Revista Geográfica de Chile Terra Australis, Vol.61 No. 3 (2025) 126-143 ISSN 0719-9562
https://doi.org/10.23854/07199562.2025613.aguilera

MONITOREO DE DESPLAZAMIENTOS SUPERFICIALES MEDIANTE SERIES DE TIEMPO DINSAR, PSI, SECTOR MONJES BLANCOS, PASO PEHUENCHE, REGIÓN DEL MAULE.

MONITORING OF SURFACE LANDSLIDES USING INSAR AND PSI TIME SERIES, MONJES BLANCOS SECTOR, PEHUENCHE PASS, MAULE REGION.

Miguel Aguilera Peralta[1*], César Becerra Baeza[2], Jacqueline De Rurange Espinoza[3,4]

RESUMEN

Este estudio aplica la técnica de Persistent Scatterer Interferometry (PSI) para el análisis de desplazamientos superficiales en procesos de remoción en masa en el Km 134,7-136,8 de la Ruta Internacional 115-CH, Paso Pehuenche, Región del Maule, Chile. Se procesaron 253 imágenes Sentinel-1 por geometría orbital (253 Ascending y 253 Descending) entre 2015-2024, identificando 27 dispersores persistentes localizados exclusivamente sobre zonas de alteración hidrotermal. Los resultados revelan velocidades de desplazamiento vertical entre 3,43 y 5,48 mm/año (alzamiento) y horizontales entre -6,50 y -8,43 mm/año (hacia el oeste). Los desplazamientos acumulados máximos alcanzaron 66 mm verticalmente y -77,9 mm horizontalmente. El análisis temporal muestra correlación entre períodos de mayor precipitación e incrementos en las tasas de desplazamiento. La concentración de Persistent Scatterer (PS) sobre materiales de alteración hidrotermal confirma que estos actúan como refugios de coherencia en ambientes volcánicos montañosos. La metodología PSI demostró efectividad para superar limitaciones de decorrelación temporal en terrenos complejos, estableciendo una línea base para el monitoreo continuo de amenazas naturales en corredores bioceánicos estratégicos.

Palabras claves: Interferometría SAR, dispersores persistentes, remociones en masa, Sentinel-1, alteración hidrotermal, Cordillera de los Andes.

ABSTRACT

This study applies the Persistent Scatterer Interferometry (PSI) technique to analyze surface displacements associated with mass-wasting processes along km 134.7–136.8 of International Route 115-CH, Paso Pehuenche, Maule Region, Chile. A total of 253 Sentinel-1 images were processed for both orbital geometries (253 ascending and 253 descending) between 2015 and 2024, identifying 27 persistent scatterers located exclusively over hydrothermally altered zones. Results reveal vertical displacement rates ranging from 3.43 to 5.48 mm/year (uplift) and horizontal rates from -6.50 to -8.43 mm/year (westward). Maximum cumulative displacements reached 66 mm vertically and -77.9 mm horizontally. Temporal analysis shows a correlation between periods of higher precipitation and increased displacement rates. The concentration of persistent scatterers over hydrothermally altered materials confirms that these zones act as coherence refuges in mountainous volcanic environments. The PSI methodology proved effective in overcoming temporal decorrelation limitations in complex terrain, establishing a baseline for continuous monitoring of natural hazards along strategic bioceanic corridors

Keywords: SAR Interferometry, Persistent Scatterers, landslide, Sentinel-1, Hydrothermal Alteration, Andes Mountains.

[1]Centro del secano Interior, Universidad Católica del Maule.
[2]Unidad de Análisis Territorial, Dirección de Planeamiento, Ministerio de Obras Públicas.
[3]Área de Construcción, Ingeniería en Geomensura y Geomática. INACAP.
[4]Consultora Anaterra.
*Autor de correspondencia: miguel.peralta@ug.uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de remoción en masa constituyen uno de los peligros geológicos más significativos a nivel global, representando una amenaza constante para la infraestructura crítica y las poblaciones vulnerables (Froude & Petley, 2018). Estos fenómenos geodinámicos ocurren cuando grandes cantidades de materiales colapsan pendiente abajo, desde movimientos imperceptiblemente lentos hasta eventos catastróficos repentinos (Grotzinger & Jordan, 2014), siendo fuente de preocupación debido a la potencial generación de víctimas y daños materiales (Petrucci & Gullà, 2009).

En el contexto sudamericano, la Cordillera de los Andes presenta condiciones geomorfológicas y climáticas particularmente favorables para el desarrollo de procesos de remoción en masa (Sepúlveda et al., 2015). En Chile, estos eventos son recurrentes en zonas cordilleranas debido a la compleja interacción entre alta sismicidad, volcanismo activo, precipitaciones intensas y procesos de deglaciación acelerada asociados al cambio climático (Moreiras & Sepúlveda, 2019). Estudios previos han documentado extensivamente estos procesos en el territorio nacional (Hauser, 1994; Sepúlveda et al., 2006; Scott et al., 2005; Becerra, 2006; Lara, 2007; Becerra & De Rurange, 2018; Marín et al., 2021), evidenciando la necesidad crítica de implementar sistemas de monitoreo continuo. Esta documentación histórica ha permitido establecer patrones regionales de comportamiento, identificando zonas de mayor susceptibilidad y caracterizando los mecanismos de falla predominantes en diferentes contextos geológicos.

La Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) ha emergido como técnica fundamental para la detección y cuantificación de desplazamientos superficiales con precisión milimétrica (Massonnet & Feigl, 1998; Rosen et al., 2000). Esta tecnología explota las diferencias de fase entre adquisiciones SAR temporalmente separadas para detectar cambios en la distancia sensor-superficie (Purkis & Klemas, 2011), permitiendo mediciones de desplazamiento a lo largo de la línea de visión (LOS), que corresponde a una proyección del vector de desplazamiento del terreno real (Tedesco, 2015).

Sin embargo, las aplicaciones convencionales enfrentan limitaciones en ambientes montañosos, incluyendo decorrelación temporal, efectos atmosféricos y errores topográficos residuales (Hanssen, 2001), los cuales pueden reducirse parcialmente seleccionando pares interferométricos con línea base perpendicular relativamente larga (Zebker et al., 1997). La decorrelación temporal surge cuando las propiedades de retrodispersión de la superficie cambian significativamente entre adquisiciones, destruyendo la coherencia interferométrica necesaria para mediciones precisas.

Para superar estas limitaciones, se desarrolló la técnica de Interferometría de Dispersores Persistentes (PSI), introducida por (Ferretti et al., 2000; Ferretti et al., 2001). Esta metodología identifica píxeles que mantienen propiedades de retrodispersión estables a lo largo del tiempo, permitiendo mediciones de deformación de alta precisión incluso en presencia de decorrelación parcial.

La técnica se basa en el análisis estadístico de la fase interferométrica (Hooper et al., 2004):

$$\boldsymbol{\phi_{int}} = \boldsymbol{\phi_{defo}} + \boldsymbol{\phi_{topo}} + \boldsymbol{\phi_{orb}} + \boldsymbol{\phi_{atm}} + \boldsymbol{\phi_{noise}}$$

Donde:

$\boldsymbol{\phi_{defo}}$: componente de deformación, relacionada con el desplazamiento del terreno a lo largo de la línea de visión del satélite.
$\boldsymbol{\phi_{topo}}$: componente topográfica residual, asociada a errores en el modelo digital de elevación (DEM) utilizado para eliminar la fase debida al relieve.
$\boldsymbol{\phi_{orb}}$: fase debida a inexactitudes orbitales.
$\boldsymbol{\phi_{atm}}$: retardo atmosférico diferencial, producto de variaciones espaciales y temporales en la troposfera o ionosfera entre ambas adquisiciones.
$\boldsymbol{\phi_{noise}}$: término de ruido, que incluye decorrelación temporal, térmica y errores orbitales o instrumentales.

Por otro lado, los dispersores persistentes se identifican mediante el índice de dispersión de amplitud:

$$\boldsymbol{D_A = \frac{\sigma_A}{m_A}}$$

donde σ_a es la desviación estándar y m_a la media de las amplitudes temporales (Ferretti et al., 2001). Píxeles con $D_a < 0{,}25$ típicamente exhiben comportamiento coherente (Osmanoğlu et al., 2016).

La coherencia temporal γ_x se estima como:

$$\gamma_x = \frac{1}{N}\left|\sum_{i=1}^{N} \exp\{\sqrt{-1}(\phi_{x,i} - \widehat{\phi_{x,i}} - \Delta\widehat{\phi_{B,x,i}^{u}})\}\right|$$

donde N es el número de interferogramas (Hooper et al., 2007).

El programa Copernicus ha democratizado el acceso a datos SAR mediante Sentinel-1, con resolución temporal de 12 días (Torres et al., 2012), catalizando aplicaciones en monitoreo de remociones en masa (Bekaert et al., 2020; Intrieri et al., 2019; Carlà et al., 2019).

Este estudio implementa PSI para el monitoreo sistemático de procesos de remoción en masa en la Ruta 115-CH, con objetivos específicos de: (i) generar mapas de desplazamiento; (ii) identificar zonas de inestabilidad activa; (iii) analizar evolución temporal; (iv) establecer metodología replicable para corredores viales estratégicos en un contexto de monitoreo en gestión de desastres.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes, específicamente en la comuna de San Clemente (35°58'22.4"S, 70°38'07.7"W), Región del Maule, Chile Central. El análisis se concentra en el corredor vial de la Ruta Internacional 115-CH, Paso Pehuenche, entre los kilómetros 134.7–136.8, abarcando un rango altitudinal desde los 800 hasta los 2.600 m.s.n.m, con un área de 133 ha (figura 1).

El marco geológico del área está dominado por secuencias volcánicas y volcano-sedimentarias del Cenozoico, asociadas al arco volcánico activo de los Andes Centrales como la Laguna del Maule (Becerra & De Rurange, 2018). La presencia de materiales no consolidados sobre pendientes pronunciadas (>30°) genera condiciones de alta susceptibilidad a procesos de remoción en masa (Becerra & De Rurange, 2021).

En cuanto al clima, se ve fuertemente influenciado por el efecto orográfico, con precipitaciones invernales de tipo nival con acumulación entre abril y diciembre. El promedio anual de precipitación líquida alcanza entre 1.500 y 2.000 mm en las zonas más altas (Ruiz & Poblete, 2010).

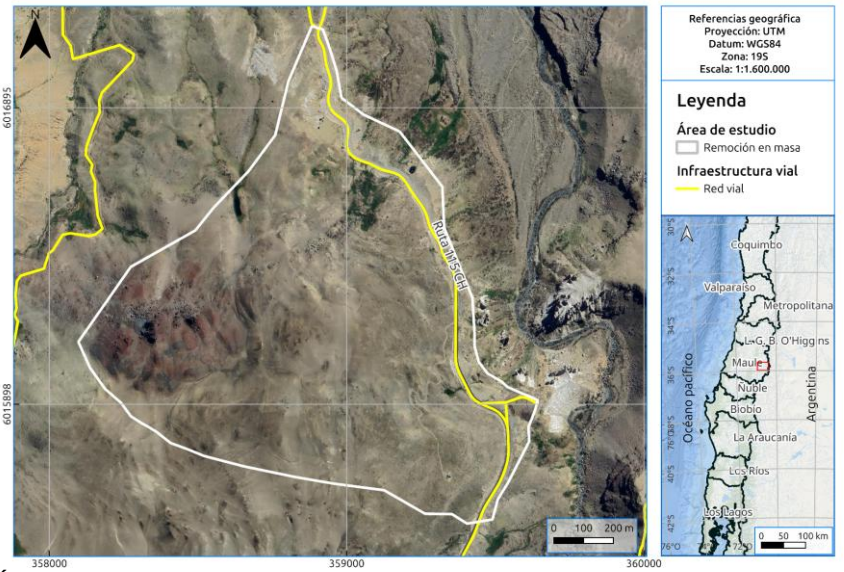

Figura 1. Área de estudio remoción en masa Paso Pehuenche. Elaboración propia.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

Las imágenes Sentinel 1 de tipo SLC (Single Look (figura 2) fueron descargadas desde el sitio web Alaska Satellite Facility Complex en modo Interferometric Wide Swath (IW) con polarización VV, resumida en la Tabla 1.

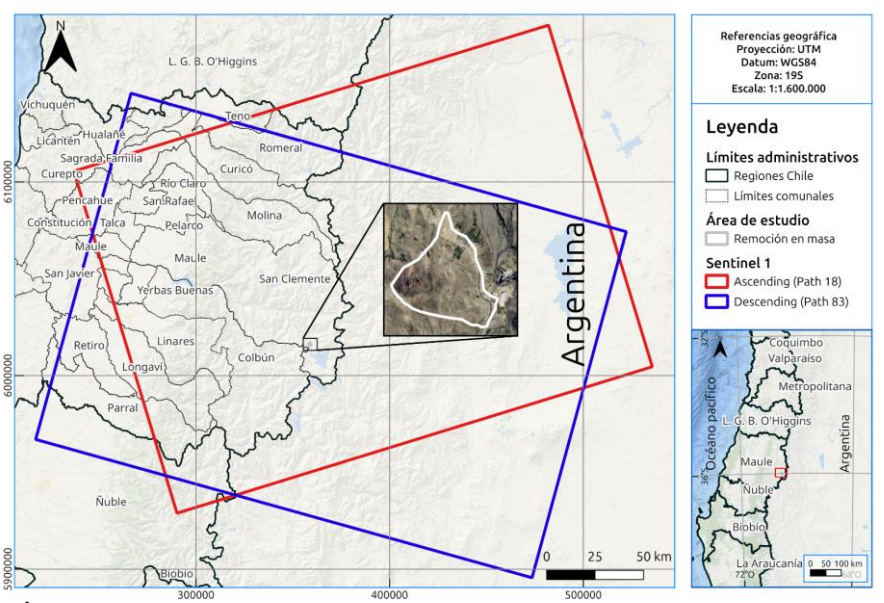

Figura 2. Órbita Ascending y Descending de Sentinel 1 en ROI. Elaboración propia.

Tabla 1. Resumen imágenes Sentinel 1 SLC. Elaboración propia.

Órbita	Path	Cantidad	Fecha
Asc	18	253	09/07/2015-09/07/2024
Dsc	83		02/07/2015-14/07/2024

El procesamiento se realizó con el software SARscape 5.6 (ENVI) siguiendo esquema optimizado para ambientes montañosos (figura 3). El flujo comenzó con importación de datos y órbitas precisas, seguido de selección de imagen maestra basada en coherencia espacial-temporal.

El corregistro se ejecutó con precisión subpíxel mediante correlación cruzada. La red interferométrica consideró restricciones de línea base perpendicular <150 m y temporal <120 días tanto para Ascending (figura 4) como Descending (figura 5). Los candidatos PS se identificaron mediante índice de dispersión de amplitud <0,4 y coherencia temporal >0,7. El análisis de fase incluyó remoción topográfica, refinamiento de línea base y desenvolvimiento de fase. La corrección atmosférica se implementó mediante GACOS y las velocidades LOS se descompusieron en componentes vertical (UD) y horizontal (EW) (Motagh et al. 2017, Shami et al. 2024).

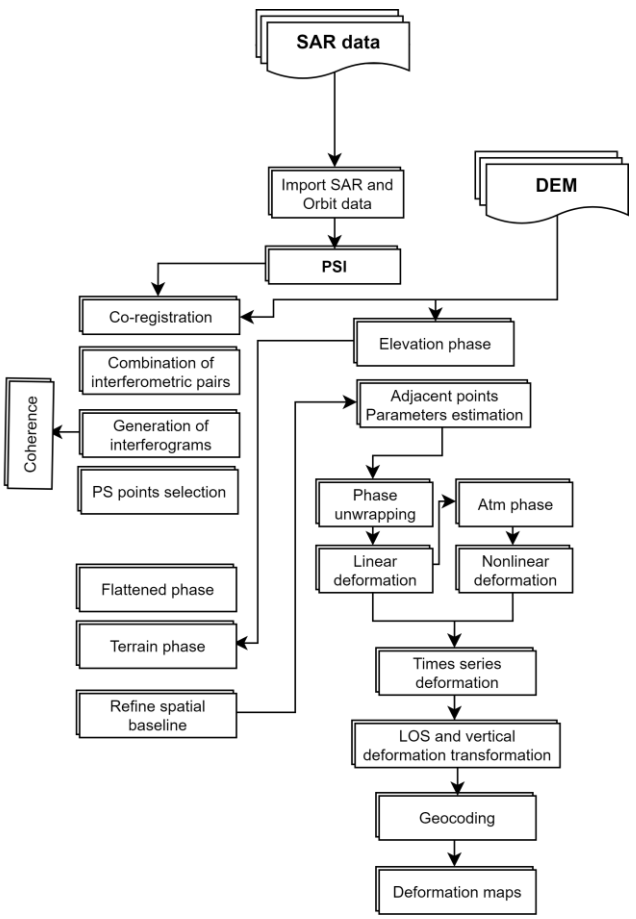

Figura 3. Diagrama de Flujo modificado de (Aimaiti et al., 2019; Chen et al., 2021; Ma et al., 2021; Yao et al., 2022). Fuente: Elaboración Propia.

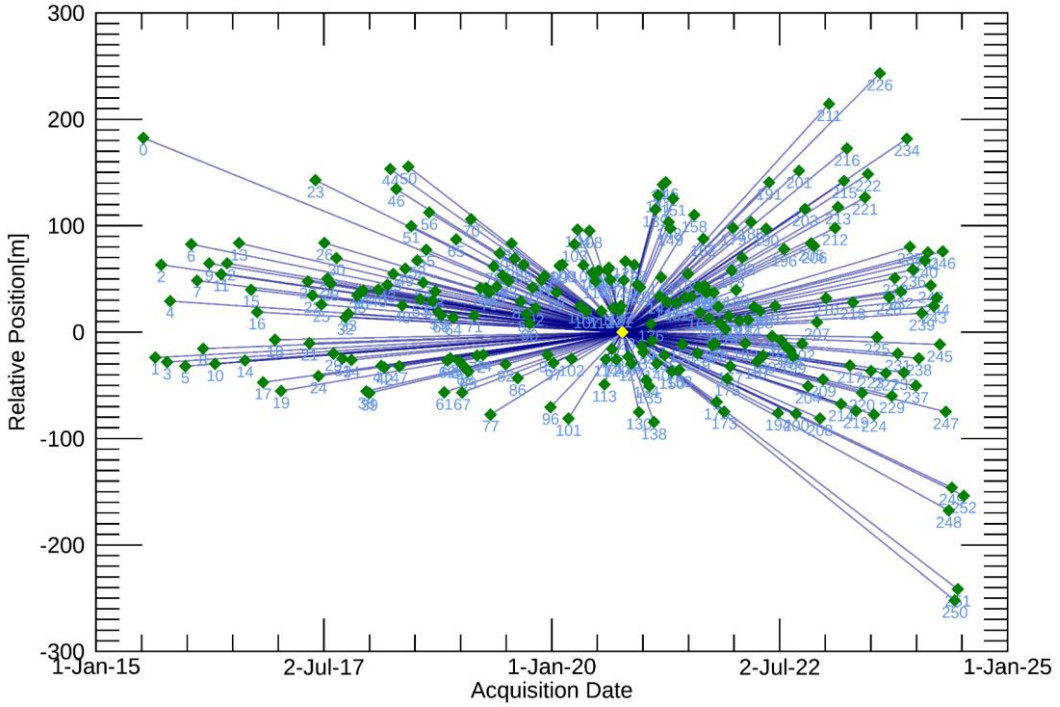

Figura 4. Connection graph de la base temporal para PSI en modo Asc. Elaboración propia.

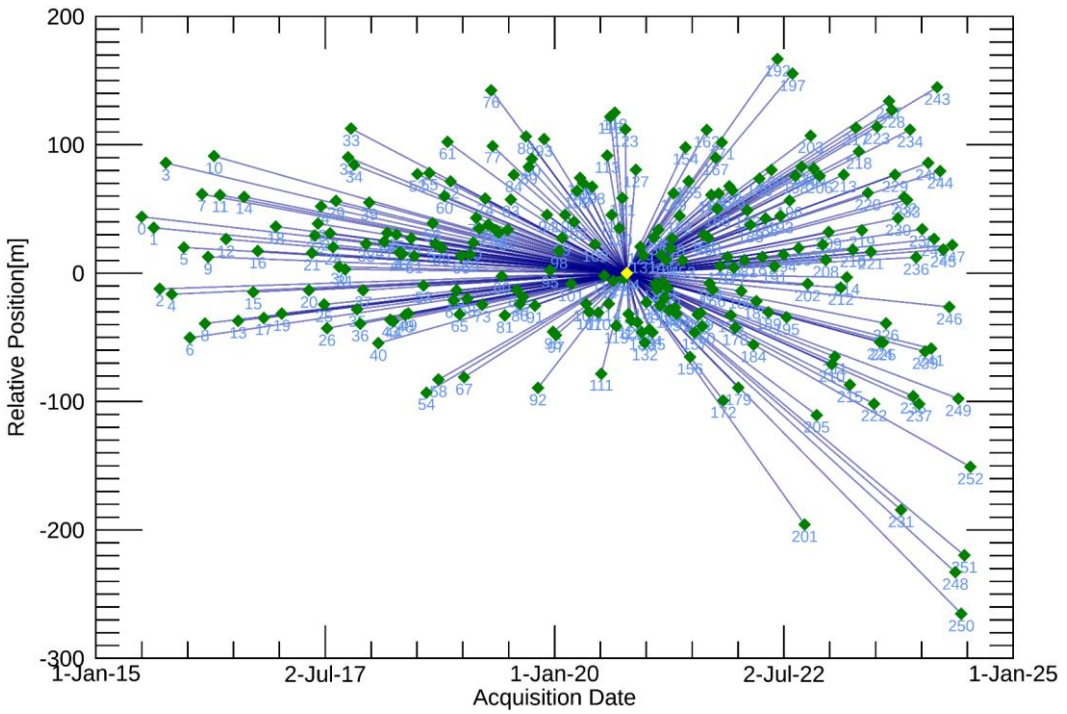

Figura 5. Connection graph de la base temporal para PSI en modo Dsc. Elaboración propia.

4. RESULTADOS

El procesamiento PSI identificó un total de 27 dispersores persistentes distribuidos en el área de estudio. La totalidad de estos PS se localizó exclusivamente sobre afloramientos rocosos y una zona de alteración hidrotermal que mantuvo coherencia espacial estable a lo largo de toda la serie temporal (julio 2015 - julio 2024). La distribución altimétrica de los dispersores persistentes muestra una concentración notable en la banda altitudinal comprendida entre 2.200 y 2.300 metros sobre el nivel del mar, coincidiendo precisamente con la zona de alteración hidrotermal identificada mediante análisis espectral.

El análisis estadístico de la distribución espacial revela que el 85% de los PS se concentra en un área inferior al 15% del total del corredor analizado, evidenciando la naturaleza altamente selectiva de la técnica PSI en ambientes volcánicos montañosos. Esta concentración espacial, aunque limita la resolución del análisis, proporciona información de alta calidad sobre los sectores más críticos desde el punto de vista de estabilidad geotécnica.

Se analizaron tres puntos representativos A, B y C (véase figura 6) para caracterizar el comportamiento temporal de los desplazamientos. La selección de estos puntos se basó en criterios de representatividad espacial, calidad de la señal interferométrica y continuidad temporal de las mediciones.

El análisis consideró tanto la componente vertical (figura 6), donde valores positivos indican alzamiento y negativos subsidencia, como la componente horizontal (figura 7), donde valores positivos representan desplazamiento hacia el este y negativos hacia el oeste. La Tabla 2 resume los máximos, mínimos y desviación estándar de los resultados de desplazamiento vertical y horizontal.

La componente vertical mostró una tendencia general de alzamiento en los tres puntos analizados, con comportamientos temporales distintivos que reflejan la heterogeneidad de los procesos subyacentes. La velocidad media del desplazamiento vertical registrada fue de 3,56 mm/año en el punto A, 3,43 mm/año en el punto B y 5,48 mm/año en el punto C. Todas las velocidades positivas indican tendencia general de alzamiento, sugiriendo procesos de expansión volumétrica o ajustes tectónicos regionales.

Tabla 2. Resumen imágenes Sentinel 1 SLC. Elaboración propia.

	Desplazamiento vertical				Desplazamiento horizontal			
	Vel. media (mm/año)	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	SD (mm)	Vel. media (mm/año)	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	SD (mm)
A	3,56	34,80	-16,20	8,39	-8,43	24,40	-75,20	19,06
B	3,43	66,00	-1,00	12,54	-8,08	0,00	-72,30	15,31
C	5,48	35,60	-13,20	8,86	-6,50	5,40	-77,90	19,32

Los desplazamientos acumulados máximos alcanzaron 34,80 mm para el Punto A con fecha 15-05-2024, 66,00 mm en el Punto B el 20-06-2024 y 35,60 mm para el Punto C el 10-05-2024. Estos valores máximos coinciden temporalmente con el final del período de análisis, sugiriendo aceleración reciente en los procesos de deformación. La magnitud del desplazamiento acumulado en el Punto B, casi el doble que, en los otros puntos, indica condiciones locales específicas que favorecen mayor actividad de deformación.

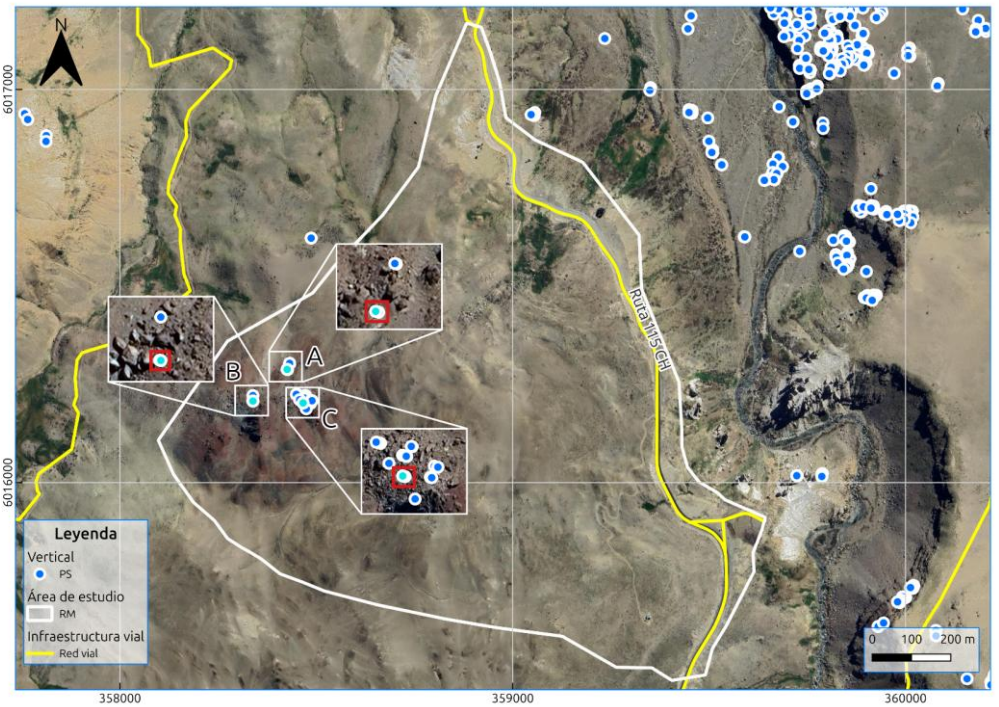

Figura 6. Selección de PS en A, B y C en desplazamiento vertical. Elaboración propia.

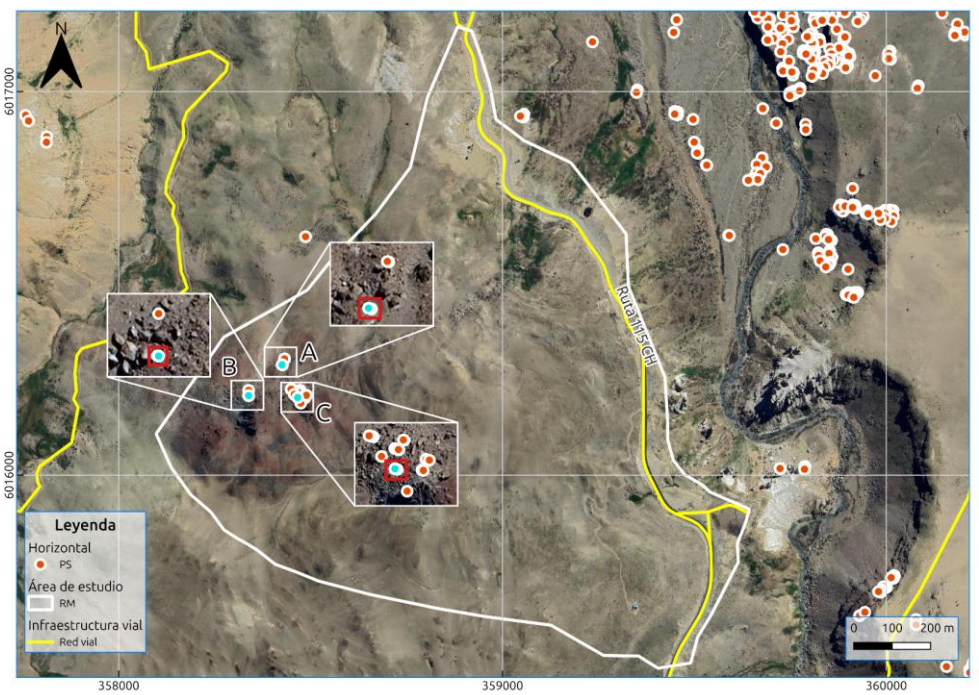

Figura 7. Selección de PS en A, B y C en desplazamiento horizontal. Elaboración propia.

Los valores mínimos registrados fueron -16,20 mm para el Punto A el 27-06-2017, -1,00 mm en el Punto B el 19-08-2015 y -13,20 mm para el Punto C el 19-09-2015, indicando episodios puntuales de subsidencia. Estos episodios de subsidencia temporal pueden relacionarse con eventos de precipitación extrema que generan compactación temporal de materiales o con efectos sísmicos que producen reajustes instantáneos en la estructura del terreno.

La desviación estándar fue de 8,39 mm (Punto A), 12,54 mm (Punto B) y 8,86 mm (Punto C), indicando variabilidad moderada en las mediciones. La mayor variabilidad en el Punto B es consistente con su mayor magnitud de desplazamiento acumulado, sugiriendo mayor sensibilidad a factores externos como precipitación, temperatura y actividad sísmica regional.
El análisis de frecuencias de los desplazamientos verticales revela patrones estacionales claros en los tres puntos. Los períodos de mayor alzamiento coinciden sistemáticamente con los meses de invierno austral (junio-agosto), cuando las precipitaciones alcanzan sus valores máximos y los procesos de congelamiento-deshielo son más intensos.

La componente horizontal mostró velocidades medias negativas: -8,43 mm/año (Punto A), -8,08 mm/año (Punto B) y -6,50 mm/año (Punto C), indicando desplazamiento predominante hacia el oeste. Esta dirección de movimiento es consistente con la orientación topográfica general del área. Los desplazamientos acumulados máximos fueron 24,40 mm (Punto A), 0,00 mm (Punto B) y 5,40 mm (Punto C). Los valores máximos relativamente bajos indican que el movimiento horizontal es predominantemente unidireccional hacia el oeste, con episodios menores de movimiento en dirección opuesta.

La ausencia completa de desplazamiento máximo positivo en el Punto B sugiere movimiento consistentemente hacia el oeste durante todo el período de análisis. Los mínimos alcanzaron -75,20 mm (Punto A), -72,30 mm (Punto B) y -77,90 mm (Punto C), representando desplazamientos acumulados significativos hacia el oeste durante el período de análisis. La magnitud similar de estos valores mínimos sugiere control regional sobre los procesos de deformación horizontal, posiblemente relacionado con ajustes gravitacionales de largo plazo o efectos tectónicos regionales.

La homogeneidad relativa de las velocidades horizontales entre los tres puntos contrasta con la mayor variabilidad observada en las velocidades verticales, sugiriendo que los procesos que controlan el desplazamiento horizontal operan a escala regional, mientras que los procesos verticales están más influenciados por condiciones locales.

El análisis conjunto de vertical y horizontal revela patrones complejos de deformación. Los episodios de máximo alzamiento vertical tienden a coincidir con períodos de menor velocidad de desplazamiento horizontal, sugiriendo mecanismos de deformación acoplados donde la expansión volumétrica reduce temporalmente las tasas de reptación gravitacional. Las series temporales muestran variabilidad interanual significativa, con años caracterizados por deformación acelerada (2017, 2019, 2023) alternando con períodos de relativa estabilidad. Esta variabilidad puede relacionarse con fluctuaciones climáticas interanuales, incluyendo eventos El Niño-La Niña que modulan los regímenes de precipitación y temperatura en la región. Por otro lado, las figuras 8, 9 y 10 muestran las series de tiempo de desplazamiento acumulado para la descomposición vertical de los puntos A, B y C respectivamente, evidenciando tendencias generales de alzamiento con fluctuaciones estacionales superpuestas.

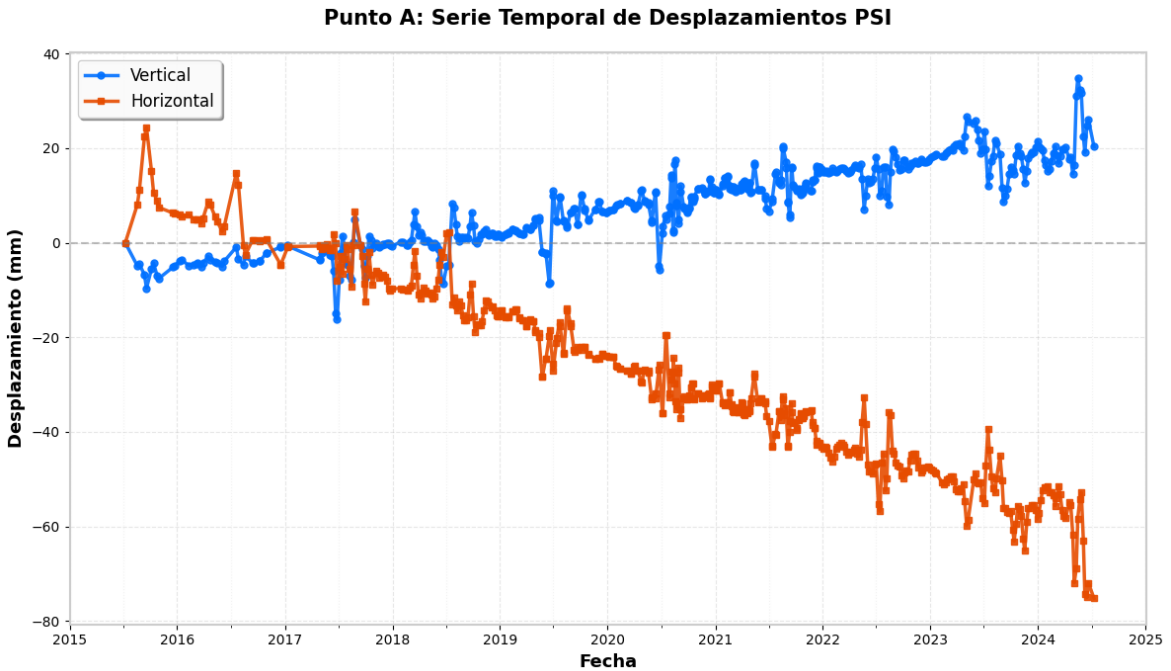

Figura 8. Desplazamiento acumulado vertical vs horizontal para punto A. Elaboración propia.

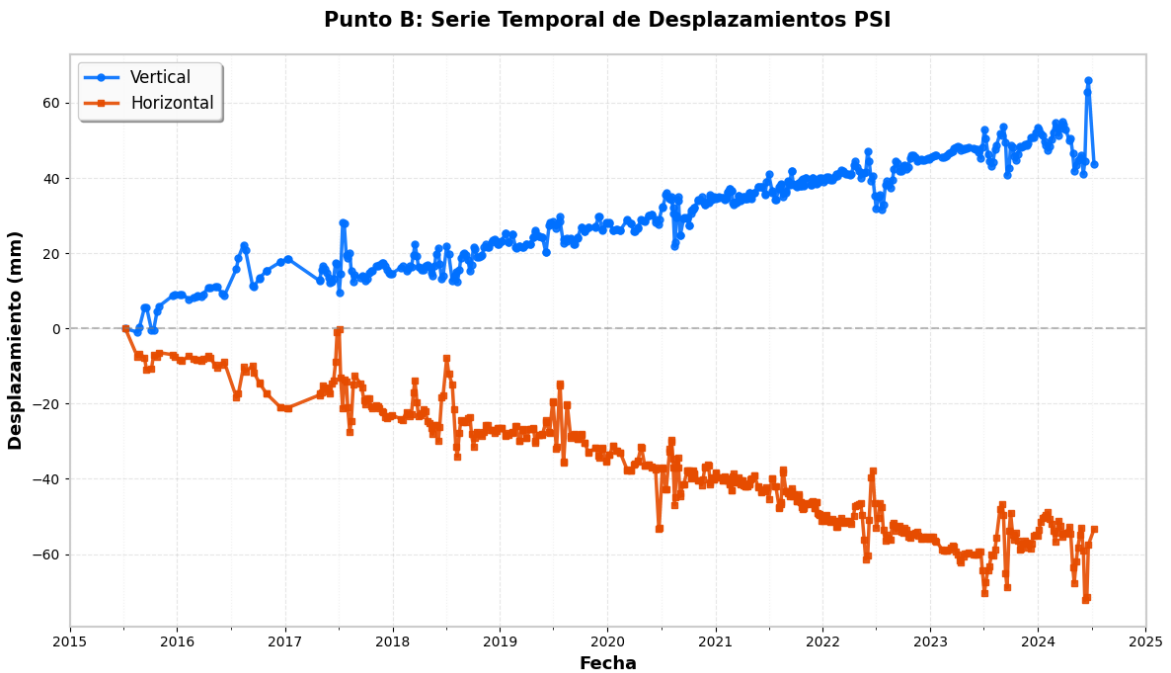

Figura 9. Desplazamiento acumulado vertical vs horizontal para punto B. Elaboración propia.

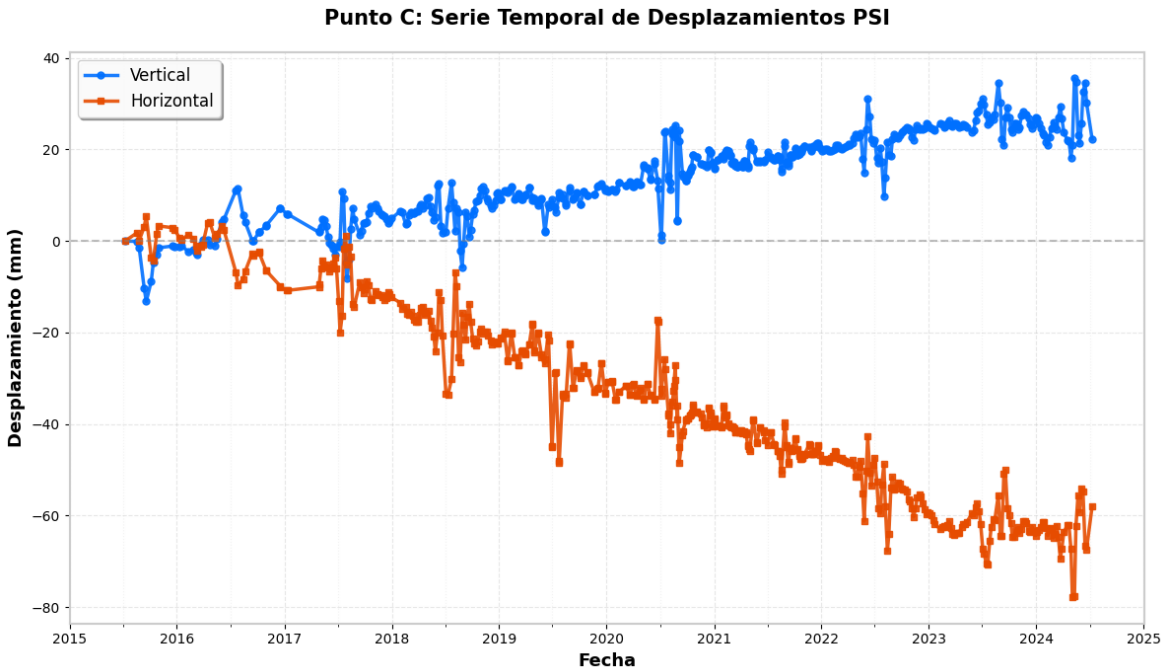

Figura 10. Desplazamiento acumulado vertical vs horizontal para punto C. Elaboración propia.

5. DISCUSIÓN

La concentración exclusiva de los 27 PS sobre zonas de alteración hidrotermal representa un hallazgo significativo que establece un vínculo directo entre procesos geológicos y capacidades de monitoreo remoto. Esta distribución espacial altamente selectiva refleja las condiciones excepcionales de estabilidad electromagnética que caracterizan estos materiales alterados. Estos procesos generan texturas superficiales rugosas a escala centimétrica y propiedades electromagnéticas estables que mantienen coherencia interferométrica durante períodos prolongados.

Estudios recientes demuestran la eficacia de la tecnología InSAR en los estudios superficiales de alteración hidrotermal (Dualeh & Biggs, 2025; Zhang, Amelung & Aoki, 2021), confirmando que estas zonas constituyen objetivos preferentes para aplicaciones de monitoreo geodésico. La estabilidad temporal de las propiedades de retrodispersión en zonas de alteración hidrotermal se atribuye a varios factores: (i) ausencia de vegetación debido a condiciones edáficas adversas; (ii) presencia de minerales metálicos que incrementan la constante dieléctrica; (iii) texturas superficiales rugosas que favorecen la retrodispersión de esquina; (iv) resistencia a la meteorización debido a la cementación mineral secundaria.

La figura 11 muestra la alteración hidrotermal realizada con Sentinel-2 para el presente estudio. Se procesó una imagen Sentinel-2 utilizando Sen2Cor para corrección atmosférica (Main-Knorn et al., 2017). La combinación de bandas 12 (SWIR2, 2190 nm), 8A (NIR, 865 nm) y 3 (Verde, 560 nm) se utilizó para la detección de alteración hidrotermal, donde las tonalidades rojizas representan zonas de alteración (Pour & Hashim, 2018).

Sin embargo, la baja densidad de PS en este entorno volcánico de alta montaña se debe a múltiples factores adicionales. La presencia estacional de nieve y hielo altera fuertemente la retrodispersión radar y genera una rápida decorrelación temporal de la señal (Wegmüller & Werner, 1998). Las pendientes abruptas características del relieve producen distorsiones geométricas asociadas a efectos de layover y sombra, lo que limita el número de píxeles coherentes disponibles para el análisis PSI (Pohl & van Genderen, 2016). La atmósfera en ambientes montañosos introduce retardos espaciales y temporales altamente variables, lo que incrementa la pérdida de coherencia interferométrica (Hanssen, 2001).

La pérdida de coherencia temporal y el bajo nivel de coherencia provocan que numerosas mediciones obtenidas mediante la técnica PSI deban ser descartadas por no cumplir con los estándares de calidad (D'Aranno et al., 2021). Estudios demuestran que la presencia de vegetación (Ferretti et al., 2001; Wu et al., 2024), pendientes pronunciadas (Hanssen, 2001; Lee & Liu, 2001) y materiales volcánicos (Pappas et al., 2025) contribuyen a la decorrelación temporal, limitando la identificación de PS estables.

Los puntos analizados presentan características topográficas específicas que influyen en los patrones de desplazamiento observados (Figura 12):

- Punto A: 2.230 m.s.n.m., pendiente -24%
- Punto B: 2.250 m.s.n.m., pendiente -25%
- Punto C: 2.249 m.s.n.m., pendiente -20%

Las pendientes superiores al 20% en materiales alterados hidrotermalmente presentan factores de seguridad cercanos al límite de estabilidad, especialmente bajo condiciones de saturación (Reid et al., 2001). La altitud homogénea de los puntos sugiere que se encuentran en una zona de alteración hidrotermal específica con características litológicas similares.

La combinación de bandas 12, 8A y 3 de Sentinel-2 permitió la detección precisa de estas zonas, donde las tonalidades rojizas representan óxidos de hierro y minerales de alteración característicos de procesos hidrotermales (Carvalho et al., 2025). Los procesos propios de la actividad del complejo Volcánico Laguna del Maule y la alteración hidrotermal pueden incidir en los mecanismos de movimiento superficial en el sector (Rojas, 2019).

Las series temporales muestran variabilidad estacional que puede relacionarse con ciclos de precipitación (Handwerger et al., 2019), lo que se evidencia en los desplazamientos acumulados en la serie de tiempo. Los períodos de mayor precipitación coinciden con incrementos en las tasas de desplazamiento, sugiriendo influencia de la saturación en los procesos de deformación (Kang et al., 2017) atribuibles a arcillas expansivas que pueden incidir en los desplazamientos de procesos en InSAR (Gabriel et al., 1989) y PSI (Toure et al., 2025). Las tasas de desplazamiento identificadas, aunque moderadas en magnitud absoluta, son persistentes y acumulativas. El desplazamiento horizontal acumulado de casi 80 mm en 9 años representa una señal significativa que requiere monitoreo continuo. Estudios similares han documentado que tasas de desplazamiento aparentemente bajas pueden preceder aceleración súbita en materiales volcánicos alterados (Intrieri et al., 2018).

La metodología PSI demostró efectividad para superar limitaciones típicas de ambientes montañosos, incluyendo decorrelación temporal y efectos atmosféricos. Sin embargo, la baja densidad de PS limita la resolución espacial del análisis, requiriendo técnicas complementarias para caracterización completa de la inestabilidad de laderas.

Así mismo, no se descarta la posibilidad de que parte de las fluctuaciones observadas en el desplazamiento vertical respondan a efectos no tectónicos asociados a la carga hidrológica, tales como la redistribución estacional de agua superficial, subterránea o nival. Estudios recientes basados en GNSS de alta resolución han demostrado que las variaciones en el contenido hídrico regional pueden explicar una fracción significativa de las oscilaciones anuales del desplazamiento vertical (Xu et al., 2024).

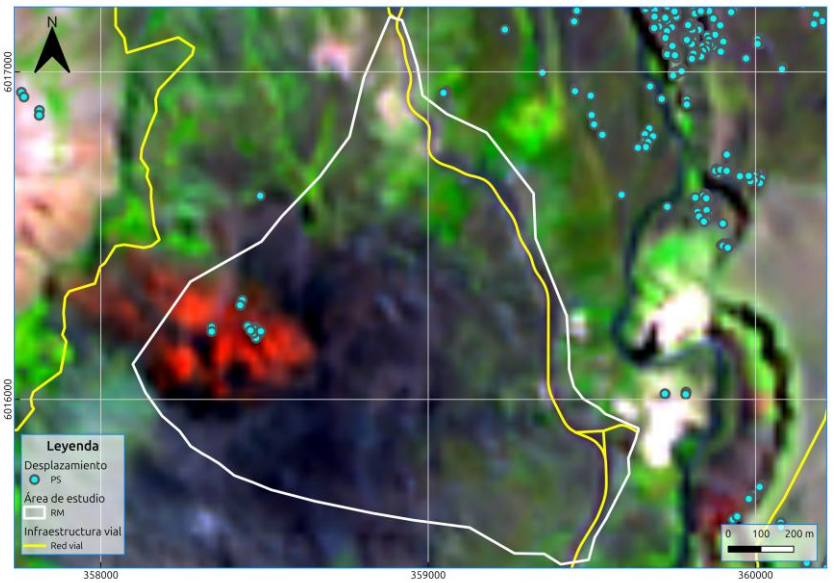

Figura 9. PS sobre alteración hidrotermal evidenciada por medio de Sentinel 2 (bandas 12, 8A y 3). Elaboración propia.

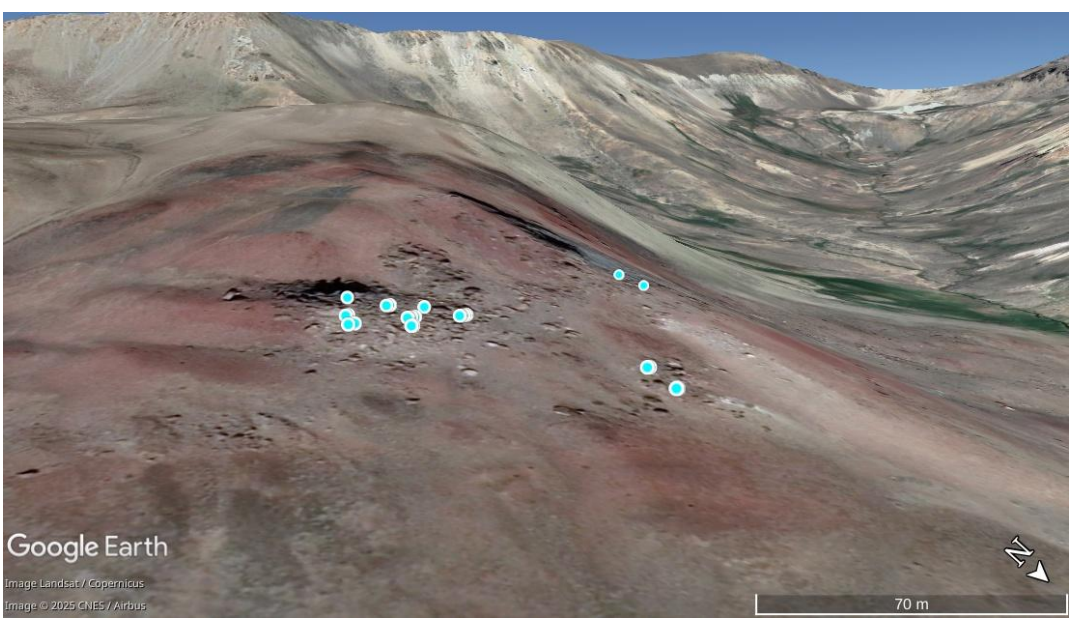

Figura 10. Visualización de los PS en Google Earth Pro. Elaboración propia.

6. CONCLUSIONES

Este estudio demuestra exitosamente la aplicación de PSI para monitoreo de procesos de remoción en masa en ambientes cordilleranos con alteración hidrotermal, estableciendo una metodología útil para sistemas de monitoreo operacional en corredores viales estratégicos de alta montaña.

La identificación de 27 dispersores persistentes concentrados exclusivamente sobre zonas de alteración hidrotermal revela control litológico significativo en la estabilidad temporal de reflectores radar. Este comportamiento confirma que las zonas de alteración hidrotermal pueden actuar como "refugios de coherencia" en ambientes volcánicos montañosos, manteniendo propiedades de retrodispersión estables durante períodos prolongados. Esta concentración espacial selectiva proporciona información de calidad excepcional sobre sectores críticos desde perspectivas geotécnicas y de estabilidad de infraestructura.

El concepto de "refugios de coherencia" tiene implicaciones importantes para futuras aplicaciones de PSI en ambientes similares. La identificación prospectiva de zonas de alteración hidrotermal mediante análisis espectral puede optimizar significativamente el diseño de campañas de monitoreo PSI, permitiendo predicciones sobre disponibilidad espacial de dispersores persistentes antes del procesamiento interferométrico.

Las velocidades verticales positivas observadas (3,43-5,48 mm/año) sugieren procesos complejos de expansión volumétrica asociados a hidratación de minerales arcillosos, mientras que las velocidades horizontales negativas (-6,50 a -8,43 mm/año) indican una posible reptación gravitacional controlada por gradiente topográfico. La persistencia y coherencia de estos patrones durante un período de 9 años confirma la naturaleza sistemática de los procesos subyacentes.

La magnitud de los desplazamientos acumulados (hasta 66 mm verticalmente y -77,9 mm horizontalmente) representa señales significativas que trascienden la precisión típica de mediciones PSI, confirmando procesos geodinámicos activos que requieren monitoreo continuo. Estos desplazamientos, aunque no indican inestabilidad inmediata, sugieren ajustes continuos en la estructura superficial que podrían evolucionar hacia condiciones menos estables bajo escenarios de perturbación externa. La correlación temporal entre períodos de mayor precipitación e incrementos en las tasas de desplazamiento establece un vínculo causal entre factores hidroclimatológicos y procesos de deformación superficial. Esta correlación tiene implicaciones prácticas importantes para la gestión de riesgos, permitiendo anticipar períodos de mayor actividad de deformación basándose en pronósticos meteorológicos estacionales.

La correlación espacial entre PS y zonas de alteración hidrotermal identificadas mediante la combinación de bandas 12, 8A y 3 de Sentinel-2 demuestra la efectividad del procesamiento conjunto de datos ópticos y radar para caracterización integral de inestabilidades superficiales. Esta integración metodológica maximiza las capacidades de ambas tecnologías, utilizando la sensibilidad espectral de sistemas ópticos para caracterización litológica y la precisión geodésica de sistemas radar para cuantificación de deformaciones.

La metodología desarrollada es directamente transferible a otros corredores viales en ambientes cordilleranos similares, particularmente aquellos que atraviesan zonas volcánicas activas con alteración hidrotermal extensiva. La replicabilidad de la metodología se ve facilitada por la disponibilidad gratuita y sistemática de datos Sentinel-1 y Sentinel-2, eliminando barreras económicas para implementación en países en desarrollo.

Los resultados establecen una línea base cuantitativa fundamental para monitoreo continuo del corredor vial Ruta 115-CH. Las series temporales de 9 años proporcionan información crítica sobre tendencias de deformación a largo plazo, permitiendo evaluación de estabilidad de infraestructura crítica en ambientes volcánicos activos.

Esta línea base temporal es esencial para detectar cambios futuros en los regímenes de deformación que podrían indicar evolución hacia condiciones de mayor inestabilidad. El establecimiento de umbrales de alerta basados en desviaciones estadísticas respecto a las tendencias históricas permitirá implementar sistemas de alerta temprana para gestión integral de desastres. La integración de resultados PSI con modelos digitales de elevación de alta resolución y cartografía geológica detallada proporciona una base sólida para análisis de susceptibilidad a remociones en masa a escala de corredor. Esta integración facilita la identificación de sectores adicionales con potencial de inestabilidad que podrían no estar representados por dispersores persistentes pero que requieren evaluación mediante técnicas complementarias.

Las limitaciones principales incluyen baja densidad de PS característica de ambientes volcánicos montañosos y resolución espacial limitada para caracterización detallada de procesos de inestabilidad. Estas limitaciones son inherentes a la técnica PSI en ambientes complejos y requieren enfoques metodológicos complementarios para caracterización completa de amenazas de origen natural.

Estudios futuros deberían considerar integración con técnicas complementarias como SBAS-InSAR para incrementar densidad espacial de mediciones, monitoreo in-situ mediante estaciones geodésicas para validación cuantitativa de resultados, modelamiento numérico de estabilidad de laderas para evaluación de factores de seguridad, y análisis de escenarios climáticos futuros para evaluación de evolución de amenazas bajo condiciones de cambio climático.

Finalmente, este estudio contribuye al desarrollo de capacidades nacionales para monitoreo de amenazas de origen natural mediante tecnologías espaciales, estableciendo métodos para futuras aplicaciones en gestión de riesgos de desastres y mantenimiento preventivo de infraestructura crítica en ambientes cordilleranos.

7. AGRADECIMIENTOS

A la Agencia Espacial Europea por acceso gratuito a datos Sentinel del programa Copernicus.

8. REFERENCIAS

Becerra, C. (2006). *Análisis de riesgo natural por remociones en masa, carretera El Cobre, División El Teniente*. Corporación Nacional del Cobre, Rancagua, Chile.

Becerra, C., & De Rurange, J. (2018). Modelo de susceptibilidad a procesos de remociones en masa en rutas cordilleranas de Chile Central: Ruta 115 CH, Paso Pehuenche, Región del Maule. *Investigaciones Geográficas*, 55, 89-110.

Becerra, C., & De Rurange, J. (2021). Análisis de deslizamiento mediante técnicas UAV y LIDAR en Ruta 115 CH, Paso Pehuenche, Sector Monjes Blancos, Región del Maule, Chile. *Investigaciones Geográficas*, 61, 87-98.

Bekaert, D. P. S., Handwerger, A. L., Agram, P., & Kirschbaum, D. B. (2020). InSAR-based detection method for mapping and monitoring slow-moving landslides in remote

regions with steep and mountainous terrain: An application to Nepal. *Remote Sensing of Environment*, 249, 111983.

Carlà, T., Intrieri, E., Raspini, F., Bardi, F., Farina, P., Ferretti, A., Colombo, D., Novali, F., & Casagli, N. (2019). Perspectives on the prediction of catastrophic slope failures from satellite InSAR. *Scientific Reports*, 9, 14137.

Carvalho, M., Cardoso-Fernandes, J., González, F. J., & Teodoro, A. C. (2025). Comparative performance of Sentinel-2 and Landsat-9 data for raw materials' exploration onshore and in coastal areas. *Remote Sensing*, 17(2), 305.

D'Aranno, P. J. V., Di Benedetto, A., Fiani, M., Marsella, M., Moriero, I., & Palenzuela Baena, J. A. (2021). An application of Persistent Scatterer Interferometry (PSI) technique for infrastructure monitoring. *Remote Sensing*, 13, 1052.

Dualeh, E. W., & Biggs, J. (2025). Separating magmatic and hydrothermal deformation using InSAR timeseries: Independent component analysis at Corbetti Caldera, Ethiopia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 130, e2024JB030974.

Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), 2202-2212.

Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8-20.

Froude, M. J., & Petley, D. N. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8), 2161-2181.

Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., & Zebker, H. A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, 94(B7), 9183-9191.

Grotzinger, J., & Jordan, T. H. (2014). *Understanding Earth* (7th ed.). W.H. Freeman and Company.

Handwerger, A. L., Huang, M. H., Fielding, E. J., Booth, A. M., & Bürgmann, R. (2019). A shift from drought to extreme rainfall drives a stable landslide to catastrophic failure. *Scientific Reports*, 9(1), 1569.

Hanssen, R. F. (2001). *Radar interferometry: Data interpretation and error analysis*. Springer Netherlands.

Hauser, A. (1994). Remociones en Chile. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 31(3), 159.

Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR Persistent Scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31(23), L23611.

Hooper, A., Segall, P., & Zebker, H. (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B7), B07407.

Intrieri, E., Raspini, F., Fumagalli, A., Lu, P., Del Conte, S., Farina, P., ... & Casagli, N. (2018). The Maoxian landslide as seen from space: detecting precursors of failure with Sentinel-1 data. *Landslides*, 15(1), 123-133.

Intrieri, E., Carlà, T., Farina, P., Bardi, F., Ketizmen, H., & Casagli, N. (2019). Satellite interferometry as a tool for early warning and aiding decision making in an open-pit mine. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*,

12(12), 5248-5258.

Kang, Y., Zhao, C., Zhang, Q., Lu, Z., & Li, B. (2017). Application of InSAR techniques to an analysis of the Guanling landslide. *Remote Sensing*, 9(10), 1046.

Lara, M. (2007). *Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en la Quebrada San Ramón*. Universidad de Chile.

Lee, H., & Liu, J. G. (2001). Analysis of topographic decorrelation in SAR interferometry using ratio coherence imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 223-232.

Main-Knorn, M., Pflug, B., Louis, J., Debaecker, V., Müller-Wilm, U., & Gascon, F. (2017). Sen2Cor for Sentinel-2. *Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII*, 10427, 1042704.

Marín, M., Neira, H., Garrido, N., & Báez, F. (2021). *Visor territorial de fallecidos por remociones en masa en Chile entre los años 1938-2020*. SERNAGEOMIN.

Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4), 441-500.

Moreiras, S., & Sepúlveda, S. (2019). Megalandslides in the Andes of central Chile and Argentina (32°-34° S) and potential hazards. *Geological Society, London, Special Publications*, 399, 329-344.

Motagh, M., Shamshiri, R., Haghshenas-Haghighi, M., Wetzel, H.-U., Akbari, B., Nahavandchi, H., Roessner, S., & Arabi, S. (2017). Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan Plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements. *Engineering Geology*, 218, 134-151. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.01.011

Osmanoğlu, B., Sunar, F., Wdowinski, S., & Cabral-Cano, E. (2016). Time series analysis of InSAR data: Methods and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 90-102.

Pappas, O., Biggs, J., Prats-Iraola, P., Pulella, A., Stinton, A., & Achim, A. (2025). Measuring topographic change after volcanic eruptions using multistatic SAR satellites: Simulations in preparation for ESA's Harmony mission. *Remote Sensing of Environment*, 317, 114528.

Petrucci, O., & Gullà, G. (2009). A support analysis framework for mass movement damage assessment: Applications to case studies in Calabria (Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2), 315-326.

Pohl, C., & van Genderen, J. (2016). *Remote Sensing Image Fusion: A Practical Guide* (1st ed.). CRC Press.

Pour, A. B., & Hashim, M. (2018). Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, south-eastern Islamic Republic of Iran. *Journal of Taibah University for Science*, 10(5), 787-799.

Purkis, S. J., & Klemas, V. V. (2011). Remote sensing and global environmental change. John Wiley & Sons Ltd. https://doi.org/10.1002/9781118687659.

Reid, M. E., Sisson, T. W., & Brien, D. L. (2001). Volcano collapse promoted by hydrothermal alteration and edifice shape, Mount Rainier, Washington. *Geology*, 29(9), 779-782.

Rojas Innocenti, A. I. (2019). *Mineralogía de alteración e hidroquímica del sistema volcánico-hidrotermal Laguna del Maule: Implicancias en el riesgo volcánico, alzamiento*

superficial y recurso geotérmico (Tesis de Magíster en Ciencias, mención Geología, y Memoria para optar al título de Geólogo). Universidad de Chile, Santiago de Chile.

Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodriguez, E., & Goldstein, R. M. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3), 333-382.

Ruiz, V. H., & Poblete, P. A. (2010). *Análisis integrado de las condiciones climáticas de la Región del Maule*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Scott, K. M., Vallance, J. W., Kerle, N., Macías, J. L., Strauch, W., & Devoli, G. (2005). Catastrophic precipitation-triggered lahar at Casita volcano, Nicaragua: occurrence, bulking and transformation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30(1), 59-79.

Sepúlveda, S. A., Rebolledo, S., & Vargas, G. (2006). Recent catastrophic debris flows in Chile: Geological hazard, climatic relationships and human response. *Quaternary International*, 158(1), 83-95.

Sepúlveda, S. A., Moreiras, S. M., Lara, M., & Alfaro, A. (2015). Debris flows in the Andean ranges of central Chile and Argentina triggered by 2013 summer storms: characteristics and consequences. *Landslides*, 12(1), 115-133.

Shami, S., Shahriari, M. A., Nilfouroushan, F., Forghani, N., Salimi, M., & Reshadi, M. A. M. (2024). Surface displacement measurement and modeling of the Shah-Gheyb salt dome in southern Iran using InSAR and machine learning techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 132, 104016. https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104016.

Tedesco, M. (2015). Remote sensing of the cryosphere. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/9781118368909.

Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., ... & Rostan, F. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 9-24.

Toure, S., Dasho, O., Wade, S., Diop, O., Kpalma, K., & Maiga, S. A. (2025). Mapping seasonal soil deformation in expansive clay using synthetic aperture radar interferometry: A case study in Diamniadio, Senegal. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*.

Wegmüller, U., & Werner, C. L. (1998). SAR interferometric signatures of forest. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(5), 1236-1245.

Wu, H., Zhang, Y., Kang, Y., Wei, J., Lu, Z., Yan, W., Wang, H., Liu, Z., Lv, X., Zhou, M., Li, K., Liu, Y., & Liu, N. (2024). SAR interferometry on full scatterers: Mapping ground deformation with ultra-high density from space. *Remote Sensing of Environment*, 302, 113965.

Zebker, H. A., Rosen, P. A., & Hensley, S. (1997). Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B4), 7547-7563.

Zhang, Y., Amelung, F., & Aoki, Y. (2021). Imaging the hydrothermal system of Kirishima Volcanic Complex, Japan with ALOS-1/2 InSAR time series. *ESS Open Archive*.