



La Huella Tectónica del Doblete Sísmico: Mapa de Levantamiento y Hundimiento Costero

Estudio de Deformación Co-sísmica y Cinemática Tectónica (Costa Central de Venezuela)

Declaración del alcance

Este estudio es producto de las capacidades de procesamiento de datos del Centro de Investigación Informática Lazarus, potenciadas mediante el uso de Inteligencia Artificial (IA) para la interpretación avanzada de información geoespacial.

El presente documento constituye un referente de análisis satelital de alerta temprana enfocado en establecer potenciales escenarios y situaciones de interés. Su función principal es actuar como un mapa preliminar para orientar con precisión las evaluaciones y los muestreos en terreno, sirviendo como material de apoyo técnico para investigaciones de mayor profundidad a cargo de especialistas en las áreas de teledetección y disciplinas afines.

Nota: Este reporte no constituye un diagnóstico definitivo, sino un insumo estratégico para optimizar la labor analítica e investigativa en campo. Todos los hallazgos presentados requieren validación adicional en terreno por especialistas competentes.

Descripción General

Este informe describe el trabajo realizado por el Centro de Investigación Informática Lazarus. El objetivo principal fue medir y mostrar en un mapa cómo se movió el terreno debido a los dos terremotos, de magnitudes 7.1 y 7.5, ocurridos el 24 de junio de 2026 frente a las costas de Venezuela.

1. DInSAR (Interferometría de Radar de Apertura Sintética Diferencial)

- **Definición:** Técnica geodésica que evalúa cambios físicos superficiales mediante el cálculo de la diferencia de fase entre dos adquisiciones de radar.
- **Relevancia:** Permite identificar las áreas de mayor deformación (subsistencia y levantamiento cortical) en el centro-norte de Venezuela.
- **Validación y Fuentes:** La metodología InSAR es el estándar internacional para el monitoreo de deformación tectónica. (Fuente: Agencia Espacial Europea (ESA) - Misión Sentinel-1: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1>).
- **Limitaciones (Crítica):** El sensor evalúa únicamente cambios físicos superficiales. Además, existe pérdida de coherencia (zonas vacías o ruidosas)

en áreas de alta biomasa, como los parques nacionales Henri Pittier y San Esteban, y sobre los cuerpos de agua costeros.

2. Metodología de Procesamiento SAR (Cadena S1TBX)

El procesamiento utilizó imágenes de la misión Sentinel-1 (C-Band) de la ESA. Se procesaron mediante la caja de herramientas S1TBX en la plataforma ESA SNAP. (Documentación ESA SNAP: <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>).

Las variables y operadores aplicados incluyen:

- **Corrección Orbital (Orb):** Aplicación de los vectores de órbita precisa (Sentinel Precise Orbit State Vectors) para minimizar errores de fase relacionados con la posición satelital.
- **Co-registro y Apilado (Stack):** Alineación geométrica sub-píxel de la imagen esclava (post-sismo) sobre la maestra (pre-sismo).
- **Resta Topográfica Diferencial (DInSAR):** Uso del Modelo Digital de Elevación para simular y restar la fase topográfica, aislando la fase del movimiento del terreno.
- **Desenvolvimiento de Fase (Unw - SNAPHU):** Conversión de la fase interferométrica cíclica en valores continuos. (Fuente algorítmica: Universidad de Stanford - <https://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/snaphu/>).
- **Desplazamiento LOS Absoluto y Proyección:** Conversión de fase a valores métricos de desplazamiento en la Línea de Visión (LOS) y aplicación de correcciones para proyectar a coordenadas geográficas.

3. Integración Cartográfica y Contextualización (QGIS)

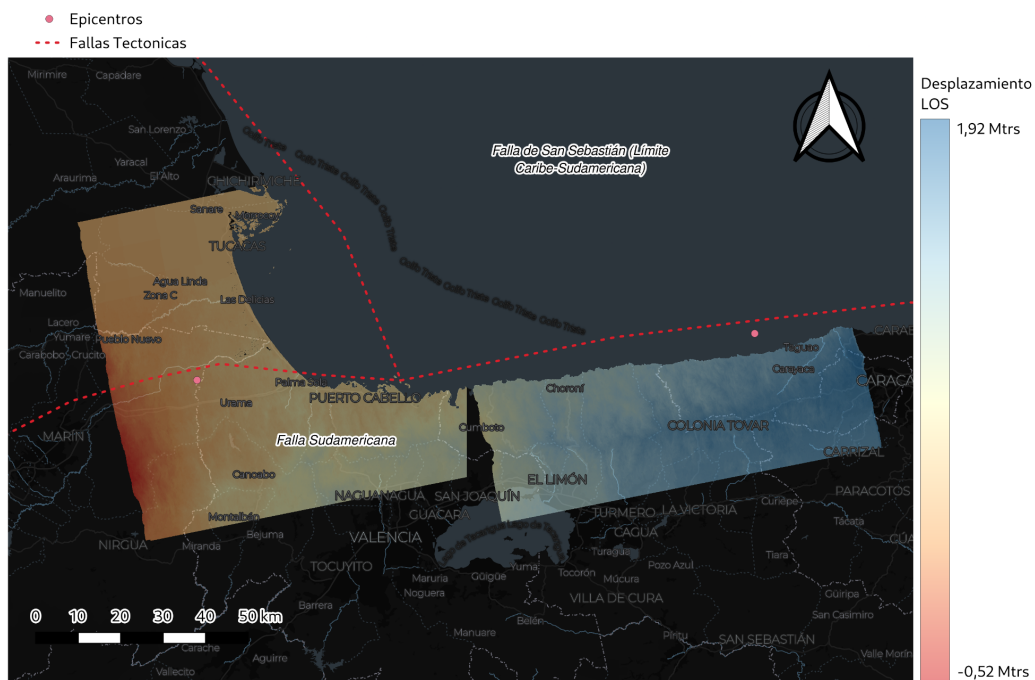
- **Definición:** Integración de los productos ráster con bases de datos vectoriales en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (QGIS: <https://qgis.org/>).
- **Relevancia:** Proporcionó el anclaje espacial necesario para interpretar los gradientes de deformación con respecto a los límites tectónicos y la topografía continental.
- **Validación:** Se cruzó la huella de deformación InSAR con el modelo geológico global de placas tectónicas (Repositorio PB2002: <https://github.com/fraxen/tectonicplates>). Al coincidir espacialmente el límite de la deformación con la falla regional, se validó la precisión geométrica del procesamiento.

3.1. Parámetros de Simbología y Representación Visual (QGIS) Para la correcta interpretación espacial del ráster InSAR importado, se establecieron los siguientes parámetros estandarizados en el entorno de trabajo cartográfico:

- **Estilo de Renderizado:** Se aplicó un renderizador de "Pseudocolor monobanda" (*Singleband pseudocolor*) sobre la capa ráster de desplazamiento, lo cual es el estándar para representar gradientes de valores continuos. (Fuente:

https://docs.qgis.org/3.44/en/docs/user_manual/working_with_raster/raster_properties.html)

- **Calibración de la Rampa de Color (Min/Max):** Se ajustaron los límites de visualización a la deformación real calculada, estableciendo un rango exacto entre **-0.52 m** y **+1.92 m**. Se seleccionó una paleta divergente continua (Rojo-Azul) donde los tonos cálidos representan valores positivos (levantamiento) y los fríos valores negativos (subsistencia).
- **Enmascaramiento de Coherencia (NoData):** Mediante la sección de Transparencia de capa, se configuraron los píxeles con valores anómalos o de decorrelación natural como valores nulos (100% de transparencia). Esto permitió limpiar el ruido visual sobre el océano y las áreas boscosas de los parques nacionales. (Fuente: https://docs.qgis.org/latest/en/docs/user_manual/working_with_raster/raster_properties.html#transparency-properties)
- **Anclaje de Mapa Base:** Se incorporó el servicio vectorial en vivo mediante *QuickMapServices* (Carto Positron) proyectado por debajo de la capa ráster, revelando la topografía costera, los límites estatales y los cuerpos de agua continentales sin sobrecargar la memoria de procesamiento. (Fuente: https://plugins.qgis.org/plugins/quick_map_services/)
- **Composición de Impresión (Layout):** Durante la diagramación del lienzo final, se configuró la barra de escala estableciendo sus propiedades para abarcar los 227.33 km que mide la totalidad del mapa. Esto aseguró una medición de referenciación visual exacta de la zona afectada, complementada con la ubicación del norte geográfico y una doble leyenda categórica-continua. (Fuente: [https://docs.qgis.org/latest/en/docs/user_manual/print_composer/composer_items/composer_scale_bar](https://docs.qgis.org/latest/en/docs/user_manual/print_composer/composer_items/composer_scale_bar.html))



4. Interpretación Geoespacial y Geofísica del Raster DInSAR

El análisis visual y cuantitativo del producto interferométrico final revela un campo de deformación cortical altamente asimétrico y particionado en la región centro-norte. La rampa de color calibrada en metros cuantifica el desplazamiento en la Línea de Visión (LOS) del satélite.

Análisis del Campo de Deformación:

- **Focos de Subsistencia Crítica (Rango hasta -0.52 m):** Las anomalías negativas, representadas en tonalidades rojas (alejamiento del sensor), se concentran de manera prominente en el bloque oriental del análisis. Estas áreas son geológicamente críticas, abarcando la zona costera y marina del Estado Aragua, confirmando focos de hundimiento cortical que intersectan con el sistema de fallas.
- **Zonas de Levantamiento Tectónico (Rango hasta +1.92 m):** Representadas por colores fríos (acercamiento al sensor). Se ubican de manera exclusiva en el bloque occidental continental del Estado Carabobo, indicando un empuje direccional masivo hacia el satélite.

Hallazgos Preliminares

- **Asimetría Estructural:** Se evidenció una separación tectónica bipolar perfecta en la respuesta de la corteza, controlada milimétricamente por el Sistema de Fallas de San Sebastián.
- **Vínculo con la actividad sísmica:** Existe una coincidencia espacial directa entre las áreas de deformación detectadas y las coordenadas de liberación de energía de los sismos de magnitudes 7.1 y 7.5.

Hipótesis Derivadas

- **Deformación Co-sísmica:** El análisis concluye de manera preliminar que los desplazamientos métricos extraídos de la telemetría Sentinel-1 representan una deformación co-sísmica directa originada por el doblete.
- **Transferencia de Esfuerzos (Stress Transfer):** Se postula que la ruptura inicial (M7.1) sobrecargó la tensión acumulada en el segmento adyacente de la falla, actuando como el detonante del evento M7.5.
- **Modificación Batimétrica:** El pronunciado hundimiento del bloque oriental sugiere un desplazamiento vertical del lecho marino local, con posibles implicaciones hidrodinámicas inmediatas tras la ruptura.

Incertidumbres Metodológicas y Limitaciones

- **Pérdida de Coherencia:** Existe una decorrelación severa por vegetación en las montañas (Parques Nacionales Henri Pittier y San Esteban), generando ruido interferométrico o vacíos de datos que limitan la medición en esas zonas.
- **Ceguera de Profundidad LOS:** La métrica DInSAR captura la deformación bidimensional en el vector LOS del satélite, limitando la visualización tridimensional del comportamiento transpresivo de la falla.

Áreas que Requieren Validación Adicional

Se requiere instrumentación geodésica terrestre (estaciones GNSS continuas) en la línea costera del centro norte de Venezuela para calibrar el valor absoluto del desplazamiento al límite inferior observado en InSAR, así como para aislar el vector de desplazamiento vertical frente al horizontal.

Autoría y Créditos Institucionales

- **Laboratorio / Entidad:** Centro de Investigación Informática Lazarus.
- **Declaración de Verificación:** Todo el procesamiento interferométrico y análisis espacial documentado en este informe constituye una evaluación generada estrictamente para fines de estudio e investigación.

