se observó que el conducto volcánico permanecía abierto, dando lugar a la formación de una columna de ceniza continua. Durante esta etapa de actividad se registró el descenso de corrientes de densidad piroclástica en dirección a las barrancas Seca y Santa Teresa como se observa en la Figura 1.

Figura 1

Fases de la actividad eruptiva del 2 al 4 de agosto de 2026



Nota. Imagen A. Fase efusiva con una fuente de lava y caída de balísticos. Imagen B. Fase explosiva con abundante ceniza y descenso de corrientes de densidad piroclástica. Imágenes obtenidas de transmisión en tiempo real de https://www.youtube.com/afartv.

La actividad volcánica mantuvo características similares durante el transcurso del día, registrándose diversos pulsos de corrientes de densidad piroclástica. En las barrancas Seca y Santa Teresa, las corrientes de densidad piroclástica alcanzaron una distancia aproximada de 6.8 km desde el cráter, mientras que en la barranca Ceniza los depósitos se localizaron hasta aproximadamente 3.5 km del cráter. Los depósitos de la oleada piroclástica (ceniza muy fina) se encuentran en la mayoría de barrancas al suroeste.

La erupción continuó hasta el 4 de agosto, la actividad permaneció en una fase predominantemente explosiva y se registraron aproximadamente 17 pulsos de corrientes de densidad piroclástica las cuales se concentraron principalmente en el flanco suroeste del volcán. Esta actividad ocasionó la evacuación de comunidades localizadas en este sector debido a la alta probabilidad de que se generara un cambio en el patrón eruptivo. La caída de ceniza se concentró principalmente hacia el suroeste y oeste, alcanzando distancias superiores a 150 km, sin embargo, la oleada piroclástica depositó abundante material en las zonas más cercanas al volcán.

De acuerdo con los registros sísmicos y las observaciones de superficie, la actividad volcánica comenzó a disminuir progresivamente. Las explosiones adquirieron características débiles a moderadas, acompañadas por una disminución gradual del tremor de baja frecuencia, hasta que la actividad eruptiva cesó y se dio por finalizada la erupción.

3.3 Comparación de la actividad sísmica e imágenes satelitales

El tremor volcánico corresponde a una señal sísmica continua que puede mantenerse durante periodos prolongados y que está asociada con procesos dinámicos al interior del sistema volcánico. Esta señal puede relacionarse con el movimiento y la presión de magma, gases y fluidos hidrotermales a través del conducto volcánico y las fracturas existentes en el edificio.

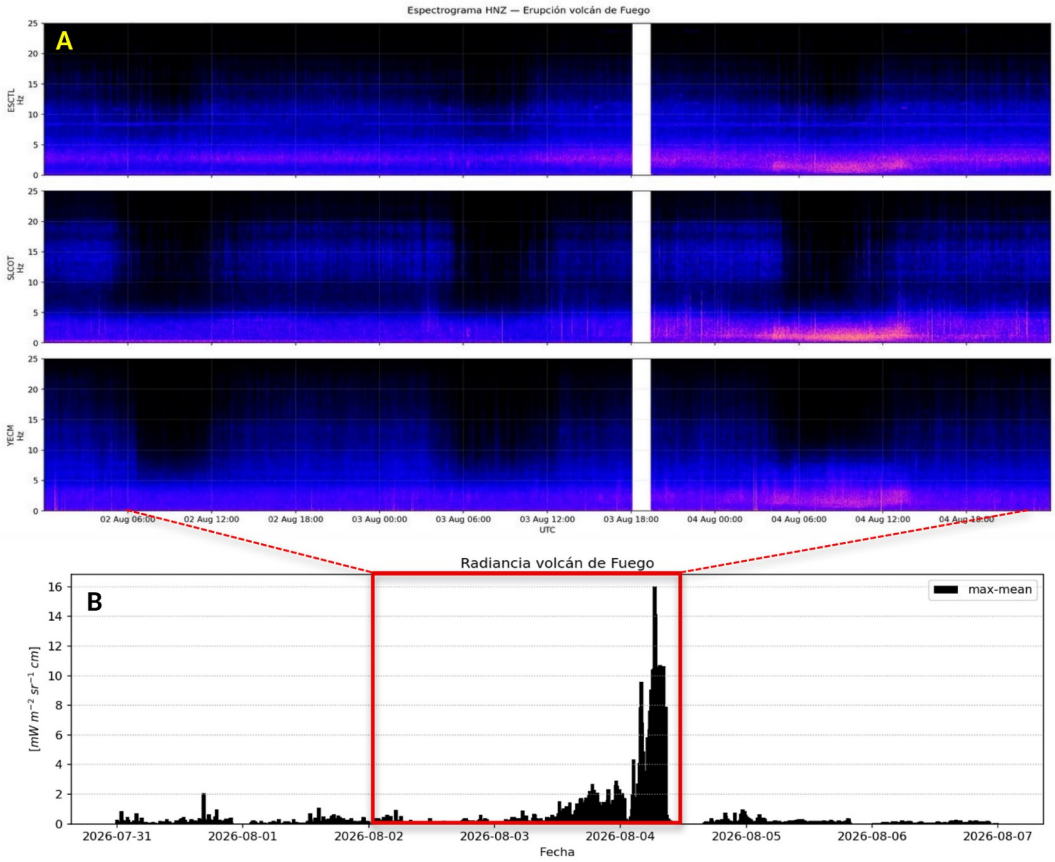
En el caso del volcán de Fuego el registro de la actividad sísmica se mantiene en una actividad base. Esta actividad consiste en explosiones, algunas de estas con onda de choque y tremor que puede durar de segundos a minutos. Previo a

la actividad eruptiva se pueden registrar de 6 a 8 eventos por hora. Esta erupción presentó dos fases principales: una fase inicialmente efusiva, seguida por una intensificación de la actividad que dio paso a una fase explosiva. Como se observa en la Figura 2A, se presenta el espectrograma de las estaciones sísmicas ubicadas en los alrededores del volcán. En este se observa un incremento progresivo en la duración y amplitud del tremor, particularmente durante el desarrollo de la actividad eruptiva. La señal de tremor se caracteriza principalmente por frecuencias inferiores a 5 Hz.

Las imágenes GOES-19 a través de series de tiempo en donde se pueden determinar los valores máximos menos el promedio, lo cual nos permite identificar fluctuaciones o variaciones inusuales de datos, cuando la diferencia entre el valor máximo y el promedio es mayor a lo habitual, se puede relacionar con zonas de aumento de temperatura, actividad asociada a zonas de alta temperatura que se registran por la actividad volcánica, que va desde explosiones a presencia de extensos flujos de lava. En la Figura 2B se observa el incremento de la sismicidad del volcán de Fuego y contrarrestarlo con los niveles de radiancia obtenidos con GOES-19.

Figura 2

Registro sísmico y análisis de radiancia a través del satélite GOES-19



Nota. En la figura A. Se observan los espectrogramas de las estaciones ESCTL, SLCOT y YECM, localizadas en los alrededores del volcán de Fuego. En la Figura B. se muestran los niveles de radiancia obtenidos a través de imágenes GOES-19.

3.4 Análisis de imágenes satelitales posteriores al evento eruptivo

Las corrientes de densidad piroclástica son una mezcla de material volcánico de diversos tamaños que dentro del flujo moviliza desde gases hasta bloques, los cuales descienden por las laderas del volcán a altas temperaturas y velocidades. Estas se encuentran compuestas por el flujo piroclástico que es la parte densa, usualmente transporta rocas y bloques, debido a esto descienden al ras del suelo; y la parte diluida que se conoce como oleada piroclástica la cual es una nube turbulenta de menor densidad la cual puede expandirse por encima del flujo piroclástico y traspasar barreras topográficas.

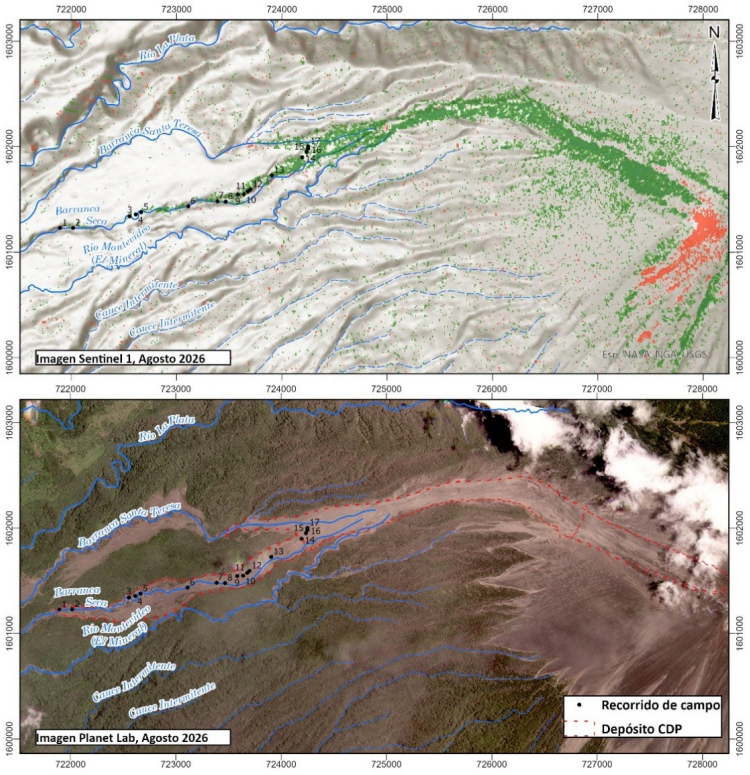
A través del análisis de imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2 se identificó el depósito de material volcánico concentrado al suroeste. El frente del depósito se encuentra a 6.8 km del cráter en la barranca Seca (el cual se ha podido corroborar en campo) y a 4.8 en dirección a la barranca Santa Teresa. En la Figura 3 se puede observar el depósito reciente y la caída de abundante ceniza en este flanco.

Para el análisis de Sentinel-1 se utilizaron períodos completos en lugar de una única adquisición, por lo que se calculó el valor de la mediana de la retrodispersión VV de las imágenes disponibles para cada intervalo temporal. Este procedimiento permitió obtener una imagen representativa de las condiciones radar de cada período y reducir la influencia de variaciones individuales entre adquisiciones. Posteriormente, se obtuvo la diferencia entre la imagen correspondiente al período posterior y la imagen del período previo mediante una operación de resta pixel a pixel. El producto resultante representa el cambio de retrodispersión radar entre ambos períodos, permitiendo identificar espacialmente sectores donde la respuesta de la superficie presentó modificaciones, como se observa en la Figura 3A.

Para el análisis de las imágenes ópticas Sentinel-2 y PlanetLab, estas se procesaron a través de sistemas de información geográfico y se utilizaron para identificar el depósito volcánico y la extensión de este. Con Sentinel-2 se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada para identificar los cambios ocurridos en este sector y el depósito de ceniza. En las imágenes PlanetLabs (Figura 3B) con una resolución de 3.5 m se observa el depósito volcánico y las zonas afectadas por las corrientes de densidad piroclásticas.

Figura 3

Identificación de los depósitos volcánicos a través de imágenes satelitales



Nota. A. Resultados obtenidos a través del análisis de imágenes Sentinel-1, en donde se puede observar el cambio en la barranca posterior al evento eruptivo. B. Imagen PlanetLab en donde se observa material volcánico en las barrancas y también se puede observar abundante ceniza en las faldas del volcán.

3.5 Datos obtenidos en la evaluación de campo

Se realizó un recorrido en el cauce de la barranca Seca, en esta zona el depósito de corrientes de densidad piroclástica, presentando un emplazamiento en forma de lóbulos, debido a que las corrientes de densidad piroclástica fueron constantes y se depositaron una sobre otra. Se observó ceniza fina que se extiende fuera del cauce y del depósito volcánico. En las orillas de la barranca la vegetación se encuentra quemada por la temperatura del material.

A nivel de afloramientos, estos lóbulos se caracterizan por concentrarse dentro de la barranca, se estima que el pulso más largo se desplazó 6.8 km, por lo que el resto de este material se fue acumulando encima del primer evento, en campo se contabilizaron 17 frentes, algunos se pueden observar como una parte más

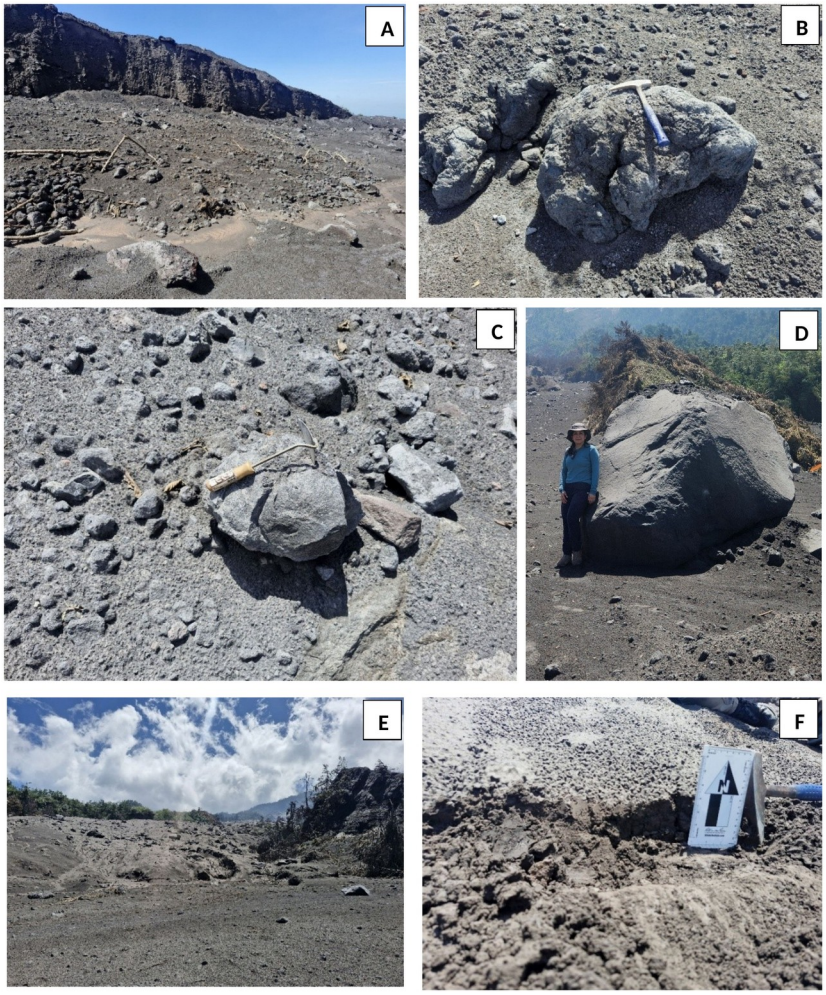
diluida tipo oleada piroclástica y otros más concentrados y densos.

En la parte alta, correspondiente con la zona más cercana al cono volcánico, los sucesivos flujos llenaron buena parte del cauce. Aguas abajo, el espesor del depósito disminuye progresivamente hasta alcanzar su límite distal, donde el depósito deja de observarse. El depósito está conformado por una matriz de ceniza fina que contiene material juvenil y clastos líticos. Dentro del material juvenil se observan bloques de tipo corteza de pan y bombas volcánicas, mientras que, el contenido de clastos líticos, está compuesto por fragmentos de flujos de lava antiguos o balísticos que se encontraban en el cráter, algunos de color rojizo, así como pómez que probablemente no forman parte de la erupción si no de un proceso anterior. Los bloques de mayor dimensión son de entre 4 a 10 metros de diámetro, angulares a subangulares, los cuales se pueden observar principalmente en la parte alta del depósito, disminuyendo hasta la zona más distal, en donde la granulometría de los bloques es menor y donde además se puede observar incorporación de materia orgánica en el depósito (árboles y ramas) como se observa en la Figura 4.

La segunda zona se caracteriza por una mayor concentración de ceniza fina, esta ceniza forma una capa que cubre la topografía preexistente, con espesores que varían entre 5 y 15 cm. Debido a que esta ceniza se propagó más allá de la zona de inundación, se observaron daños considerables en la vegetación. Las características de esta zona son compatibles con el emplazamiento de una oleada piroclástica.

Figura 4

Contenido del depósito piroclástico y depósitos de oleada piroclástica



Nota. A. Fotografía de los frentes de corrientes de densidad piroclástica, algunos de estos tenían troncos y ramas quemadas. B. En el depósito se identificaron rocas como corteza de pan. C. Rocas basáltico andesíticas con plagioclasas, piroxenos y olivinos. D. Rocas de 3 m de alto y 5 de ancho localizadas en el depósito. E. y F. Depósitos de oleada piroclástica los cuales se encontraban húmedos por las lluvias en la zona. Fotografías tomadas por el personal del OGVV, agosto 2026.

3.6 Simulaciones de corrientes de densidad piroclástica con TITAN2D

El modelo numérico TITAN2D fue utilizado para simular la propagación y distribución espacial de corrientes de densidad piroclástica (CDP) asociadas al evento eruptivo del volcán de Fuego. Mediante las simulaciones realizadas se evaluó el comportamiento de los flujos, sus posibles trayectorias de propagación y las zonas potencialmente afectadas bajo diferentes escenarios (Figura 5).

Para la configuración de las simulaciones se utilizó un modelo digital de elevación (DEM) como representación de la superficie topográfica del área de estudio. Inicialmente, se trabajó con un DEM de resolución espacial de 12.5 m correspondiente a ALOS PALSAR. Posteriormente, a partir del procesamiento de imágenes Sentinel-1, fue posible generar un DEM más reciente, con una resolución espacial de 10 m, el cual permitió disponer de una representación más actualizada de las condiciones topográficas del área de estudio y

mejorar la información utilizada como base para las simulaciones.

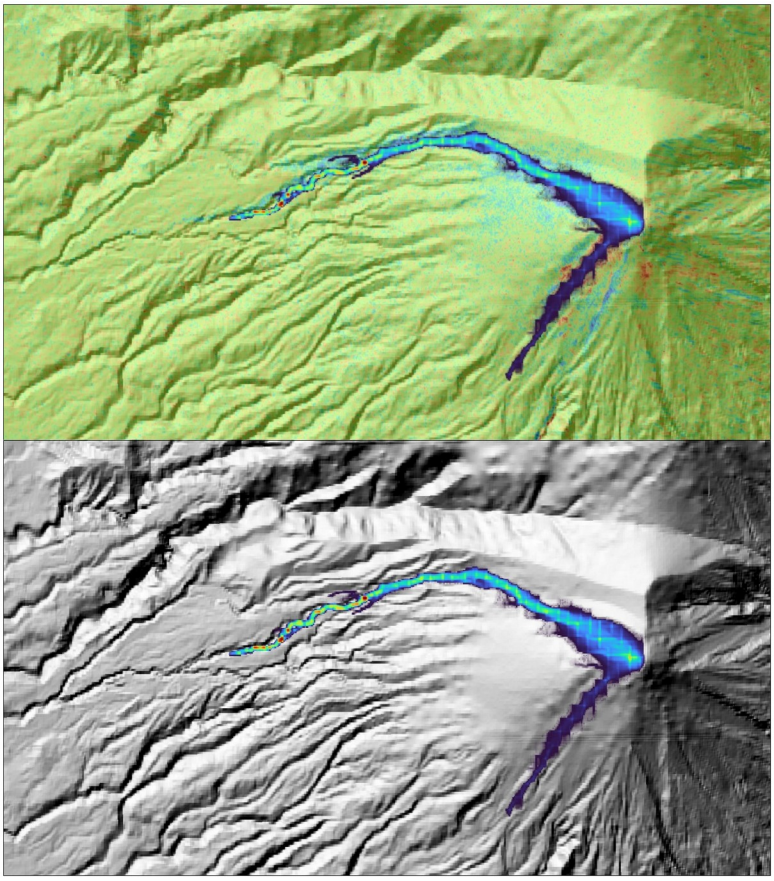
Los resultados obtenidos bajo la hipótesis de un único descenso mostraron que, al movilizar la totalidad del volumen estimado en campo durante un solo evento, los flujos simulados alcanzaron una extensión considerablemente mayor que la distribución de los depósitos registrada mediante las observaciones de campo, particularmente hacia el sector sur del volcán. Asimismo, la distribución simulada no reprodujo completamente la tendencia observada en las imágenes Sentinel-1, en las cuales se identificó una afectación más localizada principalmente hacia los sectores norte y noroeste.

Esta comparación permitió descartar la representación de la totalidad del volumen identificado en campo como un único descenso como una condición compatible con las evidencias disponibles. En este sentido, el ejercicio de modelación no buscó establecer que los 4.7–6.5 millones de m^3 hubieran sido movilizados simultáneamente, ni tampoco representa que de darse este escenario esto fuera a suceder así, sino evaluar qué comportamiento produciría el modelo bajo dicha condición y utilizarlo como referencia para contrastar las observaciones realizadas en campo.

A partir de esta comparación, y considerando que el volumen total identificado corresponde a depósitos acumulados durante el período eruptivo, se planteó como hipótesis de trabajo que dicho volumen pudo haberse conformado mediante múltiples descensos de corrientes de densidad piroclástica (pulsos), en lugar de corresponder a un único evento de gran volumen. Esta interpretación permitió orientar las simulaciones posteriores hacia escenarios de menor volumen por evento y evaluar si una sucesión de pulsos individuales podía reproducir de manera más consistente la distribución espacial observada.

Figura 5

Resultado de las simulaciones obtenidas con TITAN2D



Nota. Resultados preliminares de las simulaciones mediante TITAN2D bajo el escenario hipotético de movilización de la totalidad del volumen estimado durante un único descenso de corriente de densidad piroclástica.

3.7 Simulaciones de lahares con LAHARZ

Los lahares son una mezcla de material volcánico de diversos tamaños con agua proveniente de la precipitación pluvial, estos descienden en época de lluvia y, debido a la reciente actividad, pueden descender con altas temperaturas. El arrastre de material volcánico a lo largo del cauce puede generar concentraciones de estos depósitos en la parte media y baja de la cuenca. Debido al aporte de ceniza fina mezclada con agua, la densidad puede variar por lo que estos pueden transportar bloques de diversos tamaños.

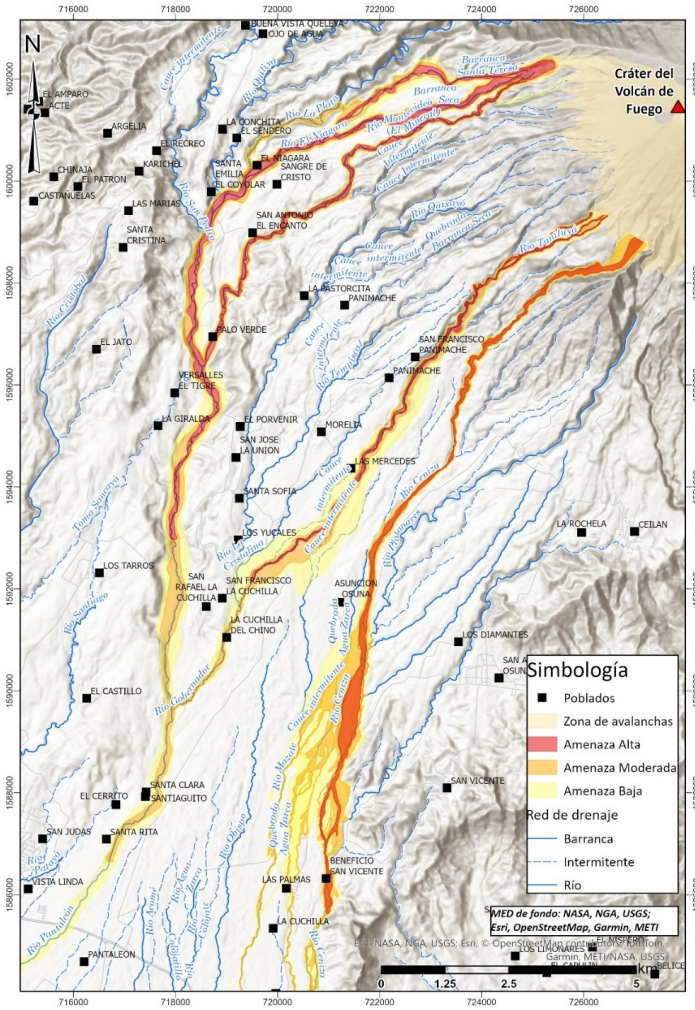
La actividad volcánica reciente en las barrancas localizadas al oeste del volcán de Fuego, han depositado abundante material volcánico en esta zona por lo que se realizaron simulaciones utilizando LAHARZ, los parámetros utilizados para las simulaciones se determinaron de acuerdo a las áreas obtenidas a través de imágenes satelitales y los espesores se obtuvieron en campo. Por lo que se propusieron valores de 500,000 m^3 hasta los 6 000,000 m^3. Para identificar los puntos de inicio de las simulaciones se utilizaron datos de campo y el análisis de imágenes satelitales, considerando que los lahares no siempre inician en el frente del depósito de corrientes de densidad piroclástica se consideró el punto más alto de cada cauce en referencia al recorrido realizado.

El programa LAHARZ incorpora pequeños picos en algunos sectores de acuerdo al modelo de elevación digital, para las simulaciones se utilizó un modelo de elevación digital obtenido con imágenes de radar Sentinel-1, por lo que se realizaron algunos ajustes a los resultados de las simulaciones debido al contraste elaborado con imágenes satelitales y datos de campo.

Los tres escenarios (Figura 6) identificados fueron: a) alta amenaza, zona que es afectada por correntadas y lahares que poseen características débiles, moderadas y fuertes, de acuerdo a estas el alcance puede variar de trayectos cortos hasta 20 km, estos transportan material volcánico a la parte media de la cuenca en donde los cauces desembocan al río Pantaleón, la tasa de ocurrencia es alta de acuerdo a periodos de lluvia constantes y prolongados. b) amenaza moderada, zona que podría ser afectada por lahares con características moderadas y fuertes los cuales pueden alcanzar trayectos hasta de 30 km desembocando en el río Pantaleón, la tasa de ocurrencia es moderada y se asocian a la época lluviosa, lluvias fuertes y constantes, depresión y tormentas tropicales. c) baja amenaza, zonas que podrían ser afectadas por lahares con características fuertes y muy fuertes, estos pueden agregar material volcánico al río Pantaleón hasta 35 km lo que puede afectar la parte baja de la cuenca, la tasa de ocurrencia es baja y se encuentra asociada a tormentas tropicales y huracanes.

Figura 6

Mapa con los escenarios de amenaza por lahares para el suroeste del volcán de Fuego



Nota. Se observan los escenarios de amenaza por lahares para el flanco suroeste del volcán de Fuego, las zonas fueron definidas a través de un análisis de imágenes satelitales, comparación con los mapas existentes, diversas simulaciones y datos de campo.

4. Discusión

El volcán de Fuego es uno de los volcanes más activos en Guatemala, esto ocasiona cambios geomorfológicos en su entorno, debido a que se deposita abundante material volcánico en su cráter y en las barrancas. La mayoría de periodos eruptivos presentan características efusivas y explosivas, en ocasiones paroxismos que generan corrientes de densidad piroclástica. De acuerdo a las condiciones del cráter la actividad de agosto se concentró en las barrancas Seca y Santa Teresa como reportó el INSIVUMEH (2026) en sus boletines especiales, posterior a este evento se pueden seguir generando diversas amenazas en este sector.

La vigilancia volcánica es indispensable para tener una línea base sobre la actividad del volcán y de esta manera identificar los cambios que se generen, la sismicidad volcánica es una de las herramientas principales para la monitorización volcánica, a través de esta podemos identificar señales de bajas frecuencias que se encuentren

asociadas al movimiento o ascenso de magma, gases o fluidos ascienden a la superficie, el USGS (s. f.) para comprender el movimientos del magma propone la clasificación de estos eventos en: volcano-tectónicos, de largo periodo o de baja frecuencia, frecuencia muy baja e híbridos.

Los resultados obtenidos con TITAN2D bajo la hipótesis de un único descenso mostraron que, al movilizar la totalidad del volumen estimado en campo durante un solo evento, los flujos simulados alcanzaron una extensión considerablemente mayor que la distribución de los depósitos registrada mediante las observaciones de campo, particularmente hacia el sector sur del volcán. En este sentido, el ejercicio de modelación no buscó establecer que los 4.7–6.5 millones de m^3 hubieran sido movilizados simultáneamente, ni tampoco representa que de darse este escenario esto fuera a suceder así, sino evaluar qué comportamiento produciría el modelo bajo dicha condición y utilizarlo como referencia para contrastar las observaciones realizadas en campo. A partir de esta comparación, y considerando que el volumen total identificado corresponde a depósitos acumulados durante el período eruptivo, se planteó como hipótesis de trabajo que dicho volumen pudo haberse conformado mediante múltiples descensos de corrientes de densidad piroclástica (pulsos), en lugar de corresponder a un único evento de gran volumen.

A través de los resultados obtenidos con LAHARZ se identificaron 3 escenarios de posible ocurrencia, los escenarios fueron divididos en: alta amenaza, amenaza moderada y amenaza baja. Estos se compararon con el mapa preliminar de amenazas de lahares, de la crisis eruptiva del volcán de Fuego de junio del 2018 (INSIVUMEH, 2018). En distancia las zonas recorridas por las amenazas pueden ser similares, sin embargo, para las simulaciones recientes se utilizó un modelo de elevación digital de agosto; además, se comparó con las imágenes satelitales y con datos de campo para realizar la modificación de algunas áreas que el programa identifica de acuerdo a la red de drenaje.

5. Conclusiones

La actividad eruptiva del volcán de Fuego muestra la importancia de mantener un sistema de monitorización volcánico continuo el cual permita identificar los cambios en su comportamiento y evaluar los posibles peligros asociados a sus erupciones. La integración de observaciones de campo, registros instrumentales y análisis de imágenes satelitales facilita la identificación de los cambios en el patrón eruptivo. Estas herramientas no solo nos permiten mejorar la comprensión de la dinámica eruptiva, sino que proporcionan información fundamental para la evaluación de las amenazas y facilitan la toma de decisiones, fortaleciendo los sistemas de alerta temprana.

La elaboración de mapas de amenaza volcánica y el uso de modelos numéricos como TITAN2D o LAHARZ, constituyen herramientas para representar y analizar los posibles escenarios de afectación asociados a las amenazas del volcán de Fuego. Las simulaciones permiten estimar las trayectorias y la distribución espacial de corrientes de densidad piroclástica, mientras que el análisis de lahares contribuye a identificar los cauces y las zonas que podrían verse afectadas por el transporte de sedimentos volcánicos. En conjunto, estas técnicas permiten identificar las zonas expuestas y permiten orientar la

planificación territorial, también fortalecen las estrategias de prevención y respuesta ante emergencia.

La integración de la vigilancia volcánica, el análisis de imágenes satelitales, los datos de campo y las simulaciones de procesos volcánicos representan una estrategia fundamental para comprender de manera integral las amenazas asociadas al volcán de Fuego. La combinación de estas herramientas proporciona una base técnica más sólida para actualizar los mapas de amenaza, identificar zonas de mayor exposición y apoyar la toma de decisiones por parte de las autoridades a nivel local y regional. Esta investigación busca visibilizar la labor de las universidades en temas de gestión de riesgo volcánico y establecer nuevos canales para generar conocimiento e información que sea útil para las autoridades.

Agradecimientos

El desarrollo de esta investigación es gracias al Instituto de Investigaciones de Ingeniería, Matemática y Ciencias Físicas de la Universidad Mariano Gálvez de Guatemala y es realizada por el personal del Observatorio Guatemalteco de Vigilancia Volcánica. Se le agradece el acompañamiento en campo a los señores: Edgar Barrios y Amílcar Calderas.

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 es de tipo profesional y ha sido desarrollada con fines de investigación por el Instituto de Investigaciones de Ingeniería, matemática y Ciencias físicas (in^3) de la Universidad Mariano Gálvez.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Disponibilidad de datos

Los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles a través del autor de correspondencia previa solicitud razonable.

Referencias

Charbonnier, S. J., Garin, F., Rodríguez, L. A., Ayala, K., Cancel, S., Escobar-Wolf, R., Chigna, G., Chun-Quinillo, C., González, D., Chigna, W., Chun-Quinillo, K., Mérida, R., Juarez, F., & Calder, E. S. (2023). Unravelling the dynamics and hazards of the June 3rd, 2018, pyroclastic density currents at Fuego volcano (Guatemala). *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 436*, 107791. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107791

Chesner, C. A., & Rose, W. I. (1984). Geochemistry and evolution of the Fuego volcanic complex, Guatemala. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 21*(1–2), 25–44.

https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90014-3

Esposito, G., Marchesini, I., Mondini, A. C., Reichenbach, P., Rossi, M., & Sterlacchini, S. (2020). A spaceborne SAR-based procedure to support the detection of landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 20*, 2379–2395. https://doi.org/10.5194/nhess-20-2379-2020

European Space Agency. (2015). *Sentinel-2 user handbook* (Issue 1, Rev. 2). https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook

European Space Agency. (s. f.-a). *Sentinel-1*. Sentinel Online. https://sentinels.copernicus.eu/copernicus/sentinel-1

European Space Agency. (s. f.-b). *Sentinel-1 Toolbox*. Science Toolbox Exploitation Platform. https://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-1-toolbox/

Global Volcanism Program. (2017). Report on Fuego (Guatemala): Strombolian activity, lava and pyroclastic flows, lahars, and ash plumes, June 2014–December 2015. *Bulletin of the Global Volcanism Network, 42*(5). Smithsonian Institution. https://doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN201705-342090

Global Volcanism Program. (2026). Fuego (342090). En *Volcanoes of the World* (v. 5.4.0; 7 de agosto de 2026) [Base de datos]. Smithsonian Institution. https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW5-2026.5.4

Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (2018). *Mapa preliminar de amenaza de lahares: Crisis eruptiva del volcán de Fuego (junio 2018). Escenario A (lluvias moderadas)* [Mapa]. Departamento de Investigación y Servicios Geofísicos, Vulcanología. https://insivumeh.gob.gt/mapas-de-amenaza-volcanica/

Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (2026, 5 de agosto). *Boletín vulcanológico especial BEFGO-066-2026: Finaliza la erupción del volcán de Fuego*. https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2026/08/BEFGO_Activo.pdf

Iverson, R. M., Schilling, S. P., & Vallance, J. W. (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *GSA Bulletin, 110*(8), 972–984. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1998)110<0972:ODOLIH>2.3.CO;2

Main-Knorn, M., Pflug, B., Louis, J., Debaecker, V., Gascon, F., & Müller-Wilm, U. (2017). Sen2Cor for Sentinel-2. En *Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII* (Vol. 10427). SPIE. https://doi.org/10.1117/12.2278218

Monsalve, M. (2000). *Guía para la evaluación de la amenaza volcánica y elaboración de mapas de amenaza volcánica potencial en Colombia*. Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales, INGEOMINAS.

Patra, A. K., Bauer, A. C., Nichita, C. C., Pitman, E. B., Sheridan, M. F., Bursik, M., Rupp, B., Webber, A., Stinton, A. J., Namikawa, L. M., & Renschler, C. S. (2005). Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 139*(1–2), 1–21. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.06.014

Schilling, S. P. (1998). *LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones* (Open-File Report 98-638). U.S. Geological Survey. https://pubs.usgs.gov/of/1998/0638/

Schilling, S. P. (2014). *Laharz_py: GIS tools for automated mapping of lahar inundation hazard zones* (Open-File Report 2014-1073).

U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/ofr20141073

Sola, I., García-Martín, A., Sandonís-Pozo, L., Álvarez-Mozos, J., Pérez-Cabello, F., González-Audícana, M., & Montorio Llovería, R. (2018). Assessment of atmospheric correction methods for Sentinel-2 images in Mediterranean landscapes. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 73*, 63–76. https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.020

U.S. Geological Survey. (s. f.). *Monitoring volcano seismicity provides insight to volcanic structure*. Volcano Hazards Program. https://www.usgs.gov/programs/VHP/monitoring-volcano-seismicity-provides-insight-volcanic-structure

Vera, P., Ortega, P., Casa, E., Santamaría, J., & Hidalgo, X. (2019). Modelación numérica y mapas de afectación por flujo de lahares primarios en el drenaje sur del volcán Cotopaxi. *Revista Politécnica, 43*(1), 61–72. http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-01292019000200061&lng=es&nrm=iso

Williams, R., Stinton, A. J., & Sheridan, M. F. (2008). Evaluation of the Titan2D two-phase flow model using an actual event: Case study of the 2005 Vazcún Valley lahar. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 177*(4), 760–766. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.01.045

Sobre los autores

M.Sc. Carla María Fernanda Chún Quinillo

Maestra en Gestión Integral de Riesgo de Desastres egresada de la UNAN-MANAGUA, especialista en Sistemas de Información Geográfica por la USAC, Ingeniera Geóloga egresada del CUNOR-USAC, pasantía en la Universidad de Florencia, Italia. Participó en cursos como: Prevención y manejo de desastres volcánicos realizado en Hokkaido, Japón, al igual que en el Curso internacional de entrenamiento en el monitoreo de amenazas volcánicas en la Universidad de Hilo Hawái y en el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y en el Curso Internacional de Volcanología Olot– La Palma. Actualmente es analista e investigadora en el Observatorio Guatemalteco de Vigilancia Volcánica de la Universidad Mariano Gálvez. Formó parte del grupo de investigadores del Proyecto Ixchel liderado por la universidad de Edimburgo y la Universidad del Valle de Guatemala. Trabajó como consultora para el Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático. Así mismo laboró en el departamento de investigación y servicios geofísicos del INSIVUMEH del 2015 al 2020. Ha participado como coautora en artículos publicados en *Journal of Volcanology and Geothermal Research y otras revistas académicas. Correo: carla.chun@umg.edu.gt. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4002-6320*

Ing. Geól. Dulce María Esther González Domínguez

Estudiante de la maestría en Gestión Integral de Riesgo de Desastres de la UNAN-MANAGUA, Ingeniera Geóloga egresada del CUNOR-USAC, Participó en cursos como: Prevención y manejo de desastres volcánicos realizado en Hokkaido, Japón. Ha participado como ponente en talleres a nivel nacional e internacional. Es analista e investigador en el Observatorio Guatemalteco de Vigilancia Volcánica de la Universidad Mariano Gálvez. Formó parte del departamento de investigación y servicios geofísicos del INSIVUMEH, donde se especializó en monitoreo volcánico y en la elaboración de mapas de

amenaza, participando activamente en la atención de crisis eruptivas entre 2015 y 2019. Posteriormente, trabajó como consultora para el Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático y ha sido parte del proyecto Proyecto IXCHEL, enfocándose en amenazas volcánicas y vulnerabilidad en entornos volcánicos. Correo: dulce.gonzalez@umg.edu.gt. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6314-7929

Ing. Geol. Kevin Carlos Enrique Chún Quinillo

Actualmente cursa la Maestría en Geomática y cuenta con diplomados en Sismología y Medio Ambiente. Ingeniero Geólogo egresado del CUNOR-USAC. Se desempeña como coordinador de Sismología e investigador del Servicio Sismológico de Guatemala (SSG), de la Universidad Mariano Gálvez de Guatemala, y participa en actividades de investigación y monitoreo volcánico en el Observatorio Guatemalteco de Vigilancia Volcánica (OGVV). Su experiencia científica comprende el monitoreo y análisis de señales sísmicas, la investigación de procesos volcánicos y la elaboración de mapas de peligros volcánicos, con énfasis en la evaluación y modelación de corrientes de densidad piroclástica y lahares. Asimismo, cuenta con experiencia en sistemas de información geográfica y análisis espacial aplicados al estudio de amenazas geológicas y la gestión del riesgo de desastres. Ha participado en congresos científicos internacionales e impartido charlas en el extranjero, contribuyendo al intercambio y la divulgación del conocimiento científico. Correo: kevin.chun@umg.edu.gt. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5996-1285

Wendel Alexander Gutiérrez Paxtor

Estudios en Física en la universidad de San Carlos de Guatemala con experiencia en geofísica. Participó en cursos como: Prevención y manejo de desastres volcánicos realizado en Hokkaido, Japón. Es analista e investigador en el Observatorio Guatemalteco de Vigilancia Volcánica de la Universidad Mariano Gálvez. Interesado en el estudio y modelado de fenómenos volcánicos, sísmicos y meteorológicos. Cuenta con experiencia en programación científica, automatización de procesos mediante Python y Bash, y ejecución de simulaciones de alta resolución utilizando técnicas de computación de alto rendimiento (HPC). Sus intereses académicos incluyen los métodos numéricos, las simulaciones computacionales, el análisis de datos geofísicos y el desarrollo de herramientas computacionales para la investigación científica. Correo: wendel.gutierrez@umg.edu.gt. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5493-2118

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.

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

Análisis geométrico del deslizamiento Las Cuevas, Chitul, Santa Cruz Verapaz, Guatemala

Geometric analysis of the Las Cuevas landslide, Chitul, Santa Cruz Verapaz, Guatemala

Sergio David Morán Ical[1,*], Luis Alfredo Godoy Morales[1], Andrea María Reiche de la Cruz[1] y Brayan Vásquez[2]

[1] Carrera de Geología, Centro Universitario del Norte (CUNOR), Universidad de San Carlos de Guatemala, Cobán, Alta Verapaz, Guatemala.
[2] Servicios de Ingeniería Vásquez, Tactic, Alta Verapaz, Guatemala.
*** Autor de correspondencia:** katmical@profesor.usac.edu.gt
Correos: luis.godoy@profesor.usac.edu.gt; andrea.reiche@profesor.usac.edu.gt; vasmil06@gmail.com
ORCID: Sergio David Morán Ical https://orcid.org/0009-0006-0898-4683; Luis Alfredo Godoy Morales https://orcid.org/0009-0004-8554-1734; Andrea María Reiche de la Cruz https://orcid.org/0009-0009-1751-7122

Recibido: 11/09/2026 | **Aceptado:** 12/10/2026 | **Publicado:** 27/11/2026

Resumen

El 16 de agosto de 2024 ocurrió un deslizamiento traslacional en el talud de la carretera CA-14, km 199+810 (Las Cuevas, Chitul, Santa Cruz Verapaz, Alta Verapaz), que obstruyó parcialmente la vía hacia Cobán y dañó el cableado eléctrico, dejando sin energía a Santa Cruz y San Cristóbal Verapaz por varios días. Para evaluar los factores geológicos y antrópicos involucrados se realizó cartografía geológico-estructural, un levantamiento topográfico con dron y un análisis cinemático con proyección estereográfica (Dips). La superficie de deslizamiento corresponde a una falla (F1) de orientación media 44/305 (buzamiento/dirección de buzamiento) en caliza cristalina, limitada al sur por una segunda falla (F2) de orientación 70/175, y subparalela al talud de corte (N35E/70NW; 60°–70°), con $\psi_f > \psi_p$ (60°–70° > 40°–45°). El volumen desplazado, calculado a partir del relieve pre-deslizamiento, fue de ±39 500 m^3 (≈79 000–103 000 t, con densidades de 2.0–2.6 t/m^3). El análisis indica una rotura plana, sin que pueda descartarse una componente en cuña asociada a F2; se recomienda calcular el ángulo de fricción (φ) para verificar la condición $\psi > \varphi$. La orientación desfavorable del plano estructural, la disolución kárstica y el corte al pie de la ladera por obras de ampliación, junto con ≈75–98 mm de lluvia estimada (reanálisis) en la semana previa, crearon las condiciones de inestabilidad. Se recomienda el monitoreo, el drenaje y el rediseño del talud en tramos con geometría similar.

Palabras clave: análisis cinemático; CA-14; deslizamiento traslacional; geología estructural; karst; proyección estereográfica

Abstract

On August 16, 2024, a translational landslide occurred on a cut slope of highway CA-14, km 199+810 (Las Cuevas, Chitul, Santa Cruz Verapaz, Alta Verapaz, Guatemala). It partially blocked the road to Cobán and damaged power lines, leaving Santa Cruz and San Cristóbal Verapaz

without electricity for several days. To assess the geological and anthropogenic factors, we combined structural-geological mapping, a drone-based topographic survey and kinematic analysis using stereographic projection (Dips). The sliding surface is a fault (F1) with a mean orientation of 44/305 (dip/dip direction) in crystalline limestone, bounded to the south by a second fault (F2) oriented 70/175, and subparallel to the cut slope (N35E/70NW; 60°–70°), with a slope face angle greater than the plane dip (60°–70° vs. 40°–45°). The displaced volume, estimated from the pre-failure surface, was ±39 500 m^3 (≈79 000–103 000 t, for densities of 2.0–2.6 t/m^3). The analysis indicates planar failure, although a wedge component associated with F2 cannot be ruled out; calculating the friction angle (φ) is recommended to verify the planar-failure condition ($\psi_p > \varphi$). An unfavorable structural plane, karst dissolution and toe excavation for road widening, together with ≈75–98 mm of estimated rainfall (reanalysis) in the preceding week, created the unstable conditions. Monitoring, drainage and slope redesign are recommended for similar road sections.

Keywords: CA-14; karst; kinematic analysis; stereographic projection; structural geology; translational landslide

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

Morán Ical, S. D., Godoy Morales, L. A., Reiche de la Cruz, A. M., & Vásquez, B. (2026). Análisis geométrico del deslizamiento Las Cuevas, Chitul, Santa Cruz Verapaz, Guatemala. *Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra, 13*(1), 51–66.

1. Introducción

El análisis de las estructuras geológicas requiere comprender e interpretar la disposición espacial de estructuras planares (planos) y lineales (principalmente intersección de planos). La visualización en 3D de ellas es fundamental, utilizando para ello las redes estereográficas. Su aplicación en la ingeniería geológica es importante debido a que todo macizo rocoso contiene patrones de discontinuidades de orientaciones variada, por lo que el reto, es reconocimiento de las tendencias y geometrías que pueden indicar algún tipo de rotura o deslizamiento.

El caso analizado corresponde a un deslizamiento de tipo traslacional ocurrido el 16 de agosto de 2024, sobre la CA-14, kilómetro 199 ruta las Verapaces (Figura 1). Esto ocasionó el cierre temporal de la vía de acceso principal a la ciudad de Cobán y corte de energía eléctrica. Suelo y rocas fueron los dos tipos de materiales desplazados. El suelo residual de textura arcillosa es el resultado del intemperismo de rocas calcáreas, principalmente calizas de textura cristalina, que presentan un relativo grado de disolución a lo largo de los planos de discontinuidad.

El interés fue evaluar cuales fueron las variables geológicas o condiciones antrópicas que permitieron la ocurrencia de este movimiento de ladera. Con ello, enfatizar la necesidad de que en

estos tipos de trabajos es fundamental considerar la geología.

Figura 1
Ubicación del sitio de estudio dentro de su contexto local y regional



2. Fundamentos teóricos

En geología estructural, la orientación de planos puede expresarse mediante diferentes sistemas de notación (Ragan, 2009):

Rumbo y buzamiento: el rumbo es la línea horizontal contenida en el plano y el buzamiento es el ángulo de inclinación medido perpendicularmente al rumbo (ejemplo: N45E/75NW).

Dirección de buzamiento (*dip direction*): alternativa que utiliza directamente la dirección hacia donde se inclina el plano, acompañada del ángulo de buzamiento (ejemplo: 45/N305).

Regla de la mano derecha: convención que establece que el rumbo debe expresarse de forma que, al situar la mano derecha sobre la línea de rumbo, los dedos apunten hacia el lado del buzamiento.

Estos sistemas permiten describir con precisión la posición espacial de estructuras geológicas y son fundamentales para la elaboración de mapas y cortes geológicos. En este documento, los datos se presentan principalmente con la notación de dirección de buzamiento (*dip direction*) y, en algunos casos, con rumbo y buzamiento.

3. Metodología

3.1 Análisis de la información existente

Se ha tenido acceso tanto de información digital (imágenes), reportes de redes sociales, revisión bibliográfica sobre la temática de aspectos técnico-científico sobre las principales variables a considerar en el análisis de dicho movimiento de ladera. Así mismo se realizó una búsqueda de información meteorológica o sísmica de la región.

Ante la falta de registros diarios de estación disponibles para el periodo, la precipitación de los días previos al evento (9 al 16 de agosto de 2024) se estimó a partir de productos de modelos y reanálisis: la API histórica de Open-Meteo (modelos combinados y ERA5) y NASA POWER (MERRA-2 corregido), para los puntos de Chitul, Cobán, San Cristóbal Verapaz y Tactic (Hersbach et al., 2020; NASA Langley Research Center, s. f.; Zippenfenig, 2024).

3.2 Visita de campo

Dos actividades fueron llevadas a cabo: la descripción litológica y estructural del sitio y el levantamiento topográfico con *Dron DJI Mavic 4 pro-modelo L3A*, resultando de ello además de la imagen aérea del sitio, curvas de nivel con equidistancias de 0.20 cm. La visita de campo se centró en la realización de un recorrido a lo largo de la ruta principal con el objeto de recopilar información litológica y estructural del tramo de carretera que fue afectado por dicho problema.

3.3 Gabinete

Incluyó el tratamiento estadístico de los datos de estructuras geológicas, geometría del talud de corte, características de la superficie de deslizamiento etc. Este tiempo, permitió la elaboración del mapa topográfico, geológico y de pendiente.

4. Resultados

4.1 Geología del sitio

Dentro del contexto donde ocurrió el movimiento de ladera, se encuentran expuestas rocas sedimentarias principalmente calcáreas. Se han reconocido dos niveles de caliza cristalina, diferencias radican en su contenido mineral, siendo de dolomita (ClzO), calcita (ClzC), o contenido de lodo calcáreo. Así mismo, se identifica una unidad de caliza brechosa (Br), cubierta por un sustrato pedológico, compuesto por dos niveles de suelo, uno residual de caliza y otro de ceniza volcánica intemperizada (TQs). Como procesos secundarios se cita la presencia de planos de discontinuidad (fallas y diaclasas) y disolución a diferentes escalas. Las cavidades de disolución algunos de pocos milímetros de dimensión, hasta la presencia espacios cavernosos de varios metros. En la Tabla 1 se resumen las características principales del deslizamiento.

Se identificaron varios rasgos estructurales (lineamientos) algunas con tendencia norte-sur y otras noreste. Trazas de fallas medidas en campo, corresponden a estas tendencias, donde sus buzamientos van desde los 50° a 75°. Muchos de estas estructuras, ponen en contacto a las distintas unidades de roca.

Con respecto a las cavernas, se han documentadas por lo menos tres, resaltando dos. Una conocida como "Las cuevas de Chitul", y otra recién expuesta ubicada al norte (Figura 3).

Tabla 1

Ficha técnica del deslizamiento Las Cuevas

Fecha	16 de agosto de 2024
Ubicación	CA-14, km 199+810, Las Cuevas, Chitul, Santa Cruz Verapaz, Alta Verapaz
Tipo	Deslizamiento traslacional: rotura plana, sin descartar una componente en cuña
Planos de falla	F1: 44/N305 (movimiento N285); F2: 70/N175 (límite sur)
Talud de corte	N35E/70NW (60°–70°)
Plano expuesto	154 m (base) y 35 m (parte alta) de longitud; 52.6 m de ancho
Volumen	±39 500 m³ (≈79 000–103 000 t)
Lluvia previa	80–84 mm del 9 al 15 de agosto (estimada)
Impactos	Obstrucción parcial de la CA-14; Santa Cruz y San Cristóbal Verapaz sin energía eléctrica por varios días

Nota. Elaborada con datos de este artículo; lluvia estimada (Figura 6).

Figura 2

Sustrato rocoso y suelo residual de roca calcárea, desplazado por movimiento de ladera

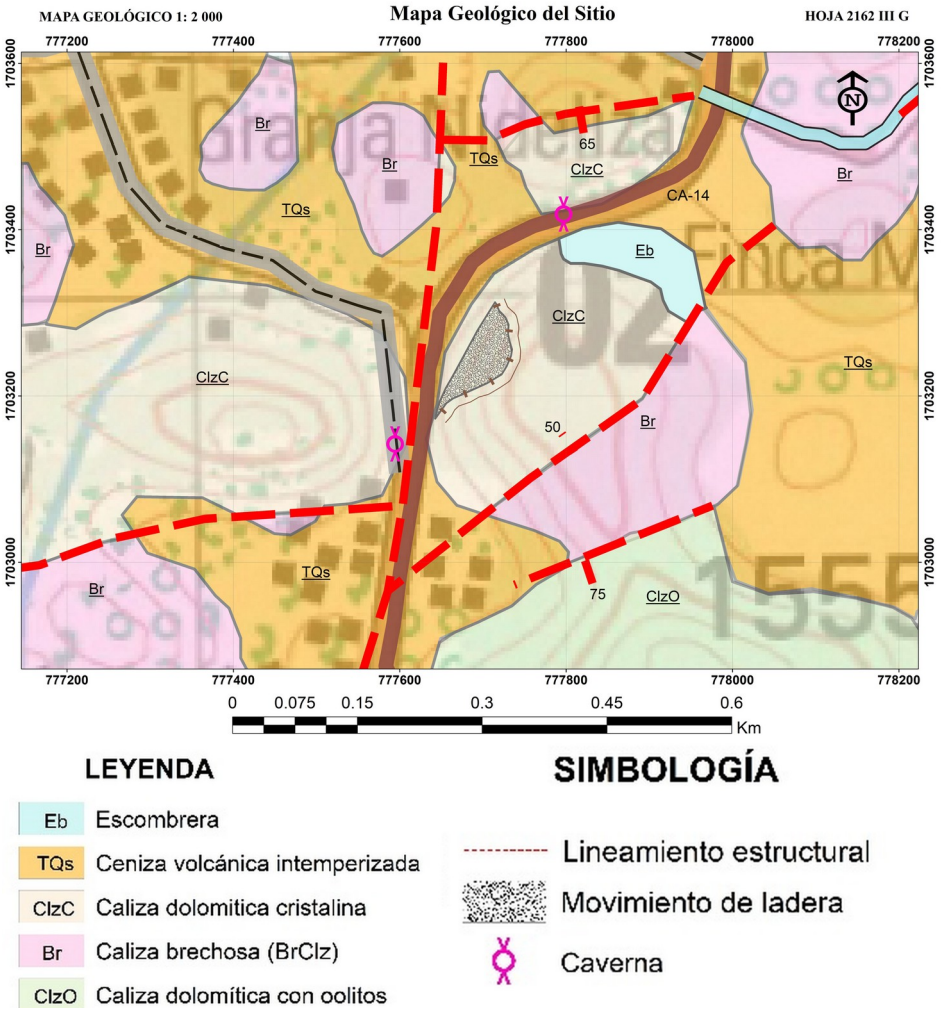


4.2 Características del plano de deslizamiento

El plano de falla que es igual al plano de movimiento o deslizamiento posee aproximadamente una longitud en su parte baja y alta de 154 m y 35 m respectivamente, y un ancho de exposición de 52.6 m. La forma de la superficie de deslizamiento, se clasifica como ondulada a irregular, cambiando de dirección desde su extremo sur a norte, considerando un plano medio de 44/N305 (F1), según su dirección de inclinación (buzamiento).

Figura 3

Mapa geológico del sitio de estudio

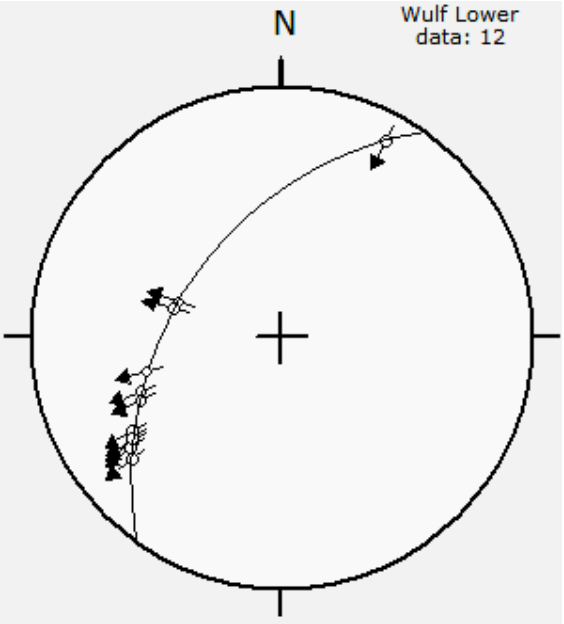


Nota. El orden relativo de las unidades se refiere a la base geológica del cuadrángulo Cobán, actualizada a escala 1:50 000.

Se categorizó como una falla geológica, debido a la existencia de estrías de movimiento sobre la superficie de discontinuidad. Estos pueden ser catalogados en tres grupos según el ángulo de cabeceo (pitch): un grupo entre 20°- 50° W, el otro entre 75°- 80° W y el de 10° N el menos evidente (Figura 3). Según los indicadores de sentido de movimiento (tectoglifos: mineralización en escalón y fracturas Riedel), muestran un sentido de movimiento de tipo sinistral inverso, normal sinistral a normal pura, sugiriendo fases de reactivación (Figura 4).

Figura 4

Red estereográfica construida para mostrar los diferentes vectores y sentido de movimiento del bloque desplazado en campo



Se encontraron sobre el plano de falla costras de travertino de 7 cm de espesor, indicando circulación de agua a lo largo del plano de discontinuidad.

4.3 Tipo de movimiento de ladera

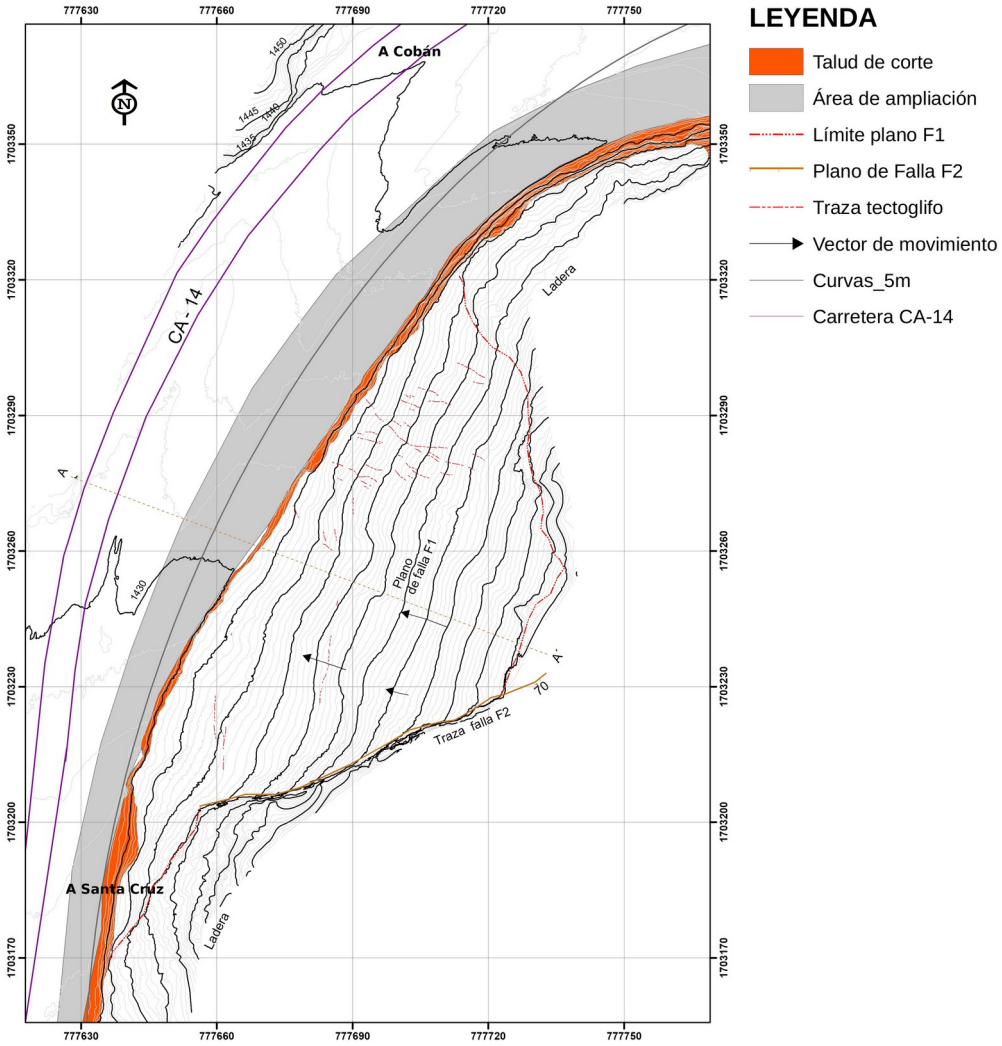
Existen una variedad de movimiento de ladera o masa: deslizamiento, flujo, desprendimiento, vuelco y avalanchas (González de Vallejo et al., 2002). Los deslizamientos se pueden subdividir en rotacional o traslacional.

Dado que el volumen de roca desplazada ocurrió a lo largo de un plano de falla geológica (Figuras 2 y 5), dicho movimiento de ladera se clasificó como deslizamiento de tipo traslacional. Este plano (F1) es limitado en su extremo sur por otro patrón de falla con orientación 70/N175, identificada como F2 (Figura 5).

Según las características de la discontinuidad, la rugosidad del plano se puede clasificar como ondulada lisa (Hoek & Bray, 1981). Esta irregularidad a lo largo del plano de falla (F1) es evidenciada además con las curvas de nivel topográficas, mostradas en la Figura 5. Además, se han identificado tanto la traza de tectoglifos y el vector de movimiento que experimentó el material deslizado (Figura 5), mediante imagen georreferenciada cuyo tamaño de pixel es de 1.28 cm × 1.28 cm.

Figura 5

Relieve, extensión y relación del plano de deslizamiento traslacional (F1) con otras estructuras



4.4 Precipitación previa al evento

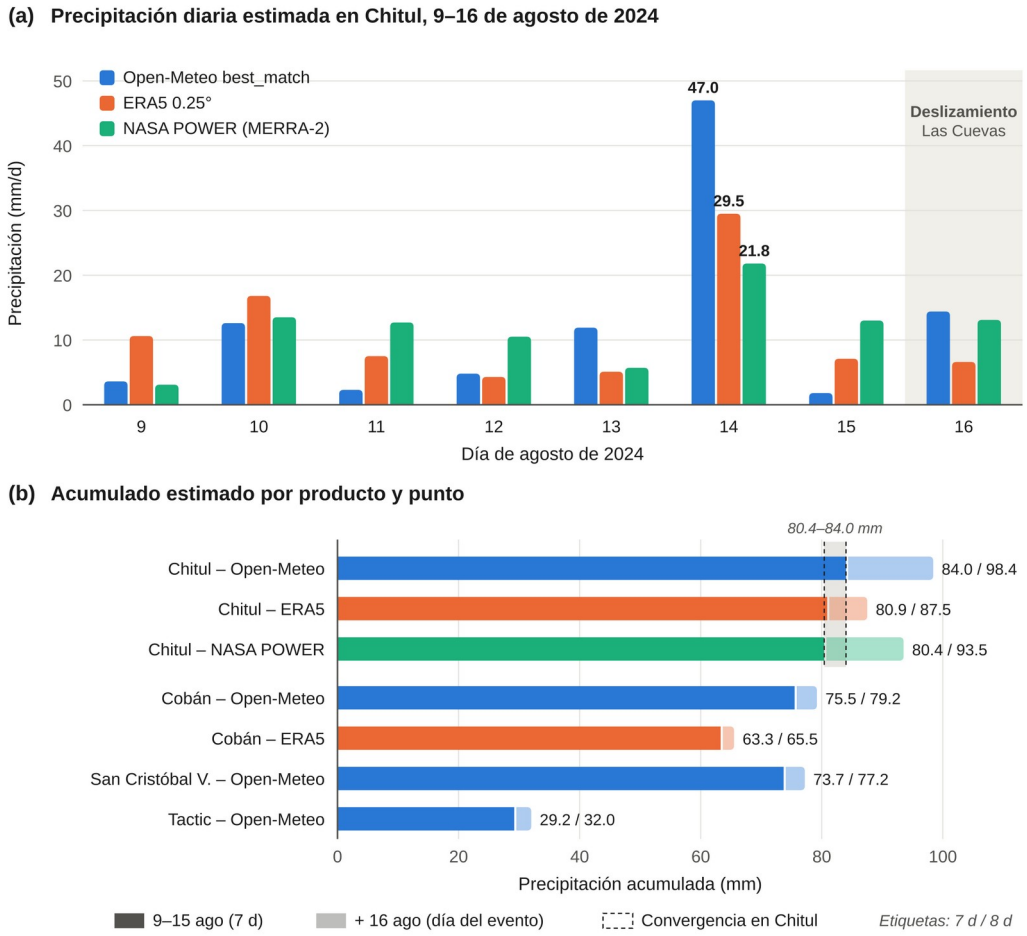
La Figura 6 resume las estimaciones de precipitación para los días previos al evento. La distribución diaria en Chitul (Figura 6a) muestra lluvias moderadas y discontinuas entre el 9 y el 13 de agosto (2.3–16.8 mm/día, según el producto) y un máximo el 14 de agosto, con 47.0 mm según Open-Meteo y 29.5 y 21.8 mm según ERA5 y NASA POWER, respectivamente. El 15 de agosto la lluvia fue variable entre productos (1.8–13.0 mm) y el 16, día del deslizamiento, se registraron de nuevo lluvias moderadas (6.6–14.4 mm).

Los acumulados (Figura 6b) muestran que, en Chitul, los tres productos convergen en 80.4–84.0 mm entre el 9 y el 15 de agosto de 2024 (≈11.5–12.0 mm/día), valor que aumenta a 87.5–98.4 mm al incluir el 16 de agosto. En Cobán y San Cristóbal Verapaz los acumulados de siete días son similares (63.3–75.5 mm), mientras que en Tactic fueron menores (29.2 mm). Las diferencias en el máximo diario se atribuyen probablemente a la resolución espacial de cada producto: Open-Meteo combina modelos de mayor resolución, mientras que ERA5 (0.25°) y

NASA POWER (MERRA-2) tienden a suavizar las lluvias convectivas locales. Estas cifras son estimaciones y no sustituyen mediciones de estación.

Figura 6

Precipitación estimada en Chitul y alrededores durante la semana previa al deslizamiento de Las Cuevas (9–16 de agosto de 2024)



Nota. (a) Precipitación diaria estimada en Chitul según Open-Meteo (modelos combinados, best_match), ERA5 (0.25°) y NASA POWER (MERRA-2); la franja sombreada indica el día del deslizamiento. (b) Acumulado por punto y producto: la barra sólida corresponde al periodo del 9 al 15 de agosto (7 días) y el tramo claro añade el 16 de agosto; las etiquetas indican el acumulado de 7 y 8 días, y las líneas discontinuas, el intervalo de convergencia en Chitul (80.4–84.0 mm). Elaboración propia con datos de Open-Meteo (Zippenfenig, 2024), ERA5 (Hersbach et al., 2020) y NASA POWER (NASA Langley Research Center, s. f.). Valores estimados, no medidos en estación.

5. Discusión

5.1 Rotura plana y en cuña

En el tema de la estabilidad de taludes, la ladera de un "cerro o montaña" puede considerarse como un talud como artificiales, también nombrados talud natural, y cuando es intervenida por el hombre siempre considerando esa geometría se le nombra talud de corte o artificial. Las condiciones en la que se puede considerar una rotura plana o en cuña son claras. En tanto la discontinuidad mantenga una la dirección y sentido de inclinación igual y a favorables a dos elementos de un talud (rumbo y en su inclinación) es considerada como rotura

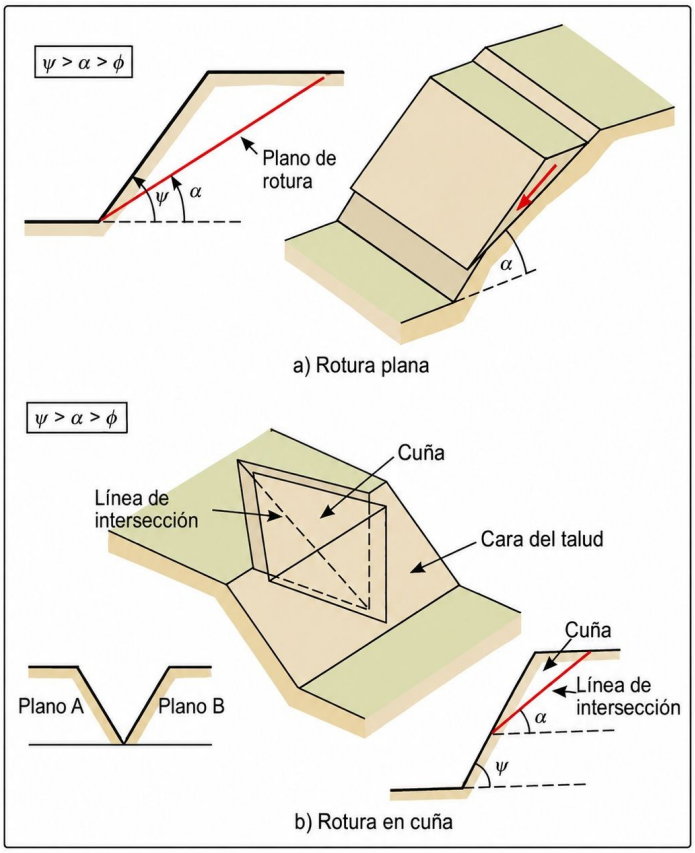
planar (Figura 7a), mientras que, en la segunda, intervienen dos planos de discontinuidad, donde un bloque de roca queda limitado por dos planos de discontinuidad, en cuya unión generan una intersección la cual se considera como una lineación de intersección (Figura 7b).

Estos dos planos crean una rotura en cuña (Figura 7b). Por lo tanto, bajo las condiciones en que se dio el movimiento de ladera, se puede considerarla como una rotura plana, donde la orientación del plano es de 44/N305, cuyo volumen de suelo y roca se desplazó con dirección N285 (Figura 5).

Sin embargo, F1 está limitada en su extremo sur por F2 (70/N175), por lo que no se descarta una componente de rotura en cuña a lo largo de la intersección de ambos planos. Para confirmar el mecanismo de rotura se recomienda calcular el ángulo de fricción (φ) del plano de deslizamiento y verificar la condición $\psi_p > \varphi$ (Hoek & Bray, 1981), así como analizar la línea de intersección F1–F2.

Figura 7

Condiciones para la rotura plana y para la rotura en cuña



Nota. Tomado de González de Vallejo et al. (2002).

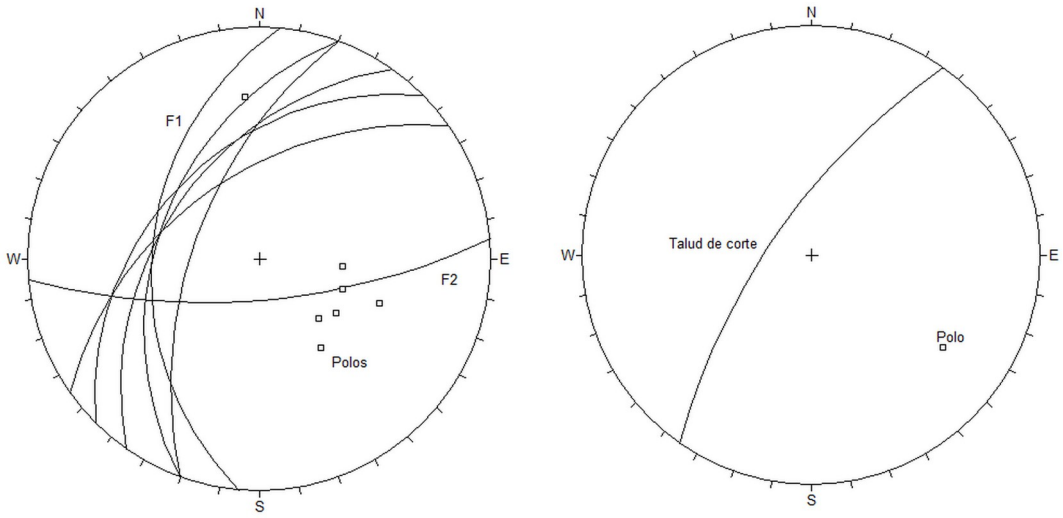
5.2 Relaciones geométricas entre discontinuidad y talud

En este caso nos referiremos a los valores geométricos del talud (diseño, Figura 7b), considerando principalmente su inclinación, su dirección o rumbo y, por otra parte, el ángulo de inclinación (buzamiento) del plano de deslizamiento (plano de rotura, Figura 7a).

Se realizaron por lo menos 6 medidas con brújula, a lo largo del plano de rotura que identificadas como F1 (Figura 7), las cuales fueron promediadas, considerándose como representativa la orientación 44/N305. Relacionado a este patrón de fracturas (F1), se encuentra otro set de discontinuidad que presentan una orientación de 70/N175, identificado como F2 (Figura 8a). Ambas conjunciones, junto a la geometría del talud (diseño), favorecieron al deslizamiento traslacional ocurrido el 16 de agosto de 2024.

Figura 8

Proyección estereográfica de las principales discontinuidades relacionadas con el movimiento de ladera de Chitul y del talud de corte



a) Proyección de planos de discontinuidad b) Proyección del talud de corte

Nota. En geología estructural, el polo de un plano de fractura es la proyección estereográfica de la línea normal (perpendicular) a dicho plano, representado como un punto en la red estereográfica.

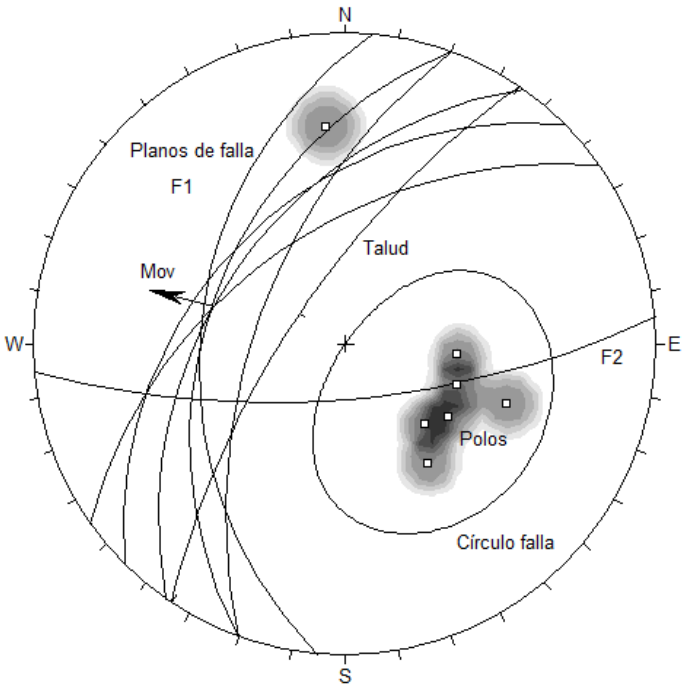
Las condiciones para un deslizamiento traslacional se ven con el paralelismo (Figura 8a) que mantienen los rumbos de planos de fallas medidas y el talud (Figura 8b) construido para este segmento del tramo de carretera CA-14, kilómetro 199 + 810, da idea preliminar para la ocurrencia de movimiento de ladera.

5.3 Círculo de falla

Existen una variedad de técnicas geométricas utilizadas para el estudio de la inestabilidad de un talud. Para nuestro caso, el análisis de la inestabilidad de la ladera se aborda aplicando el llamado *"círculo de falla"*. Dicho *método*, trabaja con la premisa de que todos los *"polos"* ubicados dentro del círculo, constituyen aquellos planos de fracturas críticos que potencialmente pueden fallar, bajo las condiciones geométricas en este caso del talud.

Figura 9

Relaciones geométricas entre el talud de corte y la disposición espacial de dos patrones de fracturas (fallas geológicas)

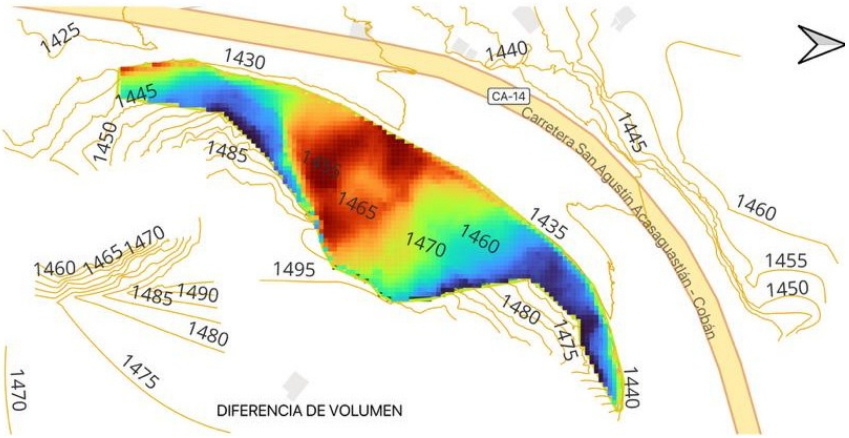


Por lo tanto, todos los planos medidos a lo largo del plano principal de falla (por ser un plano de superficie irregular), bajo la configuración geométrica del talud con dirección N35E/70NW, vemos que los polos de los planos se encuentran dentro de dicho círculo de falla, análisis realizado con la ayuda del programa Dips (Rocscience Inc., s. f.).

Bajo la geometría que estos presentan (talud y discontinuidad) indican que el potencial peligro en la ocurrencia de deslizamiento de tierra o roca a lo largo del plano F1 es alta (Figura 9). El volumen calculado mediante el programa QGIS 3.40.5 «Bratislava» (QGIS Development Team, 2025) fue de ±39 500 m^3, equivalente a ≈79 000–103 000 t considerando densidades de 2.0–2.6 t/m^3. Las tonalidades de rojo, muestra las variantes en el espesor del cuerpo de roca y suelo calculados utilizando el relieve pre-deslizamiento, a lo largo del plano de deslizamiento (Figura 10).

Figura 10

Morfología del espesor del cuerpo de roca y suelo desplazado a lo largo del plano de deslizamiento



Nota. Los tonos rojos indican los sectores con mayor espesor.

La lluvia de la semana previa (≈75–98 mm, con un máximo el 14 de agosto; Figura 6) no representa un evento extraordinario para la época lluviosa en la región, por lo que se interpreta como un factor desencadenante que actuó sobre una ladera ya condicionada por la orientación desfavorable de F1, el corte al pie del talud y la disolución kárstica. La infiltración a lo largo del plano de falla, evidenciada por las costras de travertino, pudo aumentar la presión de poro y reducir la resistencia al corte en la superficie de deslizamiento.

6. Conclusiones

En toda obra, cualquiera que sea sus dimensiones, es necesario considerar la geología y potenciales amenazas naturales del sitio, con la finalidad de minimizar los impactos a los elementos antrópicos. Un tramo de carretera analizado (área de afectación), con las técnicas sencillas o complejas con la finalidad de estudiar la estabilidad de una ladera, permite la identificación de *identificar tramos con potencial peligro*, en este caso a la ocurrencia de movimiento de ladera (ML) o masa.

Aplicando el método del círculo de falla y otras consideraciones geométricas del talud, en este caso para el tramo de ±150 m de longitud en la Carretera Centroamericana 14 (CA-14) kilómetro 199 + 810, se observó una relación de $\psi > \alpha$ desfavorable (Figura 5), entre la inclinación del talud de corte (60° a 70°) y las orientaciones e inclinaciones registradas a lo largo del plano de rotura (F1). Por otra parte, las condiciones de inestabilidad se logran interpretar observando la ubicación de las normales de estos planos de fractura y el *círculo de falla*, insinuando que las condiciones del terreno a lo largo de un tramo de 150 m quedaron desfavorables.

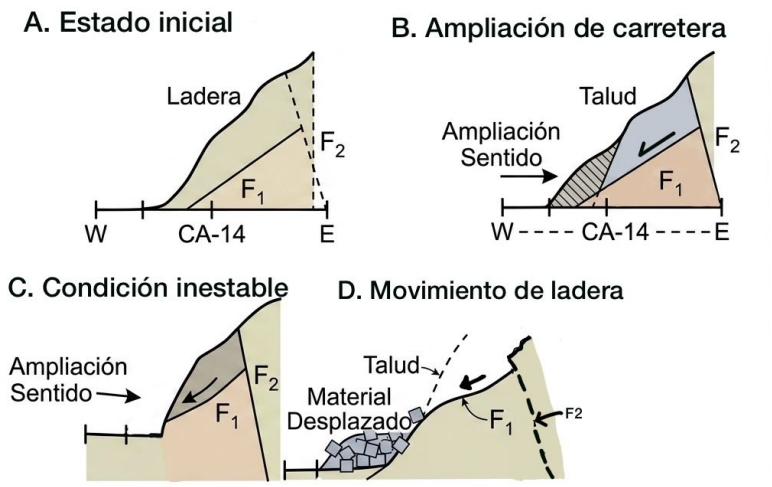
La presencia de un plano de falla geológica orientado 44/N305 (promedio), dentro de macizo rocoso (caliza cristalina), como factor condicionante (Figura 9), sumado a los cambios inducidos al pie de la ladera natural (trabajos de ampliación), creó las condiciones de inestabilidad para que un volumen de roca, que se deslizó el 16 de agosto de 2024, obstruyendo parte de la carretera que conduce a Cobán Alta Verapaz y afectara cableado eléctrico, el cual dejó sin energía eléctrica a los poblados de Santa Cruz

y San Cristóbal Verapaz. Los sucesivos escenarios en los cambios en las condiciones estables a inestables, se esquematiza en la Figura 11.

Las lluvias de la semana previa, estimadas en ≈75–98 mm mediante reanálisis, actuaron como factor desencadenante y no como causa única del deslizamiento.

Figura 11

Condiciones geológicas y antrópicas para el deslizamiento de Chitul



Recomendaciones

Se recomienda calcular el ángulo de fricción del plano F1 y analizar la intersección F1–F2; implementar monitoreo, obras de drenaje y el rediseño del talud en tramos de la CA-14 con geometría similar; y validar las estimaciones de precipitación con los registros diarios de la estación Cobán del INSIVUMEH.

Agradecimientos

Se agradece a la ingeniera agrónoma Lisbeth Esmeralda Paredes Matta, por la propuesta y gestión para adquirir el dron DJI Mavic 4 pro-modelo L3A.

Contribución de los autores

Sergio Morán: Conceptualización, Análisis formal, Adquisición de fondos, Investigación, Metodología, Redacción – borrador original. **Luis Godoy:** Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Software, Redacción – revisión y edición.

Andrea Reiche: Investigación, Adquisición de fondos, Metodología, Recursos, Redacción – revisión y edición.

Brayan Vásquez: Análisis formal, Software.

Financiamiento

Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Disponibilidad de datos

Los datos estructurales y los archivos generados mediante el levantamiento con dron que respaldan los resultados de este estudio están disponibles a través del autor de

correspondencia, Sergio Morán, previa solicitud razonable.

Referencias

González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., … Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146*(730), 1999–2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803

Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). *Rock slope engineering* (3.ª ed.). The Institution of Mining and Metallurgy.

NASA Langley Research Center. (s. f.). *NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER)* [Conjunto de datos; parámetro PRECTOTCORR, MERRA-2]. Recuperado el 20 de noviembre de 2026, de https://power.larc.nasa.gov/

QGIS Development Team. (2025). *QGIS Geographic Information System* (Versión 3.40.5 «Bratislava») [Software]. QGIS Association. https://qgis.org

Ragan, D. M. (2009). *Structural geology: An introduction to geometrical techniques* (4.ª ed.). Cambridge University Press.

Rocscience Inc. (s. f.). *Dips* [Software]. https://www.rocscience.com/software/dips

Zippenfenig, P. (2024). *Open-Meteo.com Weather API* (Versión 1.4.0) [Software]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.7970649

Sobre los autores

Sergio David Morán Ical

Ingeniero geólogo y profesor de la Carrera de Geología del CUNOR-USAC desde 1998, donde imparte cursos teórico-prácticos y promueve la interacción de sus estudiantes con profesionales de otras universidades, así como la asesoría académica como proceso de mejora continua. Ha desarrollado proyectos de cartografía geológica nacional a escala 1:50 000, como los cuadrángulos Granados y El Chol y, en 2026, la hoja Cobán, lo que le ha permitido integrarse a grupos de investigación internacionales de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y de la Universidad de Missouri-Kansas City. Actualmente lidera el proyecto «Evaluación de amenaza natural y estado actual de la infraestructura de escuelas públicas», del programa IGeoEs, con el propósito de fortalecer las capacidades de la Comisión Escolar para la Reducción de Desastres (CERED) del Ministerio de Educación (MINEDUC) y de las municipalidades de Alta Verapaz. Correo: katmical@profesor.usac.edu.gt. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0898-4683

Luis Alfredo Godoy Morales

Ingeniero geólogo y profesor de la Carrera de Geología del Centro Universitario del Norte (CUNOR) de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), en Cobán, Alta Verapaz. Su labor académica abarca la docencia universitaria, la investigación geocientífica y la formación de profesionales en ciencias de la Tierra. Sus áreas de interés incluyen la cartografía geológica y geomorfológica, la geología estructural, la evaluación de peligros geológicos y el análisis de los procesos geológicos asociados a la dinámica del territorio. Participa, además, en proyectos de investigación, campañas geológicas y la asesoría de trabajos de graduación. Correo:

luis.godoy@profesor.usac.edu.gt. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8554-1734

Andrea María Reiche de la Cruz

Ingeniera geóloga y magíster en Formulación y Evaluación de Proyectos con énfasis en Gestión Integral del Riesgo de Desastres por la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC). Es profesora de la Carrera de Geología del Centro Universitario del Norte (CUNOR-USAC), en Cobán, Alta Verapaz, donde coordina el Ejercicio Profesional Supervisado (EPS) y contribuye a vincular a los futuros profesionales de la geología con el ámbito laboral. Tiene experiencia en docencia universitaria, investigación, divulgación científica y actividades editoriales. Sus áreas de interés incluyen las ciencias geológicas, la gestión integral del riesgo de desastres, la formulación y evaluación de proyectos y la aplicación del conocimiento geocientífico en la gestión del territorio. Correo: andrea.reiche@profesor.usac.edu.gt. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1751-7122

Brayan Vásquez Milián

Ingeniero geólogo egresado del Centro Universitario del Norte (CUNOR) de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en Cobán, Alta Verapaz. Tiene más de ocho años de experiencia profesional en proyectos de infraestructura (carreteras, terraplenes, taludes, puentes y lotificaciones), en los que realiza estudios de suelos, reconocimientos geológicos, evaluaciones de riesgo, batimetrías, levantamientos geodésicos, estudios geofísicos e hidrológicos y procesamiento fotogramétrico. Correo: vasmil06@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.

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.)

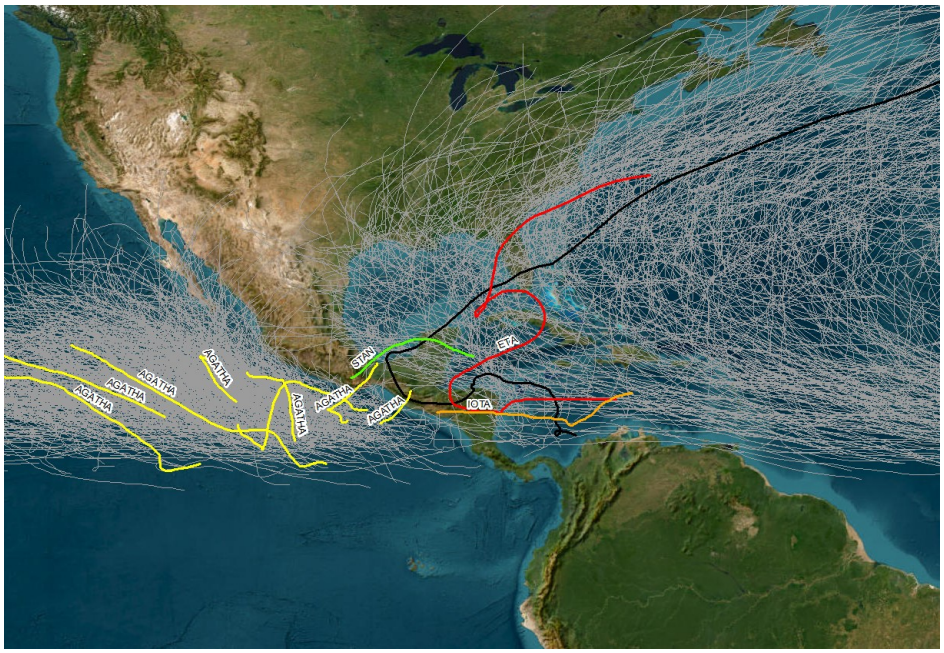
Requena, J., Mendoza M., D. L., & Bac G., V. O. (2026). Mapeo de inundaciones con Sentinel-1 tras Eta e Iota (2020): experiencia formativa en el Valle de Sula y Guatemala. *Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra, 13*(1), 67–82.

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.

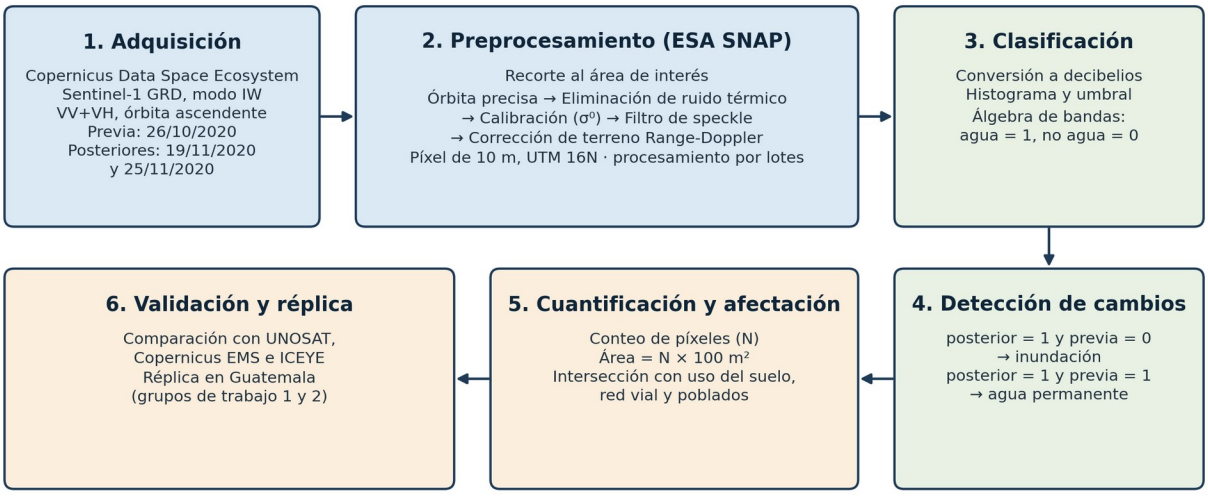
Los objetivos fueron: (a) delimitar y cuantificar el área inundada en el Valle de Sula durante Eta e Iota con Sentinel-1; (b) separar el agua de inundación del agua permanente mediante detección de cambios; (c) transferir la metodología a estudiantes de Geología del CUNOR y replicarla en zonas inundables 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

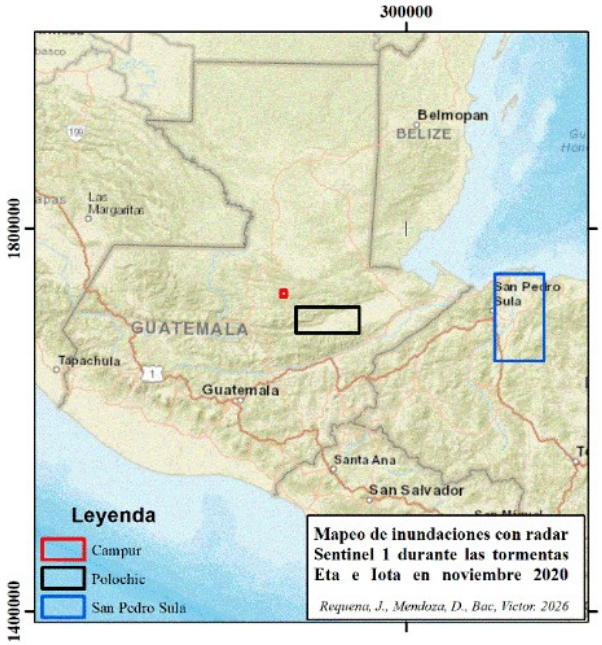
Carrera de Geología reprodujeron el flujo completo —descarga en el Copernicus Data Space Ecosystem, gráfico de preprocesamiento en SNAP, clasificación del agua y cuantificación en QGIS— durante al menos 7 horas teóricas y 5 prácticas, en septiembre de 2026. En la **réplica en Guatemala**, el grupo 1 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

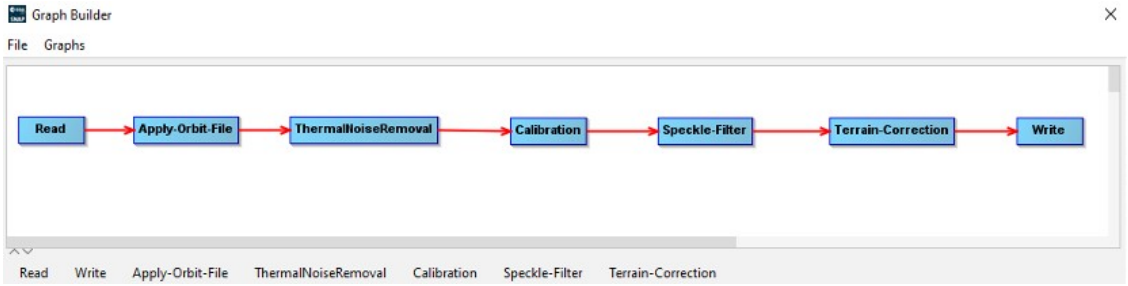
Nota. Contiene datos modificados de Copernicus Sentinel (2020), procesados por ESA. Los identificadores completos de los productos están disponibles a solicitud de los autores.

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 km²) 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).

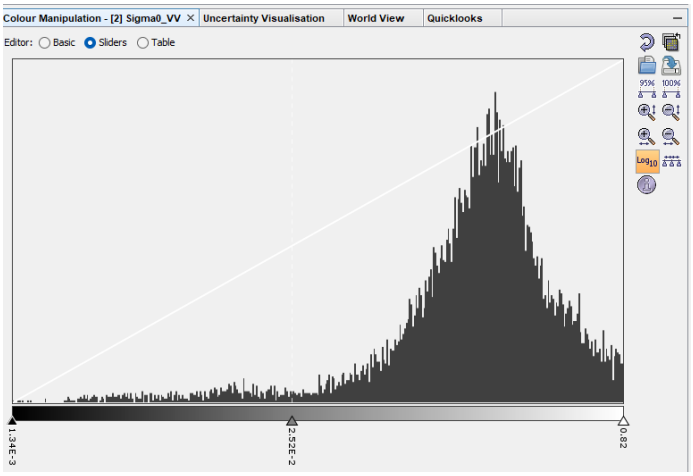
Tabla 4
Superficie de agua e inundación en el Valle de Sula el 19 de noviembre de 2020

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

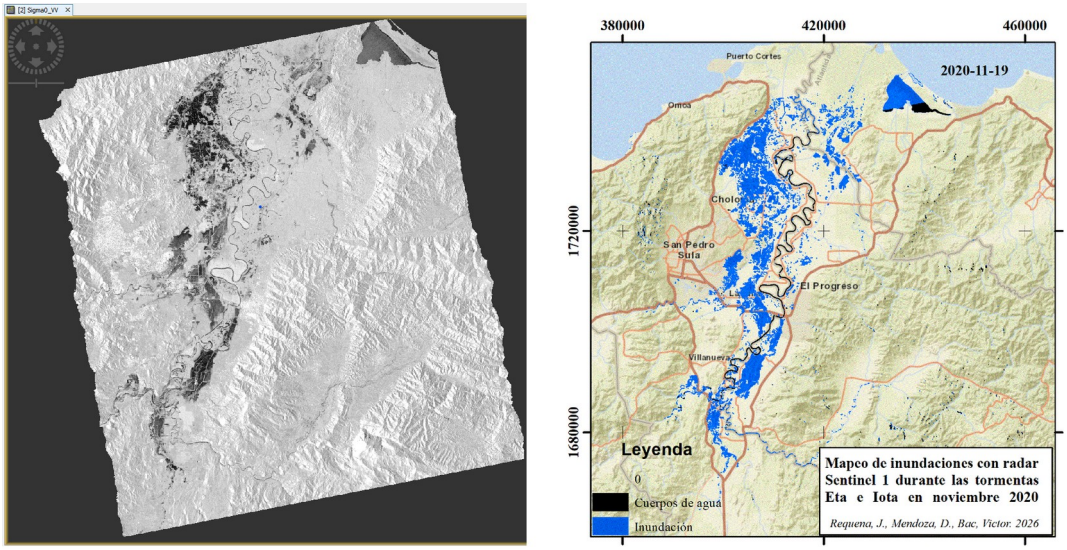


Nota. El cursor central marca el umbral de 0.025 (≈ −16 dB).

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

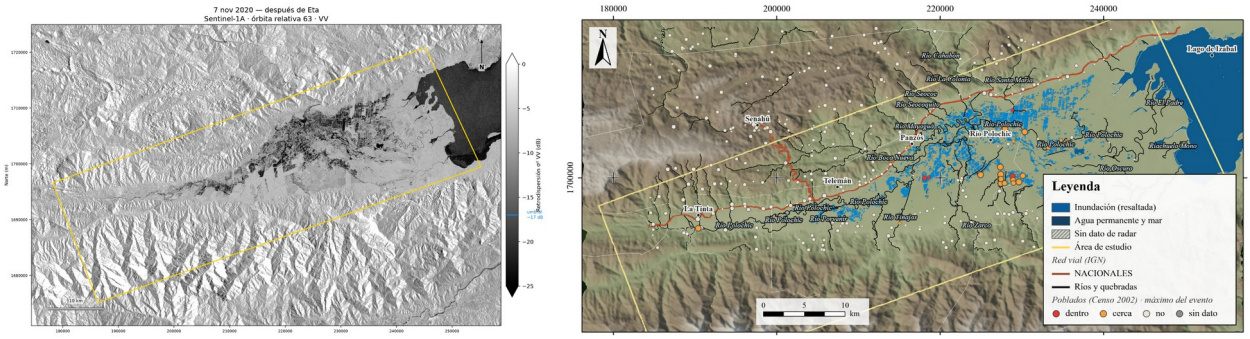
Área inundada por fecha en las zonas de Guatemala

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


7 nov 2020 — después de Eta
Sentinel-1A · órbita relativa 63 · VV
180000
200000
220000
240000
1700000
Río Polochic
Río Cahabón
Río Zarco
Río Jolomjixqui
Río Tinta
Río Chiquito
Río Sarapiquí
Río Sarapiquí Menor
Río Sarapiquí Mayor
Río Sarapiquí Mediano
Río Sarapiquí Grande
Río Sarapiquí Chico
Río Sarapiquí Pequeño

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.

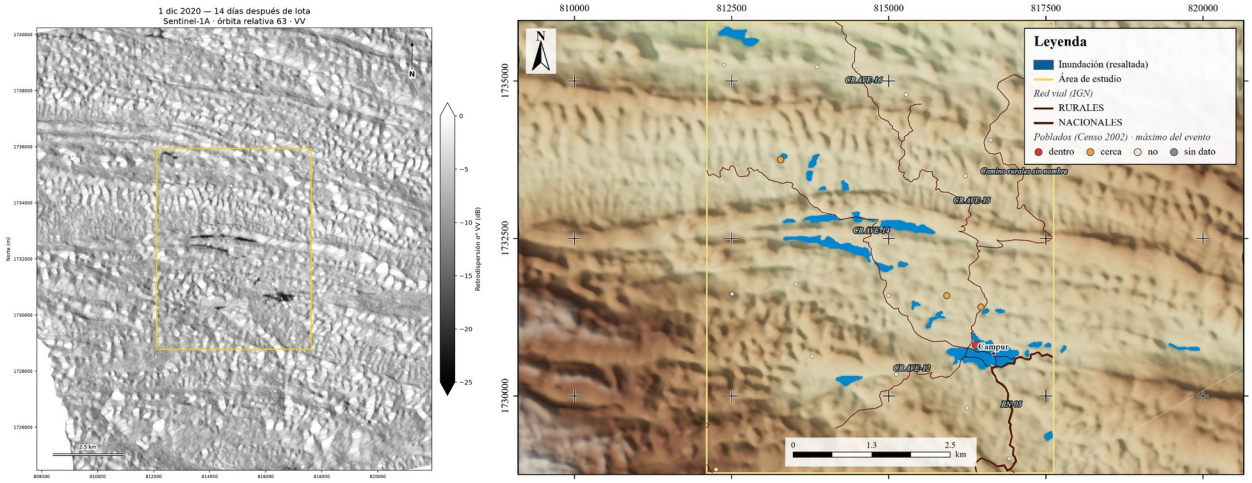
3.3 Campur

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.

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 REVISIÓN

Modelos predictivos y gestión hidrogeológica para la intrusión de agua salada en acuíferos costeros de Guatemala

Predictive models and hydrogeological management of saltwater intrusion in coastal aquifers of Guatemala

Rudy Machorro Sagastume

Asociación Guatemalteca de Geociencias Ambientales (ASGA), Ciudad de Guatemala, Guatemala.
Autor de correspondencia: rudy.machorro@yahoo.com
ORCID: Rudy Machorro Sagastume https://orcid.org/0009-0001-5822-1020

Recibido: 07/08/2026 | **Aceptado:** 17/09/2026 | **Publicado:** 27/11/2026

Resumen

Se revisaron los procesos hidrogeológicos que ocurren en los acuíferos costeros y las metodologías predictivas para evaluar la amenaza de intrusión de agua salada (IAS), con el fin de aportar pautas para la gestión y el desarrollo de las aguas subterráneas en las zonas costeras de Guatemala. Los modelos predictivos analizados son la ecuación de Ghyben-Herzberg, la corrección de Hubbert, la ecuación de Glover y la solución analítica de Verruijt, esta última aplicada a un ejemplo con dos escenarios de recarga. Se evalúa el bombeo en acuíferos costeros y el caudal crítico de los pozos para prevenir la intrusión cónica de agua salada (*upconing*). Se describe la dinámica del flujo subterráneo asociada a las variaciones del nivel del mar, en particular a las mareas terrestres y atmosféricas. El riesgo de IAS en pozos costeros depende sobre todo de la distancia del pozo a la línea de costa y de la profundidad de perforación respecto del nivel del mar. Como pautas mínimas de gestión se proponen: a) incluir en los estudios hidrogeológicos la salinidad de los pozos existentes; b) evitar perforar dentro de los primeros 50 m de la línea de costa; c) usar modelos predictivos y métodos geoeléctricos para estimar la profundidad de la interfase; d) monitorear los sólidos disueltos totales, la conductividad eléctrica y la salinidad durante la perforación, y e) promover una norma para el desarrollo sostenible de las aguas subterráneas que impida la sobreexplotación y la IAS en los acuíferos costeros.

Palabras clave: acuíferos costeros; Guatemala; interfase cónica; intrusión salina; mareas

Abstract

This review examines the hydrogeological processes that occur in coastal aquifers and the predictive methodologies used to assess the threat of saltwater intrusion (SWI), in order to provide guidelines for groundwater management and development in the coastal zones of Guatemala. The predictive models analyzed are the Ghyben-Herzberg equation, the Hubbert correction, the Glover equation and Verruijt's analytical solution, the latter applied to an example with two recharge scenarios. Pumping in coastal aquifers and the critical well discharge needed

to prevent saltwater upconing are evaluated. Groundwater flow dynamics associated with sea-level variations, particularly Earth and atmospheric tides, are described. The risk of SWI in coastal wells depends mainly on the distance of the well from the coastline and on the drilling depth relative to sea level. The following minimum management guidelines are proposed: a) include the salinity of existing wells in hydrogeological studies; b) avoid drilling within the first 50 m of the coastline; c) use predictive models and geoelectrical methods to estimate the depth of the interface; d) monitor total dissolved solids, electrical conductivity and salinity during drilling; and e) promote a standard for the sustainable development of groundwater that prevents overexploitation and SWI in coastal aquifers.

Keywords: coastal aquifers; conical interface; Guatemala; saline intrusion; tides

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

Machorro Sagastume, R. (2026). Modelos predictivos y gestión hidrogeológica para la intrusión de agua salada en acuíferos costeros de Guatemala. *Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra, 13*(1), 83–96.

1. Introducción

El uso de las aguas subterráneas se ha incrementado en las zonas costeras debido al crecimiento de la población. El objetivo de este artículo es aportar información básica acerca de los acuíferos costeros y su gestión ambiental. Cada zona costera tiene características hidrogeológicas y socioeconómicas distintas por lo que los escenarios costeros presentados en este artículo no son exhaustivos, pero incluyen conceptos de gestión comunes a todos los acuíferos costeros. La Figura 1 muestra la amplia variedad de procesos que actúan sobre los acuíferos costeros. Algunos procesos como el cambio climático y la actividad tectónica se manifiestan a largo plazo, pero otros como los tsunamis y los huracanes pueden impactar severamente el acuífero en el corto plazo.

Figura 1

Factores que influyen en los acuíferos costeros y sus efectos

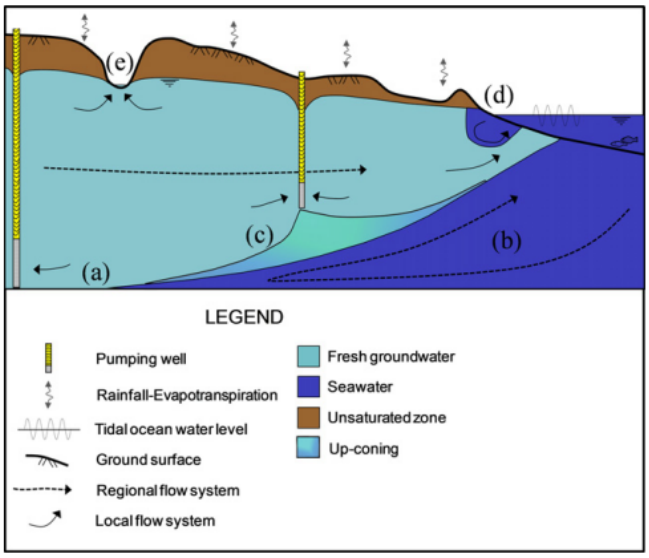


Nota. Modificado de Post et al. (2018).

Dentro de los diferentes procesos que ocurren en un acuífero costero, en este artículo se aborda la intrusión de agua salada (IAS) que se define como el desplazamiento de agua dulce por agua salada en un acuífero costero. La causa de la IAS puede ser natural debido a una disminución de la recarga de aguas subterráneas o a un aumento en el nivel local del mar, pero en la mayoría de casos el principal proceso impulsor es la sobreexplotación del acuífero. La IAS reduce el almacenamiento de agua dulce y en casos extremos ocasiona el abandono de pozos de agua domésticos cuando la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) excede los estándares de calidad de agua para consumo humano. En términos simples, el agua dulce se define como el agua que tiene SDT menores a 1 000 mg/l y concentraciones de cloruro menores a 250 mg/l. Para el agua marina estos valores son 35 000 y 19 000 mg/l, respectivamente. Los valores de SDT entre estas concentraciones corresponden a *la interfase agua dulce/agua salada* (también conocida como zona de mezcla o zona de transición), es decir, la superficie de contacto entre el agua dulce y el agua salada, la cual es una característica importante de los acuíferos costeros. La concentración de sales y densidad del fluido varía a lo largo de la interfase debido a la dispersión mecánica y la difusión molecular creando una circulación convectiva dentro de la cuña de agua salada.

La Figura 2 representa de manera simplificada el contexto de un acuífero costero no confinado con varios de los procesos hidrogeológicos que son objeto del presente artículo. La IAS puede ocurrir a lo largo de varios kilómetros hacia el interior del continente lo cual depende principalmente de la geometría del acuífero y el gradiente hidráulico, aunque también influye la mineralización de las aguas continentales la cual aumenta con la profundidad. La interfase puede variar de unos metros a varios kilómetros por lo que la gestión de un acuífero costero requiere que se determine con precisión la posición y espesor de la interfase.

Figura 2
Diagrama simplificado de un acuífero costero no confinado



Nota. (a) Punta de la cuña de agua marina; (b) circulación impulsada por la diferencia de densidades en la zona con agua marina; (c) intrusión cónica de agua salada; (d) procesos en la franja costera, como el frente de filtración de marea y la zona superior de recirculación de agua marina; (e) expresión superficial de agua subterránea sujeta a presión. Tomado de Werner et al. (2013).

2. Metodologías predictivas para evaluar la ocurrencia de la IAS

La caracterización del movimiento de agua salada en un sistema de aguas subterráneas es una tarea sumamente compleja. Las propiedades del sistema de flujo en la interfase son muy difíciles de determinar adecuadamente, manifestándose frecuentemente un flujo de densidad variable, flujo advectivo de agua subterránea y movimiento difusivo de agua entre zonas de alta salinidad y agua dulce. Frecuentemente existe incertidumbre elevada en relación con las características hidráulicas de los estratos acuíferos que se presentan entre el agua salada y el agua dulce.

Las ecuaciones analíticas que abordan exclusivamente los cambios en presiones hidráulicas o gradiente hidráulico de agua subterránea no pueden utilizarse para predecir la posición de la interfase. Existen otras ecuaciones analíticas que permiten identificar el riesgo de la IAS y que se describen a continuación.

2.1 Ecuación de Ghyben-Herzberg

En condiciones naturales el agua subterránea dulce de menor densidad sobreyace al agua salada más densa (Figura 3) y el espesor del agua dulce se puede estimar con base en la relación de las densidades respectivas. Esta relación la derivaron de manera independiente Ghyben y Herzberg a finales del siglo XIX:

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h \qquad (1)$$

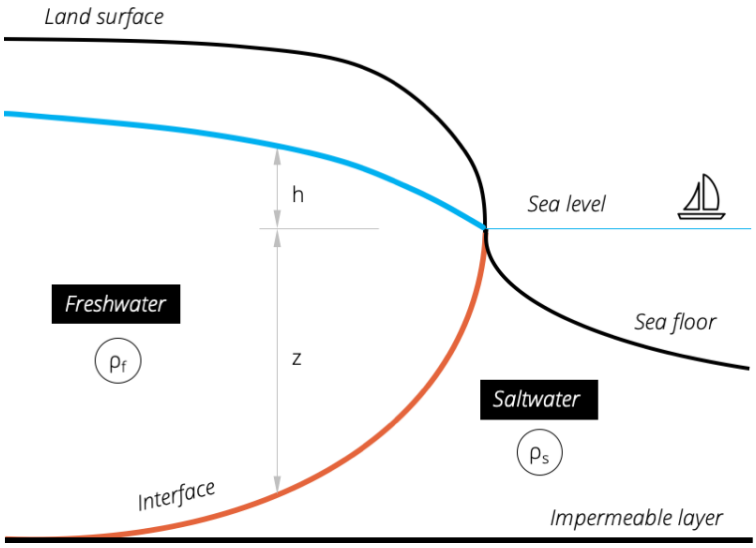
donde z es el espesor del agua dulce entre la interfase y el nivel del mar; ρ_f, la densidad del agua dulce (1.000 g/cm³ a 20 °C); ρ_s, la densidad del agua salada (1.025 g/cm³), y h, el espesor del agua dulce entre el nivel del mar y el nivel freático.

Aunque la diferencia de densidades es pequeña, la ecuación (2), obtenida a partir de la ecuación (1), indica que por cada metro de agua dulce por encima del nivel del mar hay 40 m de agua dulce por debajo de él:

$$z = 40h \qquad (2)$$

Figura 3

Posición de la cuña de agua salada considerando que la interfase es un plano y que no existe una zona de mezcla de agua dulce con agua salada



Nota. Traducido de INOWAS (2018).

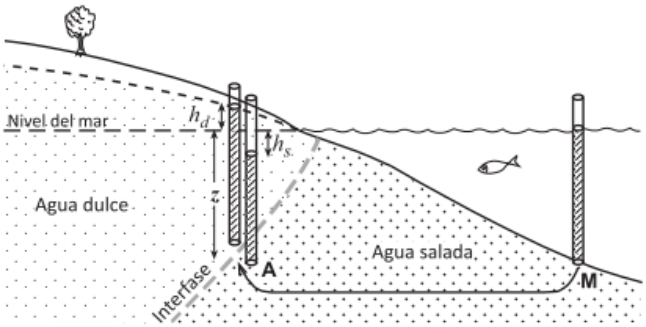
Aunque en varias situaciones la ecuación (2) tiene suficiente precisión, no describe la naturaleza real de la interfase agua dulce/agua salada ya que *asume un escenario hidrostático donde ninguno de los dos tipos de agua se mueve*. En la realidad, el agua subterránea dulce descarga en el cuerpo de agua salada con cierta velocidad y a través de una superficie de infiltración de cierto espesor, generando una interfase en la cual se mezclan dos aguas de diferente densidad por los procesos de dispersión y difusión molecular. El ambiente hidrodinámico en la zona costera ocasiona que el agua dulce y el agua salada se muevan ocasionalmente hacia el océano y otras veces hacia tierra firme. La ecuación (2) puede aplicarse en una primera aproximación a un pozo que se localiza cerca de la línea de costa que registra agua dulce y un nivel freático a 2 metros sobre el nivel del mar (h) para estimar la profundidad (*z*), respecto de la cota 0, a la que se encontraría el agua salada, dando por resultado 80 metros.

2.2 Corrección de Hubbert

La descarga de agua dulce en el agua salada ocasiona que las líneas de flujo en el acuífero se desvíen de la vertical por lo que el espesor vertical real del agua dulce es algo mayor que el estimado con la ecuación de Ghyben-Herzberg lo cual fue identificado inicialmente por Hubbert (1940). La Figura 4 muestra que en el punto A la altura de la columna de agua salada no es z, sino que es menor, ya que el agua ha perdido cierta energía para desplazarse desde M hasta A.

Figura 4

Escenario costero para la fórmula de Hubbert



Nota. Tomado de Sánchez San Román (2009).

El valor de z con la corrección de Hubbert viene dado por la ecuación (3):

$$z = h_d \cdot \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} - h_s \cdot \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_f} \qquad (3)$$

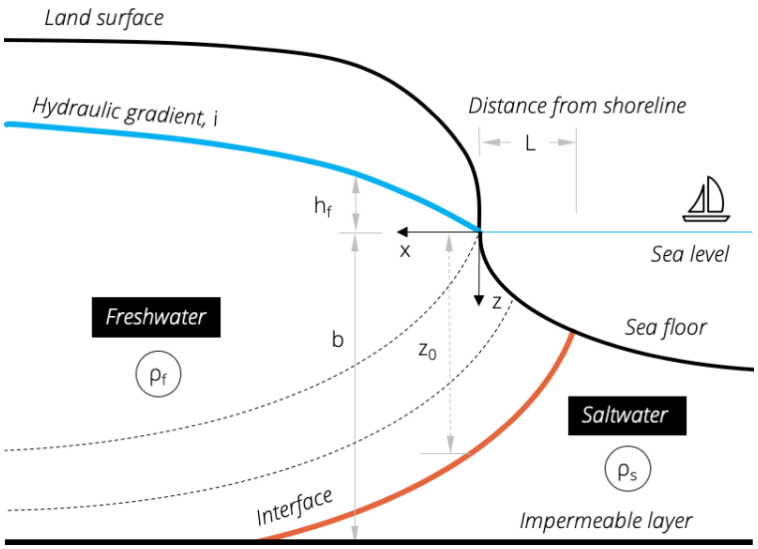
donde h_d es la altura de la columna de agua dulce por encima del nivel del mar y h_s, la altura de la columna de agua por debajo del nivel del mar.

2.3 Ecuación de Glover

Esta ecuación (4) toma en cuenta el gradiente de agua dulce para aproximar la interfase entre un área de agua dulce y un área de agua salada aportando una idea de la forma y extensión de la interfase. A diferencia de la ecuación de Ghyben-Herzberg, en este caso (Figura 5) el agua dulce descarga en el mar a lo largo de un área y no a lo largo de una línea.

Figura 5

Forma y extensión de la interfase agua dulce/agua salada en un acuífero costero, que puede calcularse con la ecuación de Glover



Nota. Traducido de INOWAS (2018).

$$z^2 = \frac{2qx\rho_f}{K(\rho_s - \rho_f)} + \left[\frac{q\rho_f}{K(\rho_s - \rho_f)}\right]^2 \qquad (4)$$

donde q es el caudal de descarga de agua dulce por unidad de longitud de línea de costa (L^2/T);

K, la conductividad hidráulica del acuífero (L/T); *x* y *z*, las coordenadas respecto de la línea de costa (L), y ρ_f y ρ_s, las densidades del agua dulce y del agua salada definidas en la ecuación (1).

A valores grandes de x, las ecuaciones de Glover (1959) y Ghyben-Herzberg tienden a dar los mismos resultados.

2.4 Solución analítica de Verruijt

El modelo analítico de Verruijt (1969) ha tenido amplia aceptación para abordar el problema de la IAS y se describe con las ecuaciones (5) a (7):

$$Z = -\sqrt{\left(\frac{q^2}{\beta^2 K^2}\right)\left(\frac{1-\beta}{1+\beta}\right) + \frac{2qx}{\beta K\,(1+\beta)}} \qquad (5)$$

$$H_f = \sqrt{\frac{2q\beta}{K\,(1+\beta)}}\,x \qquad (6)$$

$$x_o = \frac{q}{2\beta K} \qquad (7)$$

En la ecuación (5), Z es la profundidad de la interfase agua dulce/agua salada por debajo del nivel freático (m); en la ecuación (6), H_f es la presión equivalente de agua dulce (m); en la ecuación (7), x_o es la posición de la interfase agua dulce/agua salada en la superficie del terreno (se asignan valores positivos de la línea de costa hacia el mar y valores negativos de la línea de costa tierra adentro). Los términos de las ecuaciones del modelo de Verruijt se definen de la siguiente manera:

$$q = Ti \qquad (8)$$

donde q es la descarga específica de agua subterránea (m^2/d); T, la transmisividad del acuífero (m^2/d), e i, el gradiente hidráulico (adimensional).

$$\beta = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \qquad (9)$$

donde β es un coeficiente adimensional que expresa el contraste de densidad entre el agua dulce (ρ_f = 1.0 g/cm^3) y el agua salada (ρ_s = 1.013 g/cm^3).

$$K = \frac{T}{b} \qquad (10)$$

donde K es la conductividad hidráulica (m/d) y b, el espesor del acuífero (m). Los valores altos de K inducen una interfase somera, mientras que los valores bajos de K producen una interfase profunda. Por último, x es la distancia (m) desde la línea de costa tierra adentro.

La Tabla 1 muestra un escenario hidrogeológico costero basado en Samper (2013) en el cual se ha aplicado la solución analítica de Verruijt para estimar la profundidad de la interfase agua dulce/agua salada en dos ámbitos hidrogeológicos muy diferentes de recarga de aguas subterráneas: a) 100 mm/año y b) 25 mm/año.

Tabla 1

Estimación de la IAS: posición de la cuña salada con el modelo de Verruijt (1969) para recargas de 100 y 25 mm/año

Recarga (mm/año)		
100		25
z	x	$z_{1/4}$
-10.59	0	-2.61
-23.07	-20	-10.66
-30.86	-40	-14.85
-37.04	-60	-18.09
-42.33	-80	-20.83
-47.03	-100	-23.26
-51.30	-120	-25.45
-55.25	-140	-27.47
-58.92	-160	-29.35
-62.39	-180	-31.11
-65.67	-200	-32.78
-68.79	-220	-34.37
-71.78	-240	-35.89
-74.65	-260	-37.35
-77.41	-280	-38.76
-80.08	-300	-40.11
-82.66	-320	-41.42
-85.16	-340	-42.69
-87.59	-360	-43.92
-89.96	-380	-45.12
-92.26	-400	-46.29
-94.51	-420	-47.43
-96.71	-440	-48.54
-98.85	-460	-49.63
-100.96	-480	-50.70
-103.02	-500	-51.74
-105.03	-520	-52.76
-107.01	-540	-53.76
-108.96	-560	-54.75
-110.87	-580	-55.71
-112.75	-600	-56.66
-114.60	-620	-57.60
-116.41	-640	-58.52
-118.20	-660	-59.42
-119.97	-680	-60.32
-121.71	-700	-61.20
-123.42	-720	-62.06
-125.11	-740	-62.92
-126.78	-760	-63.76
-128.42	-780	-64.59
-130.05	-800	-65.41
-131.65	-820	-66.22
-133.24	-840	-67.03
-134.80	-860	-67.82
-136.35	-880	-68.60
-137.88	-900	-69.37
-139.40	-920	-70.14
-140.90	-940	-70.90
-142.38	-960	-71.65
-143.85	-980	-72.39
-145.30	-1000	-73.12

ρ_s 1.025 β 0.025

ρ_f 1.000

Dibujar la forma de la cuña salada para las siguientes condiciones:

Longitud (L) de la línea de costa (km): 10

Recarga (r) anual de aguas subterráneas (mm): 100

Conductividad hidráulica del acuífero - K- (m/d): 10

Z = profundidad de la interfase agua dulce / agua salada por debajo del nivel freático (metros)

Para recarga de aguas subterráneas de 100 mm/año

Se estima el caudal (q) por unidad de longitud $q = r*L$

$q = 100 \frac{mm}{año} * \frac{1m}{10^3 mm} * \frac{1 año}{365 d} * \frac{10 km}{1 km} * \frac{10^3 m}{1 km} = 2.74 \frac{m^2}{d}$

Calcular el valor x_{cero}

En la ecuación de Verruijt, calcular el valor de x cuando z = o ("x_{cero}")

$$Z = -\sqrt{\left(\frac{q^2}{\beta^2 K^2}\right)\left(\frac{1-\beta}{1+\beta}\right) + \frac{2qx}{\beta K (1+\beta)}}$$

$X_{cero} = \frac{q*(1-\beta)}{2*K*\beta}$ **X_{cero} = 5.34 m**

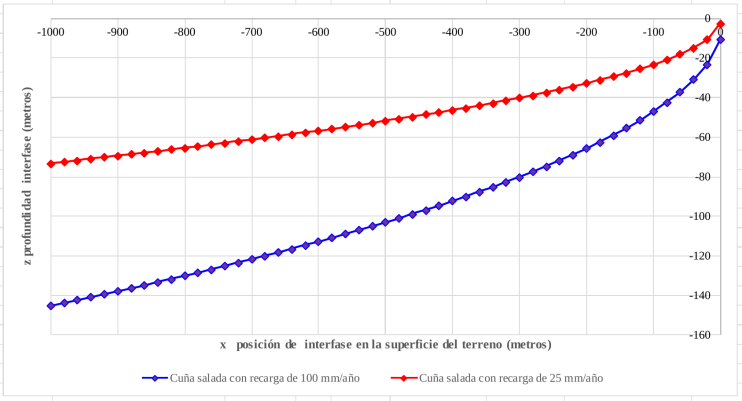
Con la siguiente ecuación asignar valores arbitrarios a x para estimar valores de z

z=- raiz(2*q*(xcero-x)/β*K*(1+β))

z= - raiz((21(5.34 - x))

Para recarga de aguas subterráneas de 25 mm/año

$X_{cero1/4} = \frac{q*(1-\beta)}{2*K*\beta}$ **$z_{1/4}$ = - raiz((5.34(1.28 - x))**



Nota. Escenario hidrogeológico basado en Samper (2013). *z* y $z_{1/4}$: profundidad de la interfase (m) para recargas de 100 y 25 mm/año, respectivamente; *x*: distancia desde la línea de costa (m).

3. Intrusión cónica de agua salada (*upconing*)

El bombeo en un acuífero costero puede causar el ascenso vertical del agua salada y una reducción de la zona con agua dulce por debajo de la bomba, proceso que se denomina *upconing*. *La migración vertical de agua salada inducida por el bombeo puede equivaler a 40 veces el descenso del nivel freático.* Bajo ciertas condiciones puede establecerse un equilibrio en el cual se desarrolla un cono estable a cierta profundidad de modo que las fuerzas ascendentes causadas por el bombeo se balancean con las fuerzas descendentes causadas por los efectos de densidad. El ritmo y extensión de la intrusión cónica de agua salada depende de varios factores, incluyendo las propiedades hidráulicas del sistema de acuíferos, ritmo y duración del bombeo, posición inicial de la

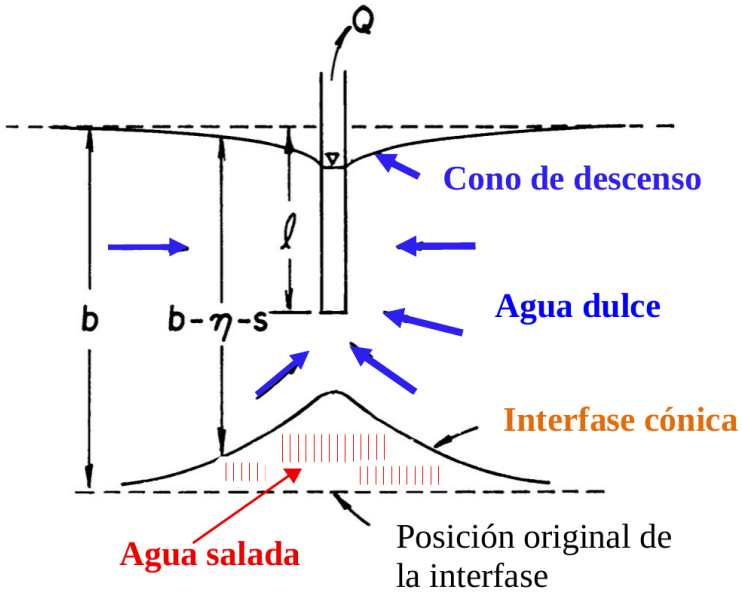
interfase, el contraste de densidad entre el agua dulce y el agua salada, y otros factores como dispersión y efectos de sorción, recarga de agua subterránea, ritmo de flujo regional, y la geometría del pozo y del acuífero.

3.1 Caudal crítico del pozo (Q_m)

El caudal máximo de bombeo en un acuífero costero con fines de impedir la IAS ha sido estimado por McWhorter y Sunada (1977). El descenso del nivel freático durante el bombeo ocasiona un ascenso de la interfase, la superficie de contacto entre el agua dulce y el agua salada (Figura 6). *Los abatimientos pequeños pueden ocasionar ascensos significativos de agua salada por lo que debe tenerse un control detallado de la variación de niveles de agua durante el bombeo con fines de prevenir la IAS.* En términos prácticos se considera que la interfase es estable para alturas intrusivas cónicas menores que o iguales a aproximadamente un tercio de la distancia entre el fondo del pozo y la elevación inicial de la interfase.

Figura 6

Intrusión cónica de la interfase agua dulce/agua salada debajo de un pozo de bombeo



Nota. Modificado de McWhorter y Sunada (1977).

El caudal máximo seguro (Q_m) que puede extraerse del pozo sin que ocurra IAS, asumiendo que la interfase no ascenderá más de un tercio de la distancia entre el fondo del pozo y la elevación inicial de la interfase, se obtiene con la ecuación (11):

$$Q_m = \frac{2\pi}{3}(b - l)^2 \frac{\Delta\rho}{\rho} K \qquad (11)$$

donde Q_m es el caudal crítico del pozo; b, la profundidad inicial de la interfase; l, la profundidad de la rejilla por debajo del nivel freático; K, la conductividad hidráulica del acuífero; ρ, la densidad del agua dulce, y $\Delta\rho$, la diferencia de densidad entre el agua salada y el agua dulce.

La aplicación de la ecuación (11) a un acuífero costero se ilustra con el siguiente ejemplo. Un acuífero con permeabilidad de 17 m/d tiene alojada una rejilla de 1 metro de longitud instalada a 16 m por debajo del nivel freático inicial. La interfase original agua dulce-agua salada se ubica a 32 m por debajo del nivel

freático. El caudal máximo seguro sin que ocurra intrusión de agua salada es el siguiente:

$$Q_m = \frac{2\pi}{3}(32-16)^2 \ \frac{0.025}{1}\ 17 \ = \ 228\ \mathrm{m^3/d} \ = \ 42\ \mathrm{gpm}$$

4. Influencia de las variaciones del nivel del mar en los acuíferos costeros

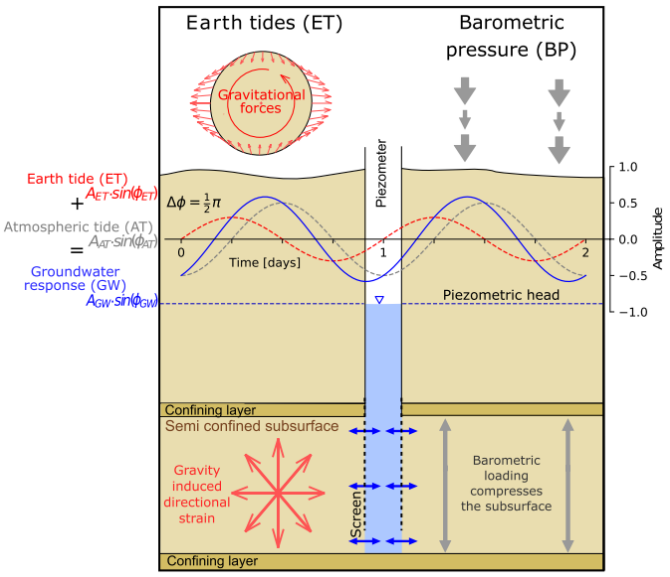
Las influencias de las fluctuaciones del nivel del mar en los sistemas de aguas subterráneas costeros son complejas y muy variadas. Existen tres tipos de variación del nivel del mar que resultan críticas para la hidrogeología de zonas costeras (Gilli et al., 2012): 1) las *oscilaciones vinculadas con las mareas*, que modifican el funcionamiento hidrodinámico del acuífero mediante cambios en el gradiente hidráulico y estimulan la mezcla de agua dulce con agua salada, lo cual impulsa reacciones geoquímicas; 2) las *oscilaciones históricas del nivel de los océanos asociadas a la órbita de la Tierra alrededor del Sol* (ciclos de Milankovitch), cuya fase fría causa una glaciación cada 90 000 años y disminuye el nivel global del mar, y 3) la *actividad tectónica*, que puede aislar porciones del mar en las que los aportes de lluvia y fluviales son menores que las pérdidas por evaporación, lo que causa un descenso del nivel, como ocurre en el Mar Muerto y el Golfo de México.

El cambio climático y el ascenso del nivel del mar deben tomarse en cuenta en el diseño de estrategias de gestión de los acuíferos costeros; en particular, el cambio climático global puede incrementar notablemente la IAS mediante transgresiones marinas y el aumento de la salinidad en cuerpos de agua superficiales.

Las mareas terrestres (MT) y la presión barométrica tienen impactos distintos en las aguas subterráneas (Figura 7). Las mareas terrestres (MT) derivadas del movimiento de cuerpos astronómicos en relación con la Tierra afectan la presión intersticial del agua en el acuífero lo que da por resultado cambios sutiles en la presión hidráulica y fluctuaciones en el nivel del agua subterránea. Estas señales se manifiestan como armónicos diarios (ondas sinusoidales) en los datos de monitoreo (lado izquierdo de la Figura 7). Por otro lado, la presión barométrica aplica esfuerzos verticales que también ocasionan fluctuaciones en el nivel del agua subterránea de los pozos (lado derecho de la Figura 7). Esta señal barométrica contiene fluctuaciones irregulares ocasionadas por los sistemas climatológicos incluyendo armónicas (ondas sinusoidales) derivadas de las mareas atmosféricas (MA). Existen metodologías para identificar y separar en frecuencia y tiempo las respuestas de los niveles de agua subterránea a las MA y MT, y para realizar un análisis detallado de series de tiempo de fluctuaciones de niveles del agua subterránea, lo cual está fuera del alcance del presente artículo.

Figura 7

Variación armónica de los niveles de agua subterránea en un pozo ocasionada por mareas terrestres (MT, en rojo) y mareas atmosféricas (MA, en gris), que actúan como mecanismos independientes



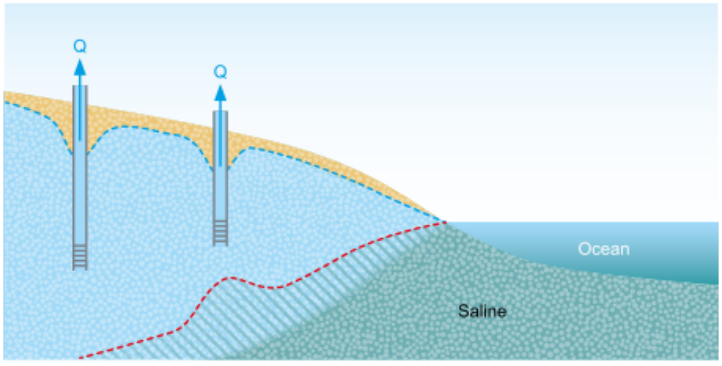
Nota. Ligeramente modificado de Rau et al. (2022). *Gravitational forces* = fuerzas gravitacionales; *time (days)* = tiempo (días); *piezometric head* = carga piezométrica; *confining layer* = estrato confinante; *semi confined subsurface* = subsuelo semiconfinado; *screen* = rejilla; *gravity induced directional strain* = deformación direccional inducida por la gravedad.

5. Evaluación del riesgo de IAS en los pozos costeros

Cuando el agua dulce se bombea a un ritmo mayor al cual el acuífero se recarga, el volumen perdido de agua dulce puede compensarse con la entrada de agua marina. Los pozos que se localizan en la vecindad de la interfase agua dulce/agua salada están expuestos a un riesgo inmediato de salinización, especialmente si el agua marina está almacenada en el acuífero que subyace al pozo (Figura 8).

Figura 8

Intrusión de agua salada ocasionada por bombeo en un acuífero costero

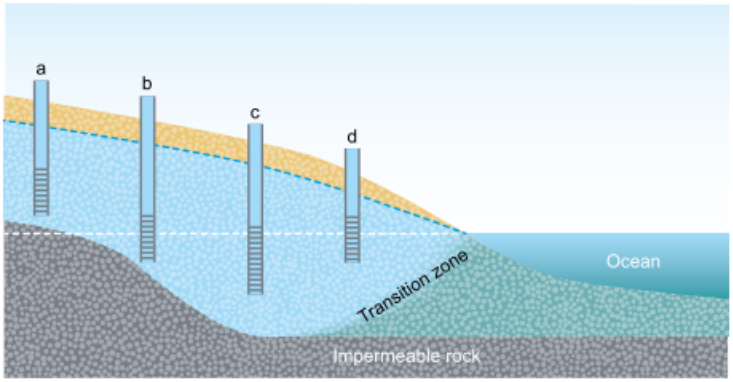


Nota. El pozo más cercano a la costa tiende a desarrollar la intrusión cónica de agua salada. *Saline* = salino; *ocean* = océano. Tomado de Post et al. (2018).

Este es el escenario hidrogeológico típico para la intrusión cónica de agua salada (upconing) previamente descrito. Custodio y Bruggeman (1987) aportaron reglas aproximadas para

estimar el riesgo de IAS según la localización de los pozos en relación con la línea de costa (Figura 9):

Figura 9
Riesgo de IAS para pozos ubicados a diferentes distancias de la línea de costa



Nota. Ocean = océano; *transition zone* = zona de transición (interfase); *impermeable rock* = roca impermeable. Tomado de Post et al. (2018).

El pozo *a* se ubica lejos de la costa y todo el espesor del acuífero está por encima del nivel del mar. No existe un riesgo directo de salinización, aunque una fuerte extracción causará un descenso de la superficie freática, disminuirá el flujo hacia la costa, lo que a su vez aumentará la vulnerabilidad de las zonas siguientes.

El pozo *b* está lejos de la costa y de la cuña de agua salada, pero parte del acuífero está bajo el nivel del mar. Una explotación prolongada y superior a la recarga natural puede inducir la intrusión de la interfase con lo que el agua salada podría llegar a alcanzar la captación.

El pozo *c* está cerca de la costa, pero separado de la interfase. El bombeo fuerte y prolongado puede terminar provocando el avance de la interfase.

El pozo *d* está sobre la interfase, perforado sobre la cuña de agua salada. El riesgo de IAS es muy alto, aun con un bombeo pequeño. El descenso de la superficie freática causado por cualquier bombeo, aunque no sea un caudal elevado, causará el consiguiente ascenso de la interfase, pudiendo llegar a la extracción de agua salada.

Como la posición de la interfase responde a un equilibrio entre la altura de la columna de agua dulce y la de agua salada, es evidente que cualquier disminución de la altura del agua dulce ocasionará una elevación de la interfase.

6. Gestión hidrogeológica de acuíferos costeros con alto riesgo de IAS

Algunas de las mejores prácticas de gestión en acuíferos costeros con alto riesgo por IAS son las siguientes:

a) El estudio hidrogeológico realizado previo a la construcción del pozo mecánico de agua debe estar enfocado hacia la presencia potencial de IAS en el acuífero costero. La información de pozos mecánicos de agua construidos con anterioridad resulta fundamental para la elaboración del modelo hidrogeológico que permita orientar eficientemente la construcción de pozos nuevos.

b) Para seleccionar el sitio donde se propone construir el pozo de agua debe evitarse perforar en lugares adyacentes a la línea de costa,

particularmente dentro de los primeros 50 metros.

c) En cuanto a definir la profundidad del pozo, no se recomienda perforar a grandes profundidades en lugares vecinos a la costa. La profundidad a la interfase agua dulce/agua salada puede variar localmente por lo que debe utilizarse el conocimiento local basado en experiencias anteriores, así como levantamientos geoeléctricos, en cuanto a la probable profundidad a la que puede interceptarse el agua salada. Pueden emplearse los modelos predictivos descritos con anterioridad en este artículo, aunque el contexto hidrogeológico costero en el mundo real puede variar significativamente en relación con estos modelos idealizados.

d) Se recomienda implementar un monitoreo hidrogeológico *durante la perforación del pozo*. Deben utilizarse medidores portátiles de calidad de agua que evalúan SDT, conductividad eléctrica y salinidad para el monitoreo de la calidad de agua que se intercepta durante la perforación. Si se registra un incremento significativo en los parámetros de calidad de agua durante la perforación debe detenerse esta actividad y evaluar la concentración de cloruro en el agua subterránea. En caso de haber interceptado una zona con agua salada debe sellarse el pozo por debajo de cierta profundidad para impedir que el agua salada penetre el acuífero somero de agua dulce.

e) En varias zonas costeras se ha documentado que por cada 1 metro de columna de agua dulce que se extrae la interfase de agua salada se eleva 12 metros por lo que deben instalarse bombas de baja capacidad e implementarse un monitoreo detallado del bombeo para establecer el caudal de agua dulce que puede bombearse en la costa de manera segura y sin que se dispare la intrusión de agua salada en el pozo.

f) En lugares donde se conozca la profundidad de la interfase los pozos deben perforarse a profundidad pequeña y sellarse muy por encima de la interfase, instalando la rejilla en los tramos superiores.

g) Guatemala carece de un contexto regulatorio para el desarrollo de aguas subterráneas en acuíferos costeros que incluya el espaciamiento adecuado de los pozos según el contexto hidrogeológico de cada lugar costero, el monitoreo de niveles y calidad de agua subterránea, el uso de la tierra, así como los factores socioeconómicos de la zona. Se recomienda promover una Norma para el desarrollo de acuíferos costeros tomando como referencia y fortaleciendo las pautas hidrogeológicas establecidas en Costa Rica (La Gaceta, 2012).

Contribución del autor

El autor único es responsable de la totalidad de la concepción, investigación, análisis y redacción de este manuscrito.

Financiamiento

Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

Custodio, E., & Bruggeman, G. A. (1987). *Groundwater problems in coastal areas* (Studies and Reports in Hydrology, 45). UNESCO.

Gilli, É., Mangan, C., & Mudry, J. (2012). *Hydrogeology: Objectives, methods, applications*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/b12932

Glover, R. E. (1959). The pattern of fresh-water flow in a coastal aquifer. *Journal of Geophysical*

Research, 64(4), 457–459. https://doi.org/10.1029/JZ064i004p00457

Hubbert, M. K. (1940). The theory of ground-water motion. *The Journal of Geology, 48*(8), 785–944. https://doi.org/10.1086/624930

INOWAS. (2018, 9 de abril). *T09. Simple saltwater intrusion equations*. https://www.inowas.com/tools/t09-simple-saltwater-intrusion-equations/

La Gaceta. (2012). Metodologías hidrogeológicas para la evaluación del recurso hídrico (Acuerdo 60-2012), Capítulo IV: Intrusión salina. *La Gaceta, Diario Oficial de Costa Rica*, (147).

McWhorter, D. B., & Sunada, D. K. (1977). *Ground-water hydrology and hydraulics*. Water Resources Publications.

Post, V., Eichholz, M., & Brentführer, R. (2018). *Groundwater management in coastal zones*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).

Rau, G. C., McMillan, T. C., Andersen, M. S., & Timms, W. A. (2022). In situ estimation of subsurface hydro-geomechanical properties using the groundwater response to semi-diurnal Earth and atmospheric tides. *Hydrology and Earth System Sciences, 26*(16), 4301–4321. https://doi.org/10.5194/hess-26-4301-2022

Samper, J. (2013). *Hidrología del subsuelo*. Universidade da Coruña.

Sánchez San Román, F. J. (2009). *Agua subterránea en regiones costeras*. Departamento de Geología, Universidad de Salamanca.

Verruijt, A. (1969). An interface problem with a source and a sink in the heavy fluid. *Journal of Hydrology, 8*(2), 197–206. https://doi.org/10.1016/0022-1694(69)90121-8

Werner, A. D., Bakker, M., Post, V. E. A., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C. T., & Barry, D. A. (2013). Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources, 51*, 3–26. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.004

Sobre los autores

Rudy Machorro Sagastume

Ingeniero geólogo minero por la Universidad de Guanajuato, México, y doctor (Ph. D.) en Hidrogeología y Management por The University of Texas at El Paso (UTEP), Estados Unidos. Es investigador y especialista en hidrogeología, con experiencia en el estudio de los recursos hídricos subterráneos y su gestión. Está vinculado a la Asociación Guatemalteca de Geociencias Ambientales (ASGA) y a organizaciones científicas internacionales, entre ellas la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (IAH) y la Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas (IAHS). Su trayectoria se orienta al desarrollo de estudios hidrogeológicos y a la generación de conocimiento científico para la comprensión, evaluación y gestión de los recursos hídricos subterráneos. Correo: rudy.machorro@yahoo.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5822-1020

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.

RGCT

Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra

Guatemalan Journal of Earth Sciences

Vol. 13, núm. 1, enero a diciembre 2026 | ISSN impreso 2410-728X | ISSN electrónico 3106-0056

ÍNDICE

Índice de autores

Author index

El índice reúne a los 16 autores y coautores de los 6 artículos de este número, en orden alfabético por primer apellido. Los números indican la página en que inicia cada artículo.

B

Bac G., Victor O. 67

C

Chún Quinillo, Carla María Fernanda 31

Chún Quinillo, Kevin 19, 31

Coronado Urrutia, Gabriela Alejandra 1

Cuzco, Josué 19

G

Godoy Morales, Luis Alfredo 51

González, Dulce 31

Gutiérrez Paxtor, Wendel Alexander 31

M

Machorro Sagastume, Rudy 83

Mendoza M., Diego L. 67

Morán Chén, Helén Marina 19

Morán Ical, Sergio David 1, 51

R

Reiche de la Cruz, Andrea María 51

Requena, Jaime 67

T

Tojil, José 19

V

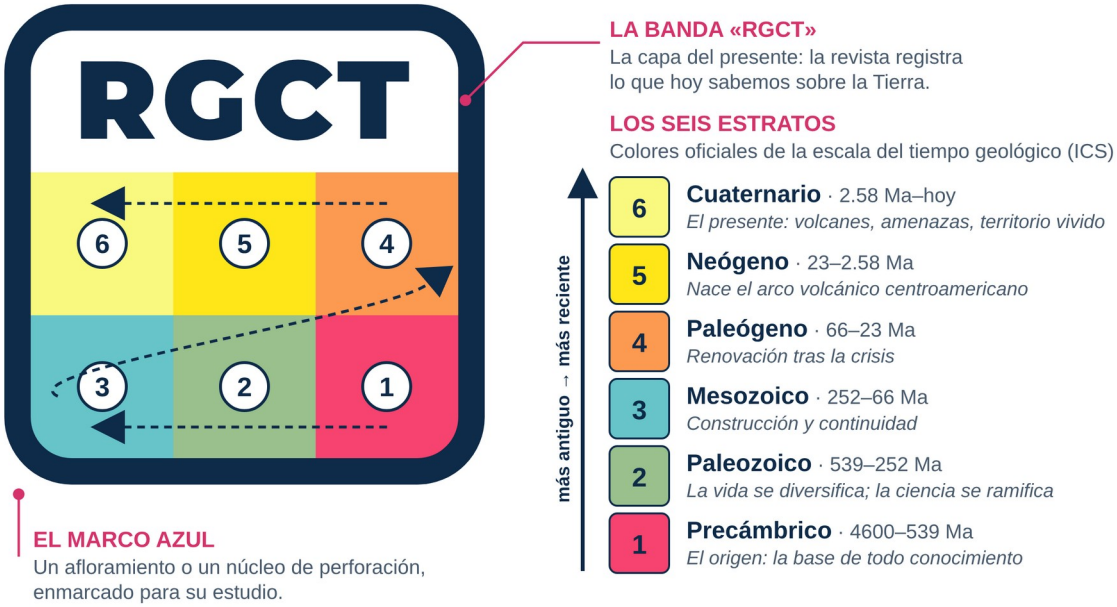
Vásquez, Brayan 51

El tiempo de la Tierra en un solo emblema

Deep time in a single emblem: the new visual identity of the RGCT

Con este número, la *Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra* estrena una identidad visual propia. Su logotipo es una columna estratigráfica condensada: seis bloques con los colores oficiales del tiempo geológico, ordenados del Precámbrico al Cuaternario y coronados por las siglas de la revista.

Léase de abajo hacia arriba, como una columna estratigráfica: 1 → 6



El conocimiento también se deposita en capas

Un geólogo lee el tiempo en las rocas: abajo lo antiguo, arriba lo reciente. El logotipo aplica esa misma ley de superposición. Sus seis bloques recorren unos 4 600 millones de años de historia de la Tierra y, sobre el estrato más joven, la banda blanca con las siglas *RGCT* representa a la revista como la capa del presente. Cada artículo publicado es un estrato nuevo que descansa sobre el trabajo de quienes investigaron antes.

¿Por qué una nueva identidad?

Hoy una revista se descubre primero en una miniatura: un ícono en redes, una portada en un repositorio, una línea en un índice. La RGCT necesitaba una firma propia, reconocible fuera del campus y compatible con los escudos de la USAC y del CUNOR. En lugar de globos terráqueos, volcanes o martillos —los símbolos más repetidos entre las revistas de geociencias—, el emblema usa un código que todo geólogo reconoce: los colores de la escala del tiempo geológico.

UNA PALETA QUE NO ES DE MODA, SINO DE ESTÁNDAR

Seis colores tomados de la Carta Cronoestratigráfica Internacional y un azul institucional que los contiene.

#0F2B4A	#F9F97F	#FFE619	#FD9A52	#67C5CA	#99C08D	#F74370
Azul profundo Confianza, rigor y profundidad: el marco	**Cuaternario** El presente y la luz de lo que hoy vemos	**Neógeno** Energía y actividad volcánica	**Paleógeno** Calidez y renovación tras la crisis	**Mesozoico** Agua y continuidad del territorio	**Paleozoico** Vida, ambiente y sostenibilidad	**Precámbrico** El origen: el núcleo de todo lo demás

UNA SOLA MARCA, CUATRO VERSIONES



Clara — Portadas, PDF e impresos

Oscura — Fondos oscuros y fotografías

Monocromática — Una tinta: más oscuro = más antiguo

Isotipo — Favicon e íconos (< 48 px)

TRES DECISIONES DE DISEÑO

1

El Cenozoico, en detalle. Los últimos 66 millones de años ocupan tres bloques, mientras las eras anteriores ocupan uno cada una. Es la escala que explica la geología visible de Guatemala: el arco volcánico, el sistema de fallas Motagua–Polochic y los paisajes kársticos de Alta Verapaz.

2

Una retícula ordenada. La cuadrícula de tres por dos remite a la leyenda de un mapa geológico, a las cuadrículas cartográficas y al orden del método científico.

3

Esquinas suaves, letras firmes. El marco redondeado acerca el emblema al público y le permite funcionar como ícono; las siglas, en una tipografía sin serifa extranegrita, equilibran la intensidad del color y se leen incluso a tamaño pequeño.

UN SELLO PARA MEDIO SIGLO

Este número se publica en el marco de los 50 años de la Carrera de Geología del CUNOR (1976–2026). El sello conmemorativo habla el mismo idioma que la revista: el «50» está relleno con estratos plegados en los colores de la RGCT —un guiño a los pliegues en filitas de la portada— y, sobre él, aparece el mismo número escrito con numeración maya: dos puntos en el nivel superior (2 × 20) y dos barras en el inferior (2 × 5).

Encuéntrenos en revistasguatemala.usac.edu.gt/rgct · www.geologiausac.com · rgct.editorial@gmail.com

Texto e infografías: Comité Editorial RGCT

RGCT

Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra

Guatemalan Journal of Earth Sciences

Vol. 13, núm. 1, enero a diciembre 2026 | ISSN impreso 2410-728X | ISSN electrónico 3106-0056

CONVOCATORIA

Convocatoria Vol. 14, Núm. 1 (2027) e instrucciones para autores

Call for papers Vol. 14, No. 1 (2027) and instructions for authors

La *Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra* invita a investigadores, profesionales, docentes y estudiantes de las Ciencias de la Tierra a enviar artículos originales e inéditos para su Volumen 14, Número 1, correspondiente a 2027. Se reciben trabajos en español o en inglés sobre cualquiera de las disciplinas de la cobertura temática de la revista, con especial interés en estudios sobre Guatemala y la región centroamericana.

Invitamos de manera particular a los ponentes del VI Congreso Guatemalteco de Geociencias Ambientales (VI CGGA 2026) a convertir en artículos completos los resúmenes publicados en el Vol. 13, Número Especial, y a los estudiantes y egresados de la Carrera de Geología a publicar los resultados de sus trabajos de graduación.

Apertura de la convocatoria	1 de diciembre de 2026
Cierre de recepción de manuscritos	1 de noviembre de 2027
Revisión por pares y correcciones	continua, conforme se reciben los manuscritos
Publicación del Vol. 14, Núm. 1	diciembre de 2027
Envío de manuscritos	rgct.editorial@gmail.com

1. SOBRE LA REVISTA */ About the journal*

El contexto geológico y geotectónico de Guatemala es un ambiente excepcional para la investigación. El territorio se sitúa sobre tres placas tectónicas y muestra rocas con edades que posiblemente se remontan al Precámbrico y llegan hasta el Reciente; es un laboratorio geológico natural en el que se exhiben procesos que pueden abordarse desde las distintas disciplinas de las Ciencias de la Tierra.

La *Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra* (RGCT) es una iniciativa de la Carrera de Geología del Centro Universitario del Norte (CUNOR), Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC). Su propósito es ser un espacio de referencia para difundir el conocimiento geológico de Guatemala y sus alrededores mediante la publicación de artículos científicos, y dar a conocer los resultados de proyectos en las distintas ramas de las Ciencias de la Tierra relevantes para el país.

Periodicidad	Anual. El primer volumen se publicó en 2014; a la fecha se han publicado trece volúmenes (2014–2026). La revista puede publicar, además, números especiales o monográficos.
ISSN	Impreso 2410-728X; electrónico 3106-0056
Acceso	Abierto, bajo licencia Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0. Sitios web: revistasguatemala.usac.edu.gt/rgct y www.geologiausac.com
Indexación y directorios	Latindex (Directorio); Editorial Data
Idiomas	Español e inglés

Cobertura temática

- Estratigrafía, sedimentología y paleogeografía
- Geología histórica y regional
- Análisis y aplicación de imágenes satelitales en Ciencias de la Tierra

- Tectónica y geología estructural
- Geofísica
- Geomorfología
- Hidrología e hidrogeología
- Edafología y ciencias del suelo
- Mineralogía, cristalografía, metalogenia y yacimientos minerales
- Petrología endógena y sedimentaria
- Geoquímica
- Paleontología y micropaleontología
- Sistemas de información geocientífica y cartografía geológica
- Inteligencia artificial y modelos predictivos en geología
- Geología ambiental, paleoclimatología y cambio global
- Geología aplicada, geotecnia, ingeniería geológica y del terreno
- Prospección e investigación minera y explotación de recursos minerales
- Historia y epistemología de las Ciencias de la Tierra
- Divulgación y cultura geocientífica
- Geodiversidad, patrimonio geológico y minero, y geoconservación
- Riesgos geológicos
- Aspectos económicos de las Ciencias de la Tierra
- Otros temas afines

2. TIPOS DE CONTRIBUCIÓN */ Types of contribution*

- *Artículos de investigación:* trabajos originales e inéditos de investigación científica y aplicada que supongan un avance en el conocimiento. Son el contenido fundamental de la revista.
- *Artículos de revisión:* síntesis críticas y actualizadas del conocimiento sobre un tema, con una revisión bibliográfica amplia.
- *Notas técnicas:* comunicaciones breves sobre métodos, datos, hallazgos o casos de interés.
- *Reseñas* de publicaciones recientes relacionadas con la temática de la revista.
- *Comentarios y réplicas* a artículos publicados, justificados en forma y fondo; siguen las mismas normas que los artículos.
- *Cartas al editor*, así como prólogos y presentaciones en números monográficos.

3. PROCESO EDITORIAL */ Editorial process*

- La revista lleva un registro de todos los manuscritos recibidos, y el autor de correspondencia recibe acuse de recibo.
- A cada manuscrito se le asigna un equipo gestor, que elige a los revisores, traslada sus correcciones y sugerencias a los autores y hace la valoración final, garantizando la transparencia del proceso.
- Cada artículo es evaluado por al menos dos revisores expertos en la materia (revisión por pares), en su mayoría ajenos a la institución editorial. Si sus valoraciones difieren, se designa un tercer revisor.
- Los autores pueden sugerir posibles revisores, o señalar a quienes no deban revisar su trabajo por una relación manifiesta, sin que ello obligue al equipo gestor.
- Los autores son informados de la fase del proceso en que se encuentra su manuscrito, desde la recepción hasta la valoración final. En el artículo publicado se indican las fechas de recepción, aceptación y publicación.
- Una vez aceptado, el manuscrito se maqueta en la plantilla de la revista, con las correcciones de estilo y la revisión de los textos en inglés que sean necesarias. El autor de correspondencia recibe una única prueba de imprenta para su revisión.
- Todos los autores firman una autorización de publicación del artículo en la revista, que se distribuye en acceso abierto bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0.

4. NORMAS DE PRESENTACIÓN */ Manuscript guidelines*

Texto

Archivo	Procesador de textos estándar, en formato .docx. Puede solicitarse la plantilla de la revista a rgct.editorial@gmail.com.
Extensión	Máximo 20 páginas tamaño carta, incluidas referencias, figuras y tablas
Formato	Fuente Arial o similar de 10 pt, interlineado de 1.5 y márgenes de 2 cm, en una sola columna; la maquetación a dos columnas la realiza la revista

Título	Breve e informativo (máximo 20 palabras) y, cuando sea necesario, con el encuadre geográfico y geocronológico. En español y en inglés, con mayúscula solo al inicio y en los nombres propios
Autores	Nombre seguido de apellido o apellidos, en el orden en que deseen ser citados; se indica el autor de correspondencia
Afiliación	Institución, ciudad y país, y correo electrónico de cada autor
ORCID	Obligatorio para el autor de correspondencia; recomendado para todos los autores
Resumen y abstract	Entre 150 y 250 palabras en cada idioma, en un solo párrafo. Conciso e indicativo del objetivo, los métodos, los resultados y las conclusiones; sin ecuaciones ni referencias
Palabras clave	De tres a seis, en español y en inglés (keywords), en orden alfabético y separadas por punto y coma
Apartados	Numerados (1., 1.1…) y en negrita. Se recomiendan: Introducción, Área de estudio, Metodología, Resultados, Discusión y Conclusiones
Declaraciones	Después de las conclusiones: Agradecimientos (si procede), Contribución de los autores según la taxonomía CRediT, Financiamiento, Conflicto de intereses y Disponibilidad de datos; por último, Referencias
Unidades y números	Sistema Internacional de Unidades; punto decimal y espacio para separar los miles (1 250.5 m)
Notas	No se admiten notas al pie ni al final; todo comentario va en el cuerpo del texto

Citas y referencias

Las citas, las referencias, las tablas y las figuras siguen las normas APA, 7.ª edición (consulte normas-apa.org). Pueden elaborarse a mano o con un gestor bibliográfico como Mendeley o Zotero; el uso de un gestor no garantiza que queden correctas, por lo que deben revisarse. Se incluye el DOI de cada referencia cuando exista.

- En el texto se cita el apellido del autor y el año: (Didier, 1973). Con dos autores, los apellidos se unen con «y»: (Heredia y Baltuille, 1997). Con tres o más, se escribe el primer apellido seguido de et al.: (Delgado et al., 1971).
- Toda cita del texto aparece completa en la lista de Referencias, y viceversa, en orden alfabético.

Ejemplos:

Artículo de revista. Heredia, M., y Baltuille, J. M. (1997). Las posibilidades mineras de Cuba en el sector de las rocas ornamentales. *Boletín Geológico y Minero, 108*(6), 47–52.

Artículo con DOI. Werner, A. D., Bakker, M., Post, V. E. A., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C. T., y Barry, D. A. (2013). Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources, 51*, 3–26. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.004

Libro. Didier, J. (1973). *Granites and their enclaves*. Elsevier.

Capítulo de libro. Quesada, C. (1983). El Carbonífero de Sierra Morena. En C. Martínez (Ed.), *Carbonífero y Pérmico de España* (pp. 243–278). Instituto Geológico y Minero de España.

Actas de congreso. Delgado, F., Ovejero, G., y Jacquin, J. P. (1971). Localización estratigráfica y medio paleogeográfico de las mineralizaciones (galena y fluorita) de Sierra de Baza (Granada, España). En *Actas del I Congreso Hispano-Luso-Americano de Geología Económica* (Vol. 2, pp. 119–128).

Tesis. Apellido, A. (Año). *Título de la tesis* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio institucional.

Página web. Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra. (s. f.). *Acerca de la revista*. Recuperado el 24 de noviembre de 2026, de https://revistasguatemala.usac.edu.gt/rgct/es

Artículo de la RGCT. Morán Ical, S. D., Godoy Morales, L. A., Reiche de la Cruz, A. M., y Vásquez, B. (2026). Análisis geométrico del deslizamiento Las Cuevas, Chitul, Santa Cruz Verapaz, Guatemala. *Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra, 13*(1), 49–64.

Tablas

- Se citan en el texto y se numeran correlativamente (Tabla 1, Tabla 2…). El número y el título van en la parte superior, y la nota o fuente, debajo.
- Se preparan para ocupar una o dos columnas (80 o 170 mm de ancho); como máximo, una página completa, o dos si es indispensable.

- El texto no debe ser menor de 8 pt al tamaño final. Se evitan las cuadrículas: solo algunas líneas horizontales.

Figuras

- Mapas, esquemas, diagramas y fotografías se citan en el texto y se numeran correlativamente como figuras (Figura 1, Figura 2…). El número y el título van en la parte superior, y la nota o fuente, debajo.
- Los mapas incluyen norte, escala gráfica, coordenadas, sistema de referencia y leyenda.
- Se preparan para una o dos columnas (80 o 170 mm de ancho), con textos no menores de 8 pt al tamaño final.
- Se envían también por separado del texto, en archivos TIFF, PNG o JPG de al menos 300 ppp al tamaño de edición, indicando en el texto su posición.
- Deben ser originales y propiedad de los autores. Si tienen derechos de reproducción, los autores gestionan la autorización, y en todo caso se cita la fuente de las figuras tomadas, modificadas o adaptadas.

Fórmulas y ecuaciones

- Se insertan con un editor de ecuaciones y se numeran correlativamente entre paréntesis, alineadas a la derecha: (1), (2)…

5. ENVÍO DEL MANUSCRITO */ Submission*

Los manuscritos se envían en formato digital al correo rgct.editorial@gmail.com. Antes de enviar, compruebe que su envío incluye:

- ☐ El manuscrito en .docx, con título, resumen y palabras clave en español y en inglés.
- ☐ Los nombres completos, afiliaciones y correos de todos los autores, y el ORCID del autor de correspondencia.
- ☐ Las declaraciones de contribución de los autores (CRediT), financiamiento, conflicto de intereses y disponibilidad de datos.
- ☐ Las figuras en archivos aparte (TIFF, PNG o JPG, 300 ppp), con los permisos de reproducción que correspondan.
- ☐ Las citas y referencias revisadas según APA, 7.ª edición, con DOI cuando exista.
- ☐ Si lo desea, los nombres de posibles revisores.

Contacto

Ing. Geól. Luis Alfredo Godoy Morales, editor en jefe · Carrera de Geología, Centro Universitario del Norte (CUNOR), Universidad de San Carlos de Guatemala · 7.ª calle 1-11 zona 6, Cobán, Alta Verapaz · PBX 7956 6600, ext. 209 · rgct.editorial@gmail.com

Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra

Guatemalan Journal of Earth Sciences

VOL. 13 · NÚMERO 1 · 2026

SOBRE LA REVISTA

La Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra (RGCT) es una publicación anual de acceso abierto de la Carrera de Geología del Centro Universitario del Norte (CUNOR), Universidad de San Carlos de Guatemala. Difunde investigaciones, estudios de caso y experiencias en geología, geofísica, geociencias ambientales, recursos naturales y gestión del riesgo, con énfasis en Guatemala y la región centroamericana.

EN ESTE NÚMERO

Este primer número del Vol. 13 reúne **seis artículos arbitrados** —cinco de investigación y uno de revisión— sobre micropaleontología y facies cretácicas, sismicidad, vulcanología, movimientos de ladera, mapeo de inundaciones con radar e hidrogeología costera. Se publica en el marco de los **50 años de la Carrera de Geología del CUNOR (1976–2026)**.

1 **Microfauna y facies cretácicas al este del anticlinal Rubelsanto, Chisec**
Coronado Urrutia y Morán Ical · p. 1

2 **Secuencia sísmica de Santa María de Jesús–Palín (julio 2025)**
Tojil et al. · p. 19

3 **Erupción del volcán de Fuego del 2–4 de agosto de 2026**
Chún Quinillo et al. · p. 31

4 **Deslizamiento Las Cuevas, Chitul, Santa Cruz Verapaz**
Morán Ical et al. · p. 51

5 **Mapeo de inundaciones con Sentinel-1: Valle de Sula, Polochic y Campur**
Requena et al. · p. 67

6 **Intrusión de agua salada en acuíferos costeros de Guatemala (revisión)**
Machorro Sagastume · p. 83

«Medio siglo de geología desde Cobán»

Carrera de Geología · CUNOR · USAC · 1976–2026

CUNOR
Universidad de San Carlos de Guatemala

Carrera de Geología Geo
Universidad de San Carlos de Guatemala
Centro Universitario del Norte

ISSN impreso 2410-728X · ISSN electrónico 3106-0056

revistasguatemala.usac.edu.gt/rgct · www.geologiausac.com · rgct.editorial@gmail.com

Acceso abierto · Licencia CC BY-NC-SA 4.0

ISSN 2410-728X

9 772410 728003