



Universidad Nacional  
de **Río Negro**

Escuela de Geología, Paleontología y Enseñanza de las Ciencias

Trabajo Final de la Licenciatura en Geología

**Análisis temporal de la deformación cortical en el  
norte de Añelo, provincia del Neuquén, mediante  
Interferometría Diferencial de Radar de Apertura  
Sintética (DInSAR)**

Autor: Esteban Vicente Martinez Maliqueo

Director: Dr. Alberto Tomás Caselli

Codirector: Dr. Dominique Maurice Derauw

## **Agradecimientos**

*Este trabajo final de licenciatura representa el cierre de una etapa marcada por el esfuerzo y la dedicación.*

*En primer lugar, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres y a mi hija, por haber estado siempre a mi lado con su acompañamiento incondicional. Su paciencia, aliento y comprensión, fueron pilares fundamentales en este camino. A mi hermana, gracias por estar siempre presente.*

*A mis amigos, esa gran banda que me acompañó todo este tiempo, les agradezco por su compañía, por los consejos y por las charlas que hicieron mucho más llevadero este proceso*

*Quiero expresar también mi sincero agradecimiento a mis directores, el Dr. Alberto Caselli y el Dr. Dominique Derauw, por haber respaldado desde un primer momento mi propuesta de trabajo.*

*Agradezco asimismo al jurado evaluador, la Lic. Cecilia Cabana, el Dr. Darío Orts y el Dr. Darío Vera, por su tiempo y dedicación en la lectura y corrección de este trabajo, cuyas observaciones enriquecieron sin duda el resultado final.*

*Mi agradecimiento se extiende a la Universidad Nacional de Río Negro, por brindarme la posibilidad de formarme profesionalmente en mi ciudad.*

*Finalmente, a todas las personas que, de una forma u otra, formaron parte de este recorrido, gracias.*

*Ha sido un proceso largo y desafiante, pero hoy lo concluyo con mucho orgullo y satisfacción.*

# Índice

Resumen .....	8
Abstract.....	8
1. INTRODUCCIÓN .....	9
1.1. Objetivo del trabajo .....	10
1.2. Ubicación del área de estudio.....	10
2. MARCO TEÓRICO .....	12
2.1. Subsistencia.....	12
2.1.1. Definición de subsidencia .....	12
2.1.2. Clasificación de subsidencia .....	12
2.1.3. Impacto de la extracción de fluidos .....	13
2.2. Técnicas de detección de subsidencia.....	13
2.3. Introducción al radar de apertura sintética (SAR).....	15
2.3.1. Sensores activos .....	15
2.3.2. Radar de apertura sintética (SAR).....	15
2.4. Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) .....	20
2.4.1. Decorrelación interferométrica.....	21
2.4.2. Coherencia.....	22
2.4.3. Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR)....	23
2.4.4. Aplicaciones y limitaciones.....	24
2.5. Plataforma Sentinel .....	24
2.5.1. Copernicus.....	24
2.5.2. Misión Sentinel-1 .....	24
2.5.3. Sentinel-1 .....	25
2.5.4. Instrumento SAR .....	26
2.5.5. Modos de adquisición.....	26
2.5.6. Formato de imagen y nivel de procesamiento .....	28
3. MARCO GEOLÓGICO.....	30
3.1. Marco geológico regional .....	30
3.1.1. Evolución tectonosedimentaria de la cuenca Neuquina.....	31
3.1.2. Formación Vaca Muerta .....	33
3.2. Marco geológico local .....	34
3.2.1. Principales estructuras morfoestructurales .....	34
3.2.2. Evolución y características estructurales .....	35
3.2.3. Unidades aflorantes en el área de estudio .....	37

4.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	39
4.1.	Caracterización climática .....	39
4.1.1.	Temperaturas .....	39
4.1.2.	Precipitaciones .....	40
4.2.	Datos de producción y fractura.....	40
4.2.1.	Producción convencional .....	42
4.2.2.	Producción no convencional.....	43
4.2.3.	Comparación entre producción convencional y no convencional .....	44
4.2.4.	Inyección.....	45
4.2.5.	Comparación entre volúmenes extraídos e inyectados .....	45
4.3.	Procesamiento de datos SAR.....	46
4.3.1.	Vertex Data Search .....	47
4.3.2.	Hybrid Pluggable Processing Pipeline (HyP3) .....	47
4.3.3.	OpenSARLab.....	48
4.3.4.	Miami InSAR Time-Series Software (MintPy) .....	48
4.3.5.	Procedimiento de análisis de series temporales.....	49
5.	RESULTADOS .....	52
5.1.	Sector noreste de Añelo .....	52
5.2.	Sector norte de Sauzal Bonito .....	55
6.	DISCUSIONES.....	57
7.	CONCLUSIONES.....	60
8.	REFERENCIAS .....	61
9.	ANEXOS.....	66
	ANEXO 1. Datos de producción de la cuenca Neuquina.....	67
	Producción de petróleo convencional y no convencional .....	67
	Producción de gas convencional y no convencional.....	67
	ANEXO 2. Datos de producción de pozos de gas y petróleo de Argentina.....	69
	ANEXO 3. Datos de fractura de pozos de hidrocarburos de Argentina.....	70
	ANEXO 4. Estimación de volumen de arena de fractura inyectada.....	71
	ANEXO 5. Estimación de volumen de gas desplazado del reservorio .....	72
	Cálculo de factor de compresibilidad volumétrica .....	73
	ANEXO 6. Procesamiento de productos Sentinel-1 a pedido en Vertex.....	74
	Búsqueda geográfica en Vertex .....	74
	Generación de pares interferométricos mediante SBAS.....	77
	Configuración del procesamiento InSAR .....	78

Obtención de productos interferométricos.....	80
Flujo de trabajo de InSAR utilizado en HyP3.....	82
ANEXO 7. Lista de interferogramas.....	87

## Índice de figuras

**Figura 1.1.** Mapa de las 36 súper cuencas principales del mundo en función de sus recursos potenciales. Tomado de Minisini *et al.* (2020).

**Figura 1.2.** Mapa de ubicación de la zona de estudio.

**Figura 2.1.** Clasificación de subsidencia según su origen. Modificado de Prokopovich (1986).

**Figura 2.2.** Porcentaje de factores que contribuyen a la subsidencia. Modificado de Bagheri Gavkosh *et al.* (2021).

**Figura 2.3.** Utilización de plataformas satelitales desde 1997 hasta enero de 2022 para el análisis de subsidencia. Tomado de Raspini *et al.* (2022).

**Figura 2.4.** Cronología de las principales misiones SAR, pasadas y actuales entre 1991 y 2024, junto con sus principales características.

**Figura 2.5.** Ilustración de sensor activo. Recuperado y traducido de [NASA Earthdata](#) (s.f.-a).

**Figura 2.6.** Espectro electromagnético con bandas de microondas. Recuperado y traducido de [NASA EarthData](#) (s.f.-b).

**Figura 2.7.** Combinaciones de polarización de señales SAR. Modificado de Meyer *et al.* (2021).

**Figura 2.8.** Penetración de la señal SAR según la longitud de onda del sensor. Traducido de Meyer (2019).

**Figura 2.9.** Esquema de la dependencia de la rugosidad de la superficie con respecto a la longitud de onda del sensor: suave, moderada y rugosa. Traducido de Meyer (2019).

**Figura 2.10.** Esquema de los tres tipos principales de dispersión considerados para datos SAR. Traducido de Meyer (2019).

**Figura 2.11.** Geometría de adquisición de datos SAR. Recuperado y traducido de [TREE ALTAMIRA](#) (s.f.).

**Figura 2.12.** Distorsiones debido a la observación lateral de sensor SAR. Tomado de Meyer *et al.* (2021).

**Figura 2.13.** Diagrama esquemático de un interferograma de fase enrollada, donde se ven las franjas de colores con ciclos de  $2\pi$ . Recuperado y traducido de [Geoscience Australia](#) (2017).

**Figura 2.14.** Principio del SAR interferométrico en el monitoreo de desplazamientos. El desplazamiento ilustrado deriva del desfase de dos adquisiciones. Modificado de Schindler *et al.* (2016).

**Figura 2.15.** Geometría de un sistema SAR interferométrico satelital. Traducido de Ferretti *et al.* (2007).

**Figura 2.16.** Representación del satélite Sentinel-1. Recuperado de [ESA](#) (2014).

**Figura 2.17.** Modos de adquisición de imágenes radar de Sentinel-1. Tomado de Torres *et al.* (2012).

**Figura 2.18.** Representación gráfica de la adquisición de subfranjas de la técnica TOPSAR. Recuperado de [Copernicus](#) (s.f.).

**Figura 2.19.** Representación de las subfranjas y ráfagas en los productos *Single Look Complex* (SLC) del modo *Interferometric Wide Swath* (IW). Recuperado de [Copernicus](#) (s.f.).

**Figura 3.1.** Cuencas productivas de Argentina. Tomado de Schiuma *et al.* (2002).

**Figura 3.2.** Ubicación y límites de la cuenca Neuquina. Se indica el área de estudio. Modificado de Howell *et al.* (2005).

**Figura 3.3.** Evolución tectonosedimentaria de la Cuenca Neuquina. **A.** Etapa de sin-rift, **B.** Etapa de post-rift, **C.** Etapa de cuenca de antepaís. Modificado de Howell *et al.* (2005).

**Figura 3.4.** Ubicación del área de estudio en el contexto morfoestructural de la Cuenca Neuquina. Modificado de Ramos *et al.* (2011).

**Figura 3.5.** Superposición de las estructuras mapeadas al tope del Precuyano y basamento con los sistemas de fallas mapeados para el tope del Jurásico. En rojo se indica el área de estudio. 1. Volcán Auca Mahuida. 2. Dorso de los Chihuidos. 3. Alto de Sauzal Bonito. 4. Aguada San Roque. 5. Alto Entre Lomas. 6. Medanita-25 de Mayo. 7. Coirón Amargo. 8. Aguada Toledo. 9. Alto de Kauffman. Modificado de Pángaro *et al.* (2011b).

**Figura 3.6.** Principales fallas y transferencias desarrolladas durante el Triásico Tardío-Jurásico Temprano en el este de la cuenca Neuquina. Se distinguen dos poblaciones de fallas bien marcadas. Modificado de Cristallini *et al.* (2009).

**Figura 3.7.** Mapa geológico de la región norte de la localidad de Añelo, donde se destacan las principales unidades aflorantes y el área de estudio. Modificado de Rodríguez *et al.* (2007).

**Figura 4.1.** Temperaturas medias mensuales (°C) de la Estación Meteorológica La Higuera para el período 2005-2015.

**Figura 4.2.** Precipitaciones medias mensuales (mm) de la Estación Meteorológica La Higuera para el período 2017-2023.

**Figura 4.3.** Precipitaciones totales mensuales (mm) de la Estación Meteorológica La Higuera para el período 2017-2023.

**Figura 4.4.** Ubicación de pozos en el área de estudio según tipo de reservorio.

**Figura 4.5.** Ubicación de pozos en el área de estudio según su clasificación.

**Figura 4.6.** Ubicación de pozos de servicio en el área de estudio según su subclasificación.

**Figura 4.7.** Volúmenes de producción convencional mensual total de petróleo, gas y agua en m<sup>3</sup>.

**Figura 4.8.** Volúmenes de producción no convencional mensual total de petróleo, gas y agua en m<sup>3</sup>.

**Figura 4.9.** Volúmenes de producción mensual total no convencional de petróleo, gas y agua en m<sup>3</sup>, correspondiente al año 2020.

**Figura 4.10.** Porcentaje de producción total mensual según el tipo de reservorio.

**Figura 4.11.** Volúmenes totales mensuales de agua inyectada en pozos sumideros e inyectada para fractura en m<sup>3</sup>.

**Figura 4.12.** Volúmenes mensuales totales inyectados e extraídos en m<sup>3</sup>.

**Figura 4.13.** Evolución de la producción de hidrocarburos en m<sup>3</sup>.

**Figura 4.14.** Estructura del servicio OpenSARLab. Traducido de Meyer *et al.* (2021).

**Figura 4.15.** Interfaz con las características del servidor utilizado para el procesamiento.

**Figura 4.16.** Descripción de la línea base perpendicular del período de estudio.

**Figura 4.17.** Selección del AOI del área de interés.

**Figura 4.18.** Mapa de desplazamiento acumulativo en dirección de la LOS de la región central de la cuenca Neuquina.

**Figura 5.1.** Mapa de desplazamiento vertical en la dirección de la LOS del sector centro-oeste de la cuenca Neuquina. Nótese los recuadros que delimitan las Figuras 5.2 y 5.5, correspondientes al sector noreste de Añelo y al sector norte de Sauzal Bonito.

**Figura 5.2.** Mapa de desplazamiento vertical en la dirección de la LOS correspondiente a la zona noreste de la localidad de Añelo. Se señala el área de estudio y los puntos seleccionados para el análisis.

**Figura 5.3.** Series temporales del desplazamiento vertical, en el sector noreste de Añelo, durante el período mayo 2017 – julio 2024.

**Figura 5.4.** Series temporales del desplazamiento vertical mensual promedio, en el sector noreste de Añelo, durante el período mayo 2017 – julio 2024.

**Figura 5.5.** Mapa de desplazamiento vertical en la dirección de la LOS correspondiente a la zona norte del paraje Sauzal Bonito. Se señalan los puntos seleccionados para el análisis.

**Figura 5.6.** Series temporales del desplazamiento vertical, en el sector norte de Sauzal Bonito, durante el período mayo 2017 – julio 2024.

**Figura 5.7.** Series temporales del desplazamiento vertical mensual promedio, en el sector noreste de Añelo, durante el período mayo 2017 – julio 2024.

**Figura 6.1.** Serie temporal del desplazamiento vertical acumulado en el Punto 1 ubicado al noreste de la localidad de Añelo comparada con el volumen total extraído de petróleo, gas y agua no convencional (NOC). Los valores de volumen extraído han sido invertidos para facilitar la comparación visual.

**Figura 6.2.** Matriz de correlación del desplazamiento vertical acumulado y el volumen de fluidos extraídos.

## Índice de tablas

**Tabla 2.1.** Longitudes de onda y frecuencias de las bandas utilizadas en sistemas SAR. Modificado de Meyer (2019).

**Tabla 5.1.** Puntos analizados en el área de estudio, con su ubicación y desplazamiento vertical promedio.

**Tabla 5.2.** Puntos analizados en el área norte de Sauzal Bonito, con su ubicación y desplazamiento vertical promedio.

## Resumen

Este trabajo cuantifica la deformación superficial en el noreste de la localidad de Añelo, en la región centro-oeste de la provincia del Neuquén, mediante Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR). El objetivo fue investigar la relación entre la subsidencia y la actividad hidrocarburífera en la zona. La utilización de sensores remotos activos supera las limitaciones de los métodos convencionales, proporcionando un análisis geoespacial detallado de la superficie terrestre.

Para ello, se procesaron imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) Sentinel-1 aplicando la técnica DInSAR. En total, se analizaron 183 interferogramas de órbita ascendente, cubriendo el período comprendido entre mayo de 2017 y julio de 2024. La serie temporal de desplazamiento obtenida permitió estimar la velocidad de deformación en la línea de visión (LOS) del satélite.

Los resultados permitieron identificar una extensa área con una marca subsidencia, alcanzando valores promedios cercanos a los  $-7$  mm/año, y una deformación acumulada próxima a los 60 mm durante el periodo de estudio. La alta correlación entre el desplazamiento acumulado y la producción acumulada no convencional sugiere una clara relación entre la extracción de hidrocarburos y el hundimiento del terreno en el área analizada.

**Palabras claves:** DInSAR, Subsidencia, Sentinel-1, Deformación superficial, Hidrocarburos no convencionales.

## Abstract

This study quantifies surface deformation in the northeastern sector of Añelo, located in the central-western region of Neuquén Province, using Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR). The main objective was to investigate the relationship between land subsidence and hydrocarbon-related activities in the area. The use of active remote sensing overcomes the limitations of conventional methods, enabling a detailed geospatial analysis of the Earth's surface.

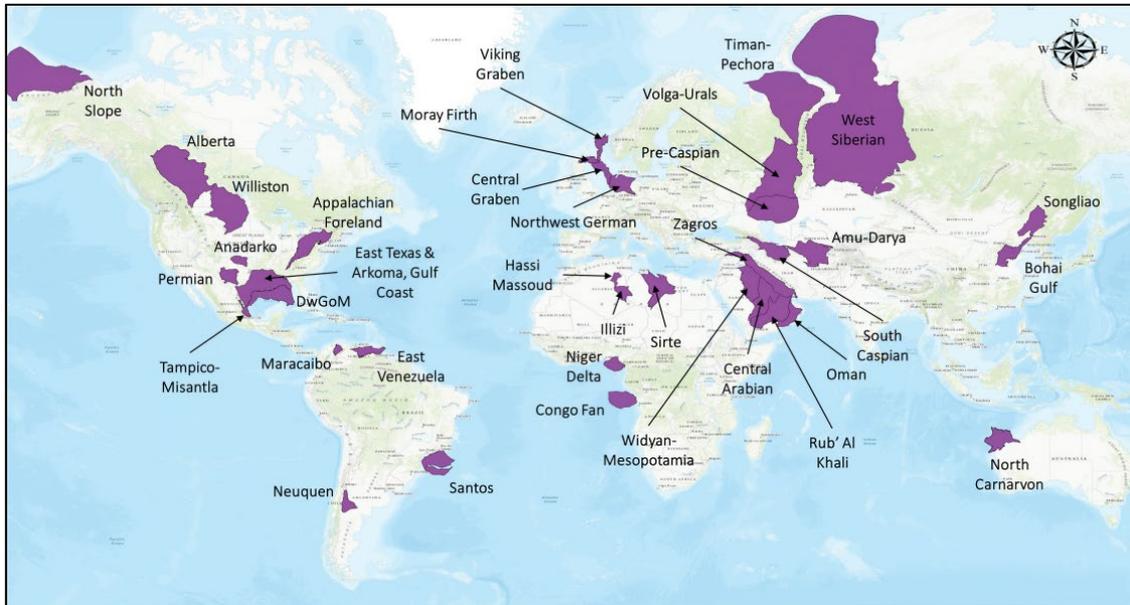
To achieve this, Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) images were processed using the DInSAR technique. A total of 183 ascending-orbit interferograms were analyzed, covering the period from May 2017 to July 2024. The resulting displacement time series allowed for the estimation of deformation velocity along the satellite's Line of Sight (LOS).

The results revealed a broad area exhibiting significant subsidence, with average rates close to  $-7$  mm/year and cumulative deformation of approximately 60 mm over the study period. The strong correlation between cumulative displacement and cumulative unconventional hydrocarbon production suggests a clear relationship between resource extraction and ground subsidence in the study area.

**Keywords:** DInSAR, Subsidence, Sentinel-1, Surface Deformation, Unconventional Hydrocarbons.

## 1. INTRODUCCIÓN

La cuenca Neuquina, reconocida mundialmente por sus importantes recursos de petróleo y gas (ver **Figura 1.1**), ha sido objeto de una intensiva explotación de hidrocarburos durante el último siglo. En particular, en los últimos 10 años, la Formación Vaca Muerta, principal roca madre de la cuenca, ha impulsado un auge en la producción de tipo *shale* (**ANEXO 1**).



**Figura 1.1.** Mapa de las 36 súper cuencas principales del mundo en función de sus recursos potenciales. Tomado de Minisini *et al.* (2020).

Si bien en la cuenca Neuquina no se han registrado riesgos geológicos significativos asociados a la producción de hidrocarburos, estos fenómenos han sido ampliamente documentados en otras cuencas del mundo. Entre los riesgos más relevantes se encuentran la deformación de la superficie y la sismicidad inducida, procesos que pueden generar inestabilidad del suelo y representar amenazas para la población, la infraestructura y las instalaciones petroleras. La ocurrencia de estos fenómenos ha resultado en importantes pérdidas económicas y humanas, evidenciando la necesidad de monitorear y comprender los mecanismos que los originan. En este contexto, el análisis de la deformación de la superficie constituye una herramienta útil para la comprensión de procesos tanto naturales como antrópicos vinculados a la producción de hidrocarburos, lo que permitiría la detección temprana de eventos geológicos potencialmente catastróficos.

En lo que respecta al monitoreo de riesgos geológicos y la comprensión de los mecanismos del subsuelo, asociados, las imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) y la técnica de Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) han demostrado ser herramientas eficaces para medir con precisión la deformación del suelo (Derauw *et al.*, 2020). Mediante observaciones con DInSAR, es posible obtener la distribución espacial y la evolución temporal de la deformación de la superficie.

Numerosas investigaciones a nivel global han estudiado la deformación del suelo relacionada con la extracción de hidrocarburos y la inyección de fluidos (Geertsma, 1973; Segall *et al.*, 1994; Fielding *et al.*, 1998). En particular, en la cuenca Neuquina, varios

autores han demostrado que la actividad hidrocarburífera influye significativamente en la ocurrencia de sismos y en el hundimiento de la superficie (Correa Otto *et al.*, 2018; Vásquez *et al.*, 2020; Tamburini Beliveau *et al.*, 2022). Por ejemplo, Correa Otto *et al.* (2018) y Vásquez *et al.* (2020) relacionan la reactivación de fallas, inducida por fracturamiento hidráulico, con la sismicidad registrada en la cuenca. Por su parte, Tamburini Beliveau *et al.* (2022) asocian los cambios en el terreno en la zona de Sauzal Bonito con el incremento de la producción no convencional de petróleo y gas.

## 1.1. Objetivo del trabajo

El objetivo principal de este Trabajo Final de Grado (TFG) fue realizar un análisis temporal de la deformación cortical en la región noreste de la localidad de Añelo, situada en la cuenca Neuquina, mediante el uso de la técnica de teledetección DInSAR. Este análisis se realizó bajo la hipótesis de que DInSAR es una herramienta eficaz para detectar y caracterizar deformaciones superficiales, y que dichas deformaciones podrían estar asociadas a la extracción de hidrocarburos y la inyección de fluidos. Se pretendió investigar y discutir la posible relación entre la deformación y las actividades de explotación hidrocarburífera, así como comprender cómo las áreas deformadas se relacionan con el estructuramiento regional de la cuenca.

Para llevar a cabo dicho análisis, se procesaron imágenes SAR SLC (*Single Look Complex*) de la misión Sentinel-1, proporcionadas por la Agencia Espacial Europea (ESA), abarcando el intervalo temporal mayo de 2017 - julio de 2024. El procesamiento de las imágenes SAR se realizó a través del servicio remoto HyP3 y OpenSARLab, ambos servicios desarrollados por ASF (Alaska Satellite Facility).

## 1.2. Ubicación del área de estudio

La zona de estudio se encuentra en el sector centro-este de la provincia del Neuquén, Argentina, aproximadamente a 12 km al noreste de la localidad de Añelo y a unos 100 km al noroeste de la ciudad de Neuquén (ver **Figura 1.2**).

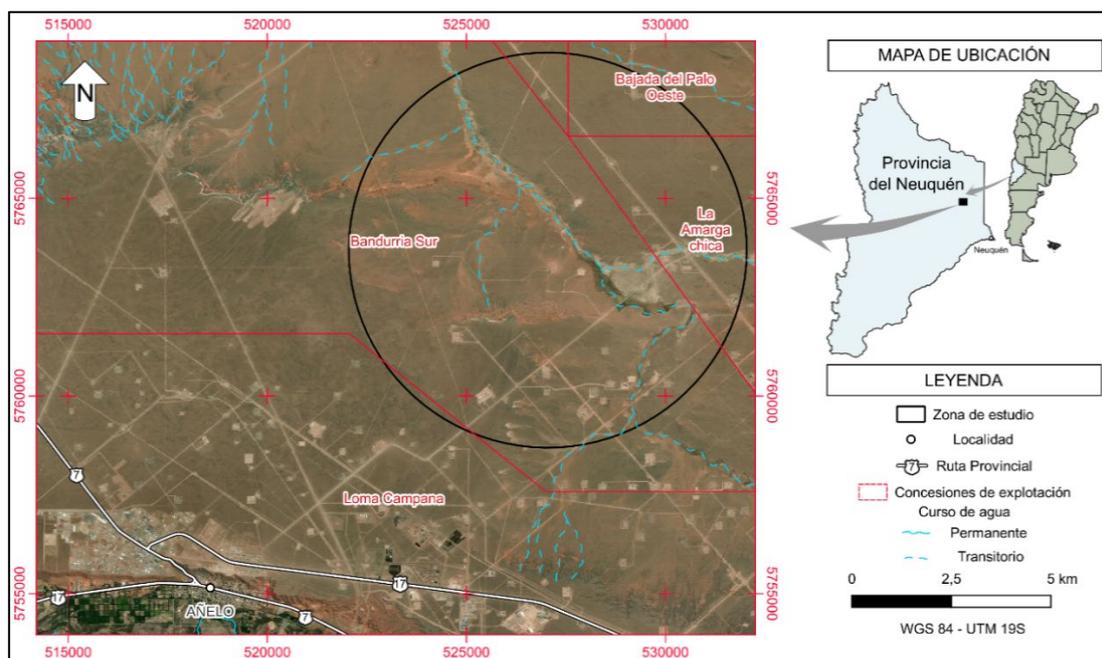


Figura 1.2. Mapa de ubicación de la zona de estudio.

El área de interés se delimitó mediante una circunferencia con un diámetro de 10 km, que abarca sectores correspondientes a las concesiones de explotación hidrocarburíferas Bandurria Sur, Baja del Palo Oeste y La Amarga Chica (**Figura 1.2**).

## 2. MARCO TEÓRICO

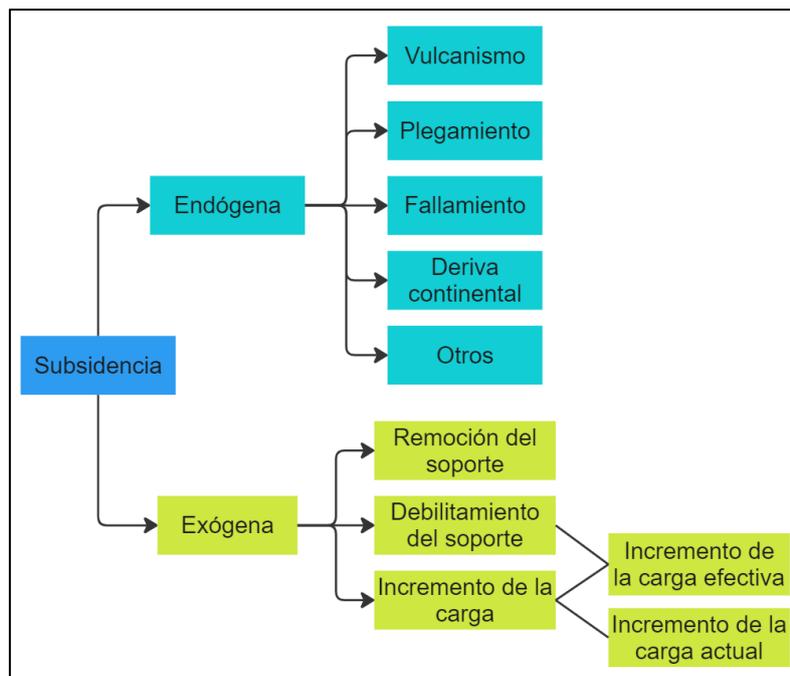
### 2.1. Subsistencia

#### 2.1.1. Definición de subsistencia

La Real Academia Española (2024) define subsistencia como el “hundimiento progresivo de la superficie del terreno como consecuencia de trabajos de minería, colapso de cavidades subterráneas, extracción de agua o de petróleo, o desecación”.

#### 2.1.2. Clasificación de subsistencia

Desde un punto de vista genético, Prokopovich (1986) clasifica la subsistencia en dos tipos: endógena y exógena (ver **Figura 2.1**). La subsistencia endógena hace referencia a los movimientos de la superficie terrestre asociados a procesos geológicos internos, tales como el plegamiento, el fallamiento, la actividad volcánica y la dinámica vinculada a la tectónica de placas, entre otros. En contraste, la subsistencia exógena se refiere a los procesos de deformación superficial relacionados con la compactación natural o antrópica del suelo.



**Figura 2.1.** Clasificación de subsistencia según su origen. Modificado de Prokopovich (1986).

Desde una perspectiva geodinámica, Allen y Allen (2013) identifican siete mecanismos responsables de subsistencia, los cuales se resumen en:

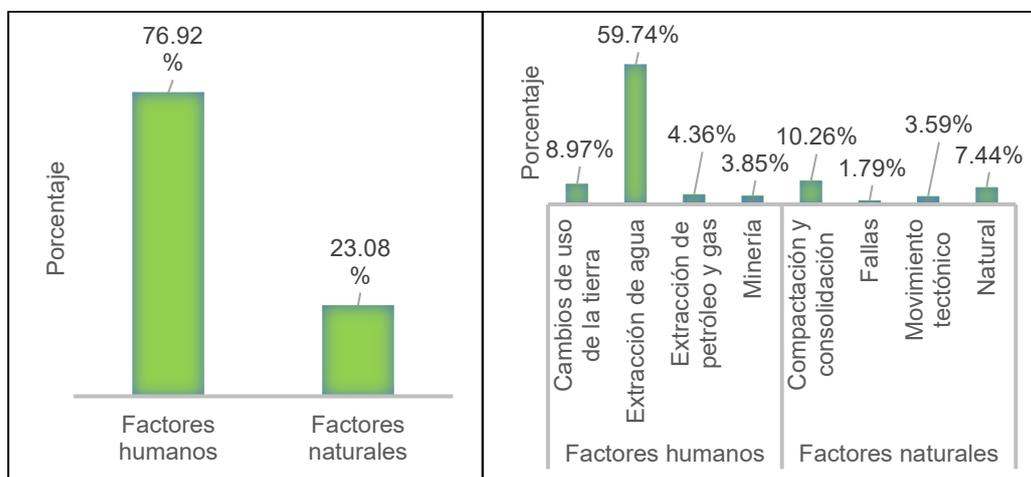
- Adelgazamiento cortical
- Engrosamiento litosférico
- Carga sedimentaria y volcánica
- Carga tectónica
- Carga subcortical
- Flujo mantélico
- Densificación cortical

En consecuencia, la subsidencia constituye un fenómeno geológico de gran importancia, que implica el hundimiento de la superficie terrestre por causas naturales o antrópicas, y representa un riesgo significativo para las construcciones asentadas sobre el terreno que se deforma (Tomas *et al.*, 2009).

### 2.1.3. Impacto de la extracción de fluidos

En particular la extracción de fluidos como agua, gas o petróleo desde el subsuelo puede provocar notables niveles de subsidencia, debido al cierre gradual de los espacios vacíos dejados por el fluido extraído (Tomás *et al.*, 2009). Este proceso ocurre debido a la caída de presión del reservorio durante la explotación, lo que provoca que el peso de las formaciones suprayacentes sea soportado cada vez más por la estructura granular de la roca (Fredrich *et al.*, 2000). Desde la Segunda Guerra Mundial, la acelerada extracción de estos recursos ha provocado un aumento en la frecuencia de los eventos de hundimiento del terreno (Figuroa Miranda *et al.*, 2018), con tasas de compactación que pueden variar entre unos pocos milímetros y varios metros por año.

La subsidencia del terreno es una preocupación que abarca diversos aspectos, incluyendo cuestiones socioeconómicas, ambientales y de seguridad, este fenómeno se clasifica como un peligro geológico mundial, tanto inducido por la actividad humana como por procesos naturales, y requiere una atención cuidadosa en numerosos países (Bagheri Gavkosh *et al.*, 2021). Según Bagheri Gavkosh *et al.* (2021), el 76,92% de los casos de subsidencia en importantes áreas metropolitanas son resultado de actividades humanas, mientras que el 23,08% restante se atribuye a factores naturales (**Figura 2.2**), la extracción de agua subterránea (59,74%) y de petróleo y gas (4,36%) representan un importante porcentaje de los factores que contribuyen a la subsidencia.



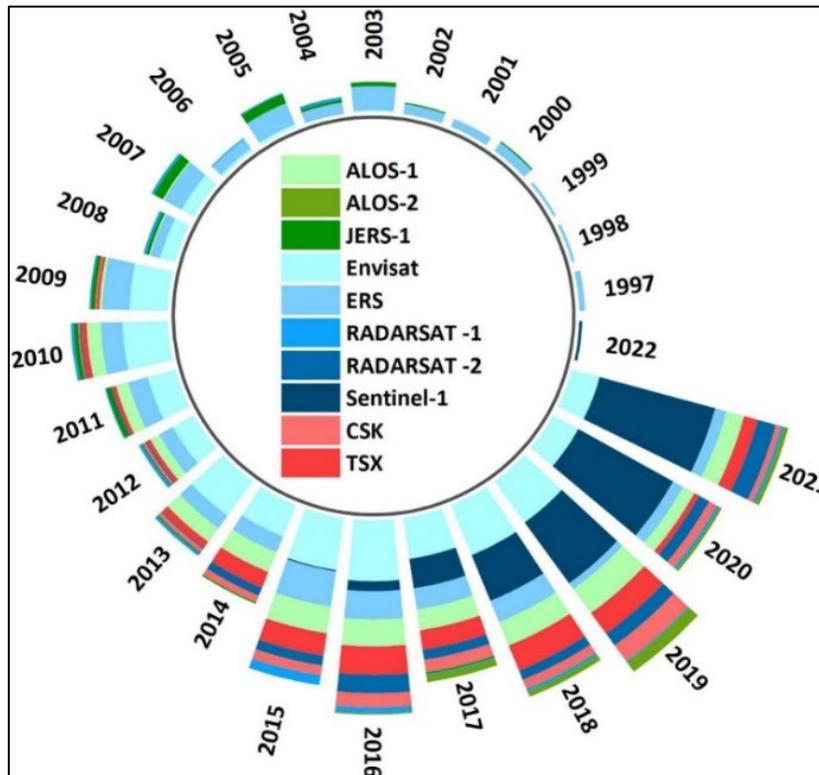
**Figura 2.2.** Porcentaje de factores que contribuyen a la subsidencia. Modificado de Bagheri Gavkosh *et al.* (2021).

## 2.2. Técnicas de detección de subsidencia

Históricamente, el monitoreo de la subsidencia del terreno se ha llevado a cabo mediante diversas tecnologías *in situ*, como la nivelación geométrica de alta precisión, extensómetros y redes GNSS o GPS, las cuales proporcionan mediciones precisas en puntos de referencia específicos (Raspini *et al.*, 2022). Estas técnicas requieren un trabajo de campo intensivo, son laboriosas y solo brindan mediciones puntuales con una cobertura espacial limitada. Durante los últimos años, las técnicas de Interferometría de

Radars de Apertura Sintética (InSAR) por satélite se han convertido en un método eficaz de observación de la Tierra para detectar y monitorear desplazamientos terrestres de movimiento lento (Raspini *et al.*, 2022).

Raspini *et al.* (2022) destacan que la mayoría de los análisis de subsidencia relacionados con InSAR emplean de manera masiva imágenes de banda C, seguidas por las de banda X y con menos frecuencia de banda L (Figura 2.3 y Figura 2.4).



**Figura 2.3.** Utilización de plataformas satelitales desde 1997 hasta enero de 2022 para el análisis de subsidencia. Tomado de Raspini *et al.* (2022).

	1991	1991	1996	2001	2006	2011	2016	2021	2025	Revisita (días)	Resolución (metros)
ERS-1/2	[Barra]								[Icono]	35	28
RADARSAT-1	[Barra]								[Icono]	24	9
Envisat	[Barra]								[Icono]	35	28
ALOS-1	[Barra]								[Icono]	46	10
TerraSAR-X	[Barra]									11	0.3
COSMO-SkyMed	[Barra]									16 (1)	0.5
RADARSAT-2	[Barra]									24	1.6
RISAT-1	[Barra]									25	1
Kompsat-5	[Barra]									28	1
Sentinel-1A/B	[Barra]									12 (6)	5
ALOS -2	[Barra]									14	1
PAZ+TerraSAR-X	[Barra]									11 (4)	1
SAOCOM-1A/B	[Barra]									16 (8)	3
ICEYE	[Barra]									<1	0.4
RADARSAT Constellation Mission (RCM)	[Barra]									12 (4)	1
COSMO-SkyMed Second Generation (CSG)	[Barra]									16 (8)	0.5
Capella	[Barra]									<1	0.3
StriX	[Barra]									1	1

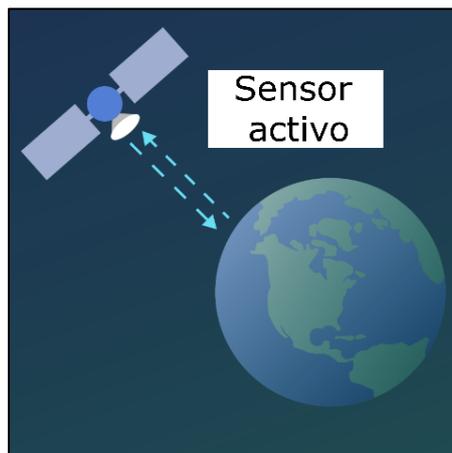
**Figura 2.4.** Cronología de las principales misiones SAR, pasadas y actuales entre 1991 y 2024, junto con sus principales características.

Durante años, la aplicación del análisis de series temporales SAR al monitoreo de desplazamientos del terreno se vio limitada por diversos factores, entre ellos, el acceso restringido a los datos, su elevado costo y la baja frecuencia de adquisición (Derauw *et al.*, 2020) (**Figura 2.4**). Sin embargo, las imágenes de banda C de los satélites Sentinel-1 de la ESA, han cambiado radicalmente esta situación ya que son una excelente opción para el monitoreo de desplazamientos del terreno, gracias a su acceso libre, cobertura global y corto ciclo de repetición (Derauw *et al.*, 2020; Raspini *et al.*, 2022) (**Figura 2.3**). Dependiendo del área geográfica, se obtienen imágenes SAR cada 24, 12 o 6 días, lo que facilita la construcción de series temporales largas y sistemáticas (Derauw *et al.*, 2020).

## 2.3. Introducción al radar de apertura sintética (SAR)

### 2.3.1. Sensores activos

Los sensores activos generan su propia fuente de energía para iluminar los objetos observados, emitiendo radiación en dirección al objetivo ([NASA Earthdata](#), s.f.-a) (**Figura 2.5**). Este tipo de sensores transmiten pulsos de radiación electromagnética que iluminan el área de interés y captan los ecos resultantes conocidos como retrodispersión. Este proceso se genera a partir de la interacción del pulso emitido con los diferentes objetos y características presentes en la superficie terrestre. Las señales transmitidas por el sensor pueden ser reflejadas, refractadas o dispersadas debido a la interacción tanto con la superficie de la Tierra como con su atmósfera.



**Figura 2.5.** Ilustración de sensor activo. Recuperado y traducido de [NASA Earthdata](#) (s.f.-a).

Entre los principales tipos de sensores activos se destacan el altímetro láser, el LIDAR (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación), el radar, el dispersómetro y la sonda ([NASA Earthdata](#), s.f.-a). Un ejemplo de este tipo de sensor es el radar de apertura sintética o SAR por sus siglas en inglés, utilizado en las misiones SAOCOM y Sentinel-1.

### 2.3.2. Radar de apertura sintética (SAR)

Los sensores SAR emiten señales que operan en el orden de las microondas dentro del espectro electromagnético, lo que les da capacidad de penetrar la atmósfera en la mayoría de condiciones ([NASA Earthdata](#), s.f.-b) (**Figura 2.6**). La mayoría de los sistemas SAR de detección remota operan especialmente en la banda X (~3 cm), la banda C (~6 cm) y la banda L (~23 cm) (Meyer, 2019) (ver **Tabla 2.1**).

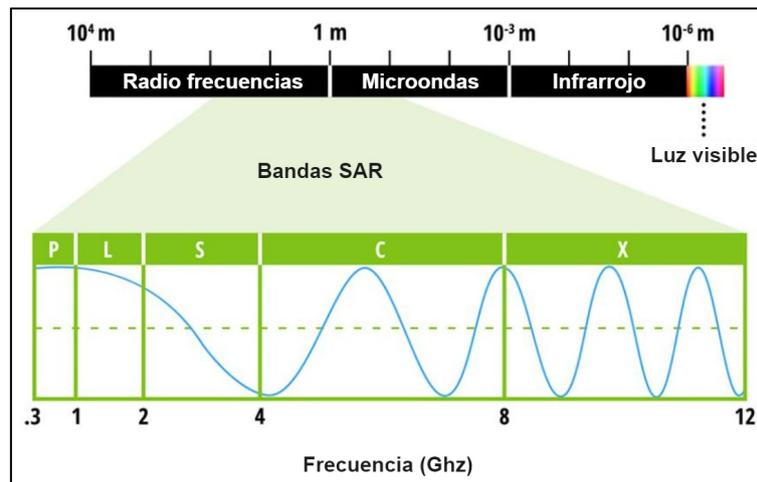


Figura 2.6. Espectro electromagnético con bandas de microondas. Recuperado y traducido de [NASA EarthData](#) (s.f.-b).

Banda	Longitud de onda (cm)	Frecuencia (GHz)
X	3.8 - 2.4	8 - 12
C	7.5 - 3.8	4 - 8
S	15 - 7.5	2 - 4
L	30 - 15	1 - 2
P	100 - 30	0.3 - 1

Tabla 2.1. Longitudes de onda y frecuencias de las bandas utilizadas en sistemas SAR. Modificado de Meyer (2019).

**Polarización**

La polarización se refiere a la dirección de propagación de una onda electromagnética. Una onda horizontal (H) se transmite de manera que oscila en un plano paralelo a la superficie de la imagen, mientras que una onda vertical (V) oscila en un plano perpendicular a la superficie de la imagen. Existen cuatro combinaciones de polarización diferentes que suelen utilizar los sensores SAR: VV, VH, HV y HH, la primera letra indica la polarización utilizada para transmitir la señal y la segunda letra indica la polarización del retorno medido (Meyer, 2019) (Figura 2.7).

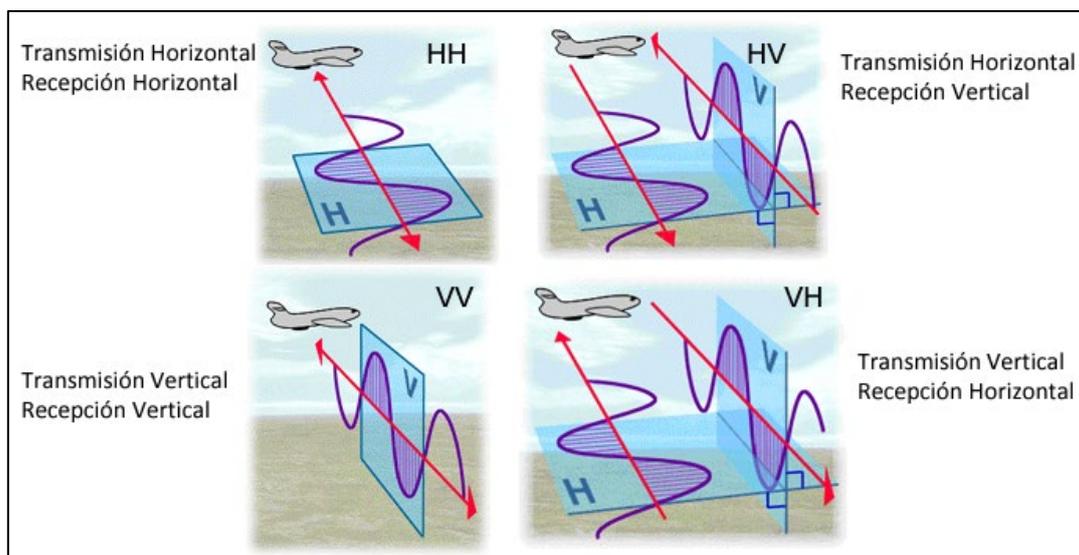


Figura 2.7. Combinaciones de polarización de señales SAR. Modificado de Meyer et al. (2021).

## Imagen SAR

Una imagen SAR es un mapa de reflectividad que indica la cantidad de energía retrodispersada hacia el sensor, la cual está determinada tanto por la geometría del objetivo como por su conductividad eléctrica (Nemiña y Zajc, 2022). Las áreas oscuras en la imagen corresponden a zonas de baja reflectividad, mientras que las áreas brillantes representan zonas de alta reflectividad (Nemiña y Zajc, 2022). En la mayoría de los casos, la superficie terrestre iluminada por el transmisor SAR no es homogénea, sino que está compuesta por una diversidad de dispersores individuales que interactúan entre sí, fortaleciendo o debilitando la señal de retorno (Meyer, 2019). Esta interacción produce un patrón granular, conocido comúnmente como "sal y pimienta", característico de las imágenes SAR.

## Retrodispersión

Muchos factores influyen en la retrodispersión que recibe el sensor SAR. La longitud de onda que utiliza el SAR influye en la penetración de la señal y, por lo tanto, en lo que está captando la imagen. La rugosidad de la superficie modulará los retornos de retrodispersión desde cero hasta un retorno fuerte, disminuyendo o aumentando el brillo del pixel resultante. Los mecanismos de dispersión, como la dispersión de volumen o el doble rebote también puede influir considerablemente en el brillo de la imagen SAR, lo que a veces da como resultado una saturación total de la señal recibida ([Alaska Satellite Facility](#), s.f.-a). En particular, en la cuenca Neuquina, donde la región presenta escasa y dispersa vegetación, el InSAR de banda C puede mantener la coherencia durante meses o incluso años.

## *Longitud de onda*

La longitud de onda de los sensores SAR influye significativamente en el grado de penetración en el suelo ([Alaska Satellite Facility](#), s.f.-a), como se esquematiza en la **Figura 2.8**. Las señales de radar penetran más profundamente en el terreno a medida que aumenta la longitud de onda del sensor, lo que se traduce en una mayor penetración para la banda L en comparación con las bandas C o X (Meyer, 2019). La banda X, que presenta la menor capacidad de penetración, tiende a dispersarse principalmente desde la parte superior de las áreas cubiertas por vegetación. En contraste, las bandas C y L muestran una mayor penetración en la vegetación (Meyer, 2019). Las tres bandas pueden penetrar el suelo seco y hielo, aunque tanto la banda C como la banda L proporcionan retornos más intensos. En general, la banda L es la que ofrece la mayor penetración ([Alaska Satellite Facility](#), s.f.-a).

## *Rugosidad de la superficie*

La intensidad de la retrodispersión aumenta conforme lo hace la rugosidad de la superficie, de modo que las superficies rugosas generan un mayor retorno hacia el sensor en comparación con las superficies intermedias o lisas (Meyer, 2019). Si la altura de la rugosidad de la superficie es mayor que la mitad de la longitud de onda utilizada, los ecos se dispersan en todas las direcciones, lo que produce un retorno fuerte hacia el sensor, como se ilustra con las flechas azules en la **Figura 2.9**. En consecuencia, una superficie aparece progresivamente más oscura a medida que aumenta la longitud de onda (Meyer, 2019).

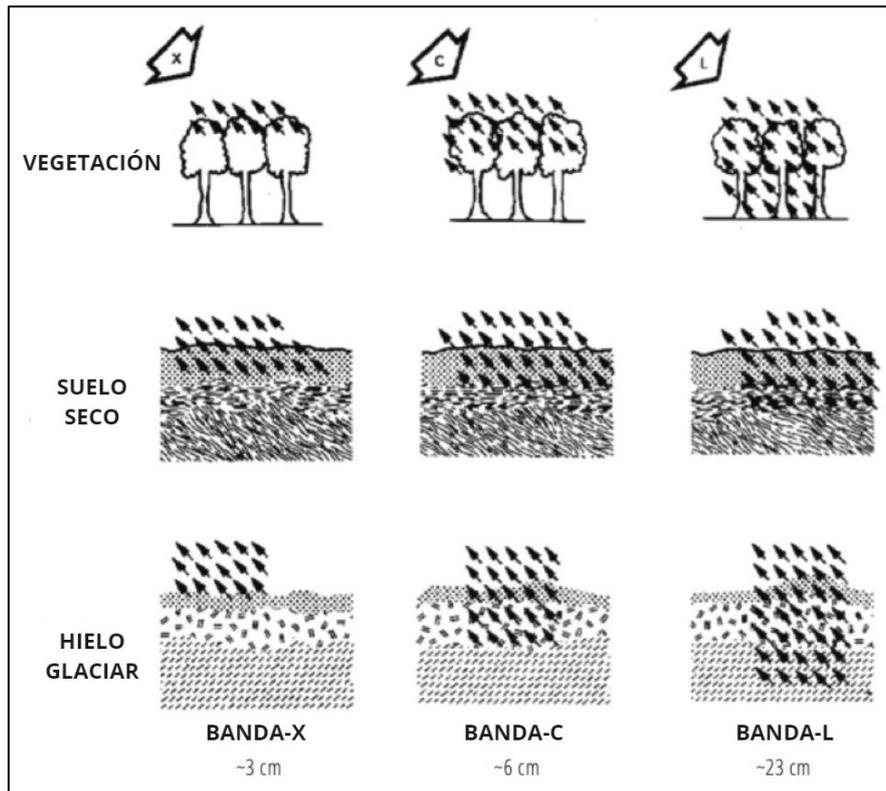


Figura 2.8. Penetración de la señal SAR según la longitud de onda del sensor. Traducido de Meyer (2019).

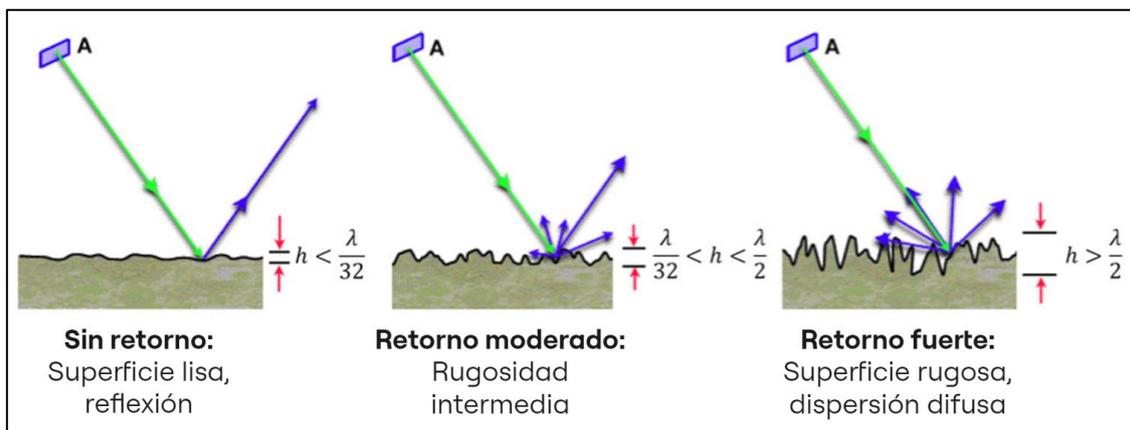
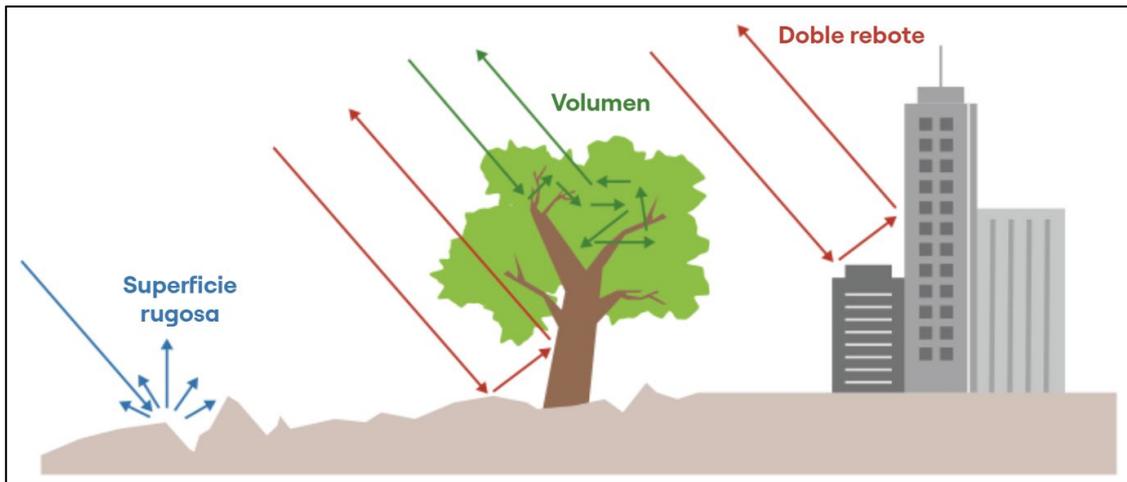


Figura 2.9. Esquema de la dependencia de la rugosidad de la superficie con respecto a la longitud de onda del sensor: suave, moderada y rugosa. Traducido de Meyer (2019).

**Mecanismos de dispersión**

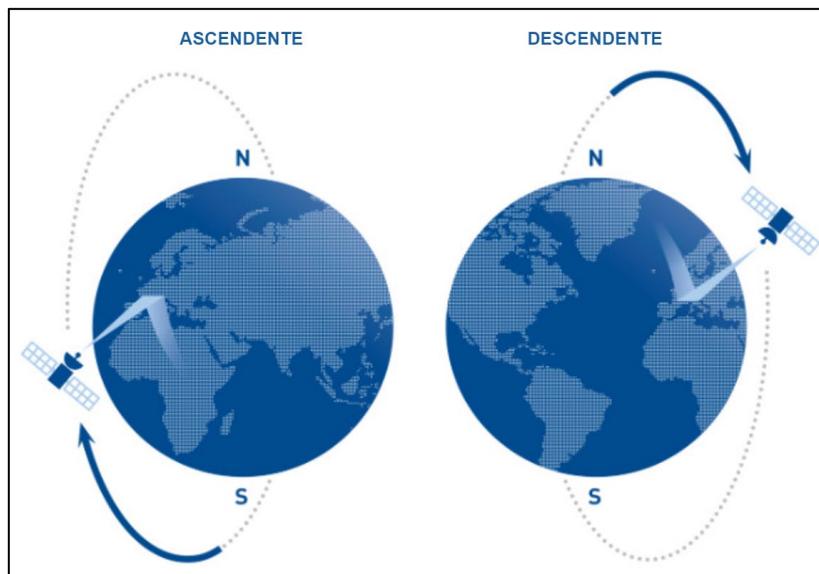
Una escena natural puede describirse como una combinación de tres tipos de dispersores, de superficie rugosa, de doble rebote y de volumen (Meyer, 2019) (Figura 2.10). Los dispersores de superficie están compuestos por campos de vegetación baja y suelos desnudos, así como carreteras y otras superficies pavimentadas (Meyer, 2019). Los dispersores de doble rebote se produce en zonas urbanas, incluye edificios, tronco de árboles, postes de luz y otras estructuras verticales que desvían una primera reflexión de vuelta al sensor (Meyer, 2019), lo que provoca una retrodispersión muy fuerte (Alaska Satellite Facility, s.f.-a). Las copas de los árboles pertenecen a la categoría de dispersores de volumen, las señales rebotan a medida que se propagan a través de la estructura de la vegetación (Meyer, 2019).



**Figura 2.10.** Esquema de los tres tipos principales de dispersión considerados para datos SAR. Traducido de Meyer (2019).

### Geometría de adquisición

La geometría de adquisición de los satélites SAR se caracteriza por dos direcciones de vuelo u órbitas: ascendente y descendente (**Figura 2.11**). En la configuración ascendente, el satélite adquiere imágenes mientras se desplaza desde el polo sur hacia el polo norte, con el sensor orientado hacia el este. En contraste, en la configuración descendente, la captura de imágenes ocurre cuando el satélite se traslada desde el polo norte hacia el polo sur, con el sensor dirigido hacia el oeste.



**Figura 2.11.** Geometría de adquisición de datos SAR. Recuperado y traducido de [TREE ALTAMIRA](#) (s.f.).

### Distorsiones geométricas

La naturaleza de observación lateral de los sistemas SAR conlleva una serie de distorsiones geométricas inherentes a los datos adquiridos ([Alaska Satellite Facility](#), s.f.-a). Estas distorsiones se acentúan en terrenos con relieve pronunciado, donde fenómenos como el escorzo, la inversión por relieve y la sombra son particularmente evidentes (Meyer, 2019). La **Figura 2.12** ilustra de manera esquemática los orígenes y principales características de estas distorsiones.

**Escorzo**

En el caso del escorzo la retrodispersión del lado frontal de la montaña se comprime y los retornos de una zona amplia llegan al sensor aproximadamente al mismo tiempo. Esto hace que la pendiente frontal se muestre como una banda estrecha y brillante ([Alaska Satellite Facility](#), s.f.-a).

**Inversión de relieve**

Cuando se produce una inversión por relieve, los datos de retorno de la pendiente frontal (y posiblemente incluso de una parte del área antes del inicio de la pendiente) se reciben al mismo tiempo que los del dato de retorno de la menor pendiente posterior. Por lo tanto, el área en la parte frontal de la pendiente se proyecta en el lado posterior en la imagen de rango inclinado. En este caso, los datos de la pendiente frontal no se pueden extraer de los datos de retorno ([Alaska Satellite Facility](#), s.f.-a).

**Sombra**

La sombra del radar provoca falta de datos, en este caso, el ángulo de la pendiente posterior es tal que el sensor no puede captar ninguna imagen de ella. Estas áreas con pendientes posteriores pronunciadas no ofrecen información al sensor SAR ([Alaska Satellite Facility](#), s.f.-a).

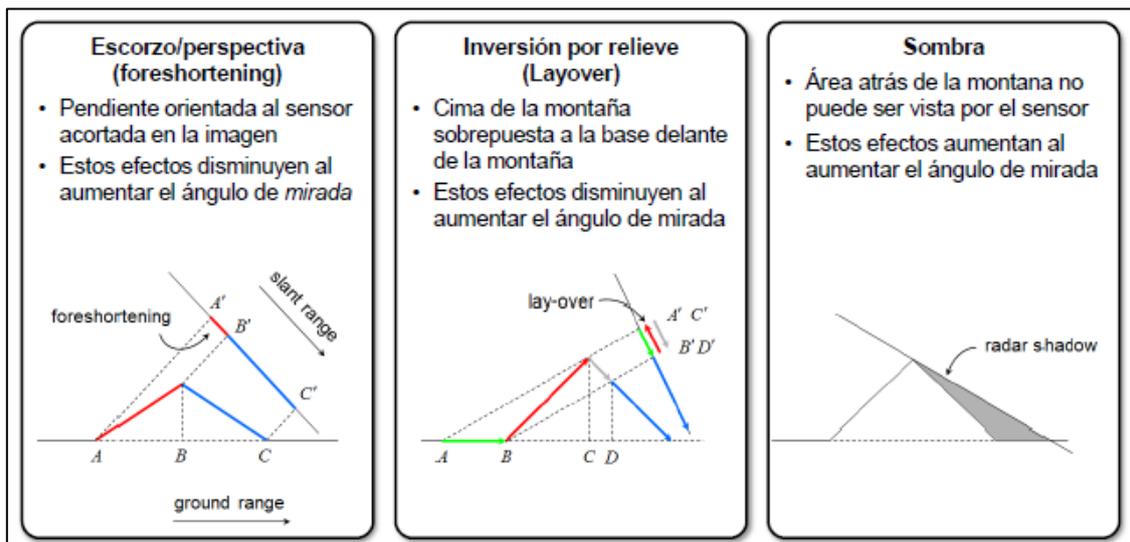
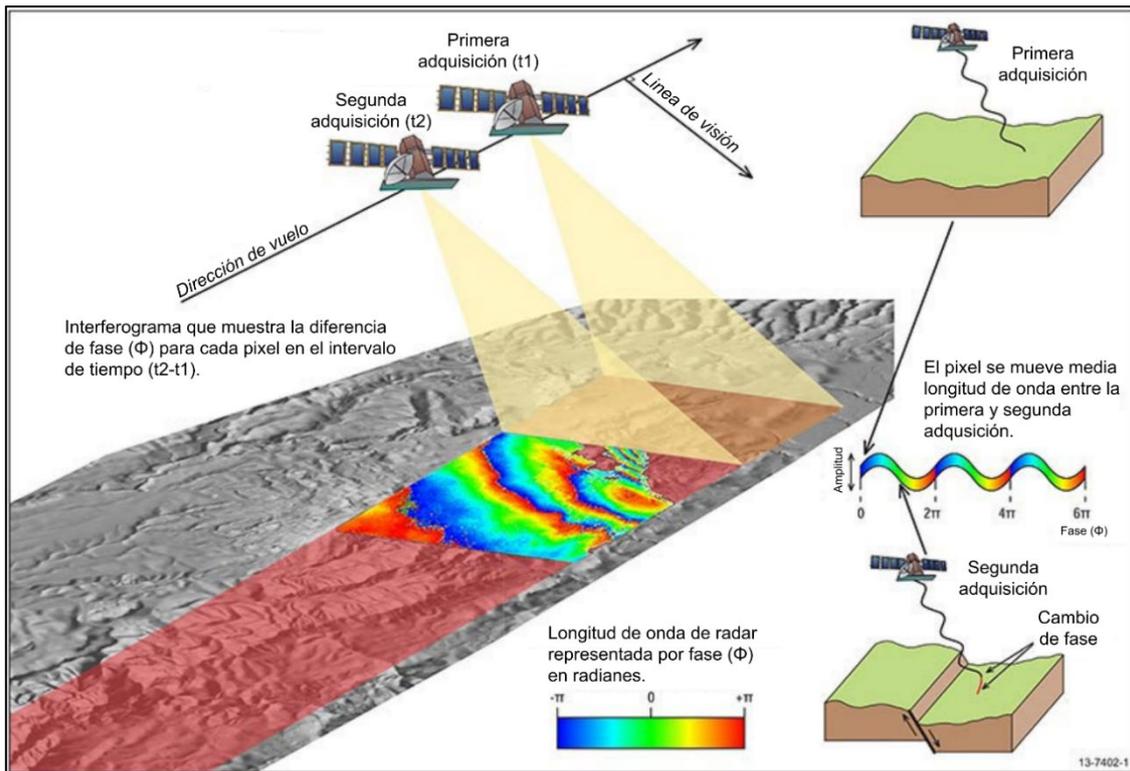


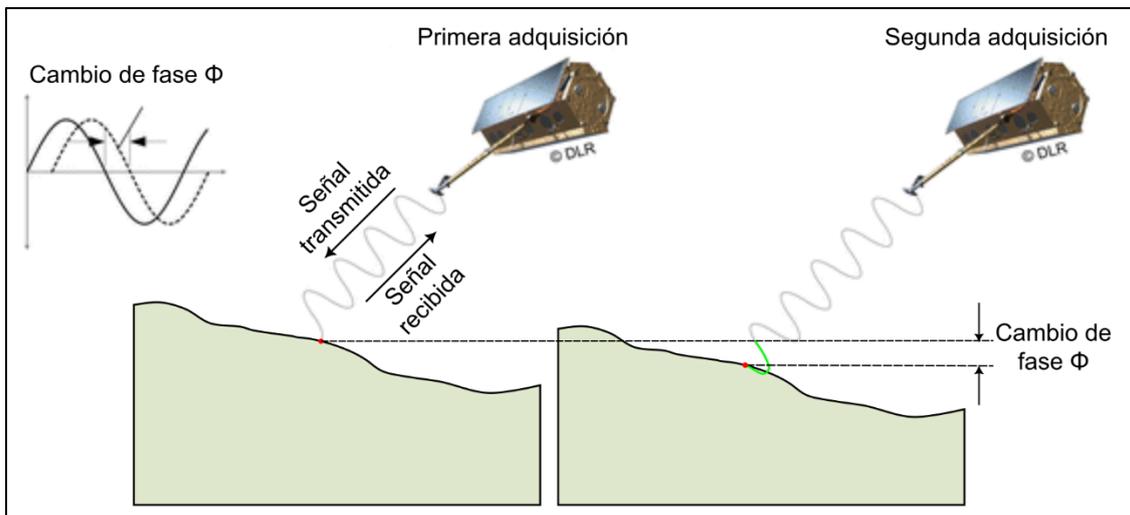
Figura 2.12. Distorsiones debido a la observación lateral de sensor SAR. Tomado de Meyer *et al.* (2021).

**2.4. Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR)**

InSAR es una técnica bien establecida para la generación de modelos digitales de elevación (DEM) y la medición de deformación del terreno (Massonnet y Feigl, 1998). El principio básico de InSAR consiste en la comparación de dos fases de radar obtenidas a partir de dos imágenes adquiridas sobre una misma región u objeto sobre la superficie terrestre (Schindler *et al.*, 2016) (Figura 2.13 y Figura 2.14). En un interferograma, las diferencias de fase se representan mediante franjas, donde la fase de la señal toma valores en el intervalo  $-\pi$  y  $\pi$ . Así, cada franja en el interferograma corresponde a un cambio de fase equivalente a  $2\pi$  radianes (Figura 2.13).



**Figura 2.13.** Diagrama esquemático de un interferograma de fase enrollada, donde se ven las franjas de colores con ciclos de  $2\pi$ . Recuperado y traducido de [Geoscience Australia](#) (2017).



**Figura 2.14.** Principio del SAR interferométrico en el monitoreo de desplazamientos. El desplazamiento ilustrado deriva del desfase de dos adquisiciones. Modificado de Schindler *et al.* (2016).

### 2.4.1. Decorrelación interferométrica

La decorrelación espacial y temporal de las señales representa uno de los factores más limitantes en la interferometría radar, ya que impiden la obtención de mediciones precisas y, en consecuencia, dificulta la estimación confiable de los desplazamientos (Derauw *et al.*, 2020).

#### Decorrelación temporal

La decorrelación temporal se refiere a las variaciones en el comportamiento de retrodispersión de los objetivos terrestres a lo largo del tiempo. Esta solo se puede

abordar mediante la reducción del intervalo temporal entre las adquisiciones SAR, de modo que se minimicen los cambios en las escenas observadas (Derauw *et al.*, 2020).

### Decorrelación espacial

La decorrelación espacial está directamente relacionada con la línea base perpendicular, es decir, la distancia perpendicular entre la posición del sensor y el momento de adquisición correspondiente (véase la **Figura 2.15**). El aumento de la línea base perpendicular cambia el ángulo bajo el cual se observa un determinado elemento de la escena. Como consecuencia, aunque las características físicas de los dispersores permanezcan inalteradas, sus respuestas relativas, expresadas en términos de diferencia en la trayectoria óptica varían. La línea base perpendicular más grande por debajo de la cual se observa la correlación depende de varios factores, incluyendo la longitud de onda del SAR, la distancia entre el satélite y la superficie terrestre, así como el ángulo de incidencia local (Derauw *et al.*, 2020). Típicamente, para la banda C, en el caso de una distribución uniforme de dispersores en áreas planas, la línea base perpendicular debe permanecer por debajo de unas decenas a algunos cientos de metros (Zebker y Villasenor, 1992).

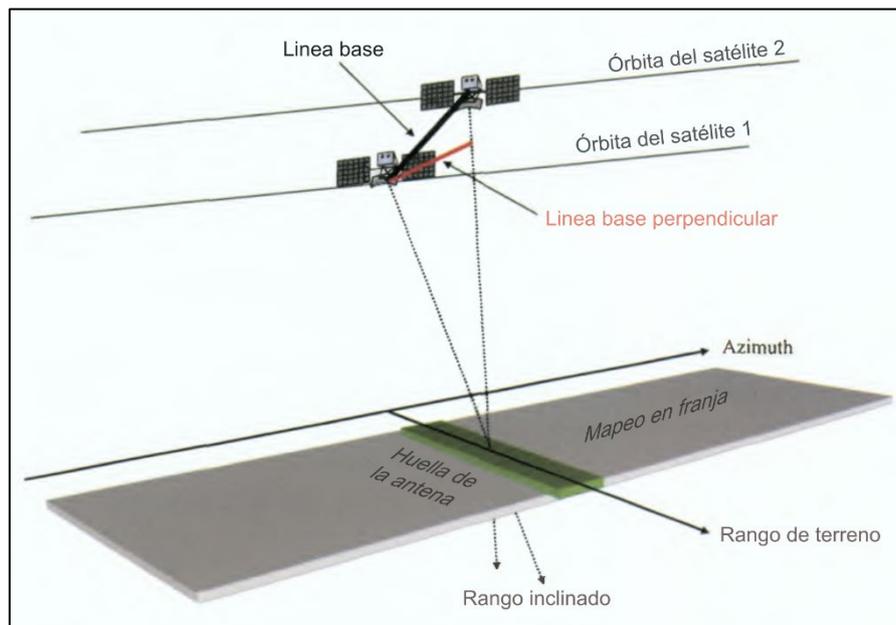


Figura 2.15. Geometría de un sistema SAR interferométrico satelital. Traducido de Ferretti *et al.* (2007).

### 2.4.2. Coherencia

El impacto de la decorrelación se evalúa mediante la estimación de la coherencia, la cual representa la capacidad de dos frentes de onda para permanecer espacial y/o temporalmente en fase. Esta es una condición obligatoria para obtener un patrón interferométrico interpretable y, por ende, realizar una estimación válida del desplazamiento. La coherencia, por tanto, constituye el primer indicador de calidad en cualquier medición interferométrica. La selección adecuada de una combinación de líneas base espaciales cortas y tiempos de revisita breves optimiza las posibilidades de obtener una mayor coherencia. No obstante, en ciertos casos, las líneas base temporales más largas pueden resultar útiles (Derauw *et al.*, 2020). La elección de cada par interferométrico adecuado, que cumpla con los requisitos óptimos de las líneas base

espaciales y temporales, es fundamental para generar una serie temporal de estimaciones de desplazamiento en un intervalo de tiempo dado. Esta estrategia es la base de la técnica de Subconjunto Pequeño de Línea Base (SBAS) (Benardino *et al.*, 2002). SBAS ha demostrado ser una metodología eficiente y confiable para la obtención de series temporales de desplazamiento a lo largo de la Línea de Visión de Observación (LOS) (Derauw *et al.*, 2020 y referencias allí citadas).

### 2.4.3. Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR)

La técnica DInSAR aprovecha la diferencia en la medición de fase entre dos imágenes SAR adquiridas en fechas distintas para inferir el componente de desplazamiento a lo largo de la LOS que ocurre en ese lapso de tiempo (Massonnet *et al.*, 1993), bajo la suposición de que el dispersor permanece inalterado a lo largo del tiempo.

En términos generales, la diferencia de fase entre dos imágenes estará determinada por la combinación de diversos factores, de manera que puede expresarse, según Richards (2009), de la siguiente forma:

$$\Delta\phi_{int} = \Delta\phi_{topo} + \Delta\phi_{desp} + \Delta\phi_{atm} + \Delta\phi_{ruido} + \Delta\phi_{error}$$

Donde:

$\Delta\phi_{topo}$  representa la fase interferométrica asociada a la topografía.

$\Delta\phi_{desp}$  es la fase generada por el desplazamiento.

$\Delta\phi_{atm}$  corresponde a la diferencia de fase causada por variaciones en la atmósfera.

$\Delta\phi_{pixel}$  surge de los cambios en la reflectividad del píxel observado.

$\Delta\phi_{ruido}$  es el ruido de fase proveniente del sistema de radar.

$\Delta\phi_{error}$  se refiere a los errores derivados de la incertidumbre en la localización de la plataforma y de la línea base.

La fase topográfica no es relevante para el mapeo de desplazamiento, por lo tanto, es necesario eliminar cualquier contribución topográfica del interferograma original (Rosen *et al.*, 2000). El procedimiento más común para lograrlo es mediante la utilización de un DEM (Rosen *et al.*, 2000), que permite calcular la componente de fase generada por la topografía  $\Delta\phi_{topo}$  y restarla de la fase interferométrica total  $\Delta\phi_{int}$ , obteniéndose así la fase interferométrica diferencial  $\Delta\phi_{DInSAR}$  (Arbiol *et al.*, 2001). Esta técnica, que determina la diferencia entre la fase interferométrica  $\Delta\phi_{int}$  y la fase debida a la topografía del terreno, se conoce como interferometría diferencial, y se expresa de la siguiente manera:

$$\Delta\phi_{DInSAR} = \Delta\phi_{int} - \Delta\phi_{topo}$$

$$\Delta\phi_{DInSAR} = \Delta\phi_{desp} + \Delta\phi_{atm} + \Delta\phi_{res\_topo} + \Delta\phi_{ruido} + \Delta\phi_{error}$$

Donde:

$\Delta\phi_{res\_topo}$  representa la componente de fase residual debida a errores en el DEM utilizado.

Si  $\Delta\phi_{atm}$  y  $\Delta\phi_{res\_topo}$  son despreciables, y el ruido de fase es significativamente menor que la componente de fase debida al movimiento del terreno ( $\Delta\phi_{ruido} \ll \Delta\phi_{desp}$ ), entonces es

posible derivar información sobre los desplazamientos del terreno a partir de  $\Delta\Phi_{desp}$  (Arbiol *et al.*, 2001). No obstante, este enfoque omite la componente atmosférica, que, al igual que el ruido de la señal y los errores asociados a la incertidumbre, puede tener una gran influencia en algunos casos.

#### **2.4.4. Aplicaciones y limitaciones**

Gracias a la alta precisión en la medición de desplazamientos y su aplicabilidad en áreas remotas, la técnica DInSAR tiene una gran utilidad en geociencias. Entre sus diversas aplicaciones, se incluyen la medición de deformaciones del terreno causadas por movimientos tectónicos y sísmicos, subsidencia del suelo, deslizamiento de tierra, monitoreo de glaciares y de volcanes, entre otras.

DInSAR es una herramienta capaz de proporcionar estimaciones de desplazamiento con una precisión milimétrica. Sin embargo, algunas limitaciones pueden dificultar su aplicación, principalmente debido a condiciones del entorno natural (Derauw *et al.*, 2020). Una de las principales dificultades es la decorrelación temporal, que ocurre cuando existen cambios físicos significativos en la superficie entre las imágenes SAR adquiridas en diferentes momentos, especialmente en áreas con variaciones importantes en la vegetación. La decorrelación geométrica es otra limitación relevante, derivada de diferencias en la geometría de visión entre dos adquisiciones, especialmente en áreas montañosas y con alta variabilidad topográfica. Además, las variaciones en la troposfera y la ionosfera pueden introducir errores en las mediciones, afectando la precisión en la detección de desplazamientos. Estos efectos atmosféricos, a su vez, pueden ser difíciles de corregir.

Debido a las limitaciones geométricas necesarias para preservar la coherencia, DInSAR solo puede llevarse a cabo con imágenes SAR adquiridas en un mismo modo (misma familia de sensores y misma geometría de visualización) (Derauw *et al.*, 2020).

## **2.5. Plataforma Sentinel**

### **2.5.1. Copernicus**

El programa de observación de la Tierra Copernicus iniciativa conjunta de la Comisión Europea (CE) y la ESA, proporciona información para mejorar la gestión del medio ambiente, comprender y mitigar efectos del cambio climático y garantizar la seguridad civil. Para satisfacer las necesidades operativas del programa Copernicus, la ESA, desarrolló la familia de satélites Sentinel, que cubre una amplia gama de aplicaciones ([Copernicus](#), s.f.).

### **2.5.2. Misión Sentinel-1**

La misión Sentinel-1 está conformada por la constelación de dos satélites heliosincrónicos en órbita polar que comparten el mismo plano orbital con una diferencia de fase orbital de  $180^\circ$ , que operan de día y noche, tomando imágenes con Radar de Apertura Sintética de Banda C (C-SAR), lo que le permite adquirir imágenes independientemente de las condiciones meteorológicas. Para cada observación, se dispone de mediciones precisas de la posición y actitud de la nave espacial ([Copernicus](#), s.f.).

Entre los principales objetivos y aplicación de la misión Sentinel-1 se hallan:

- Monitoreo de tierras
- Mapeo de la deformación urbana
- Monitoreo del hielo
- Monitoreo de buques
- Monitoreo de la contaminación por petróleo
- Análisis de olas y vientos marinos
- Monitoreo de inundaciones
- Análisis de terremotos
- Monitoreos de deslizamientos de tierra y volcanes

Los satélites de la misión Sentinel-1, 1A y 1B fueron lanzados el 3 de abril de 2014 y el 25 de abril de 2016 respectivamente. Con la finalización de la misión del satélite Sentinel-1B el 23 de diciembre de 2021, está previsto que Sentinel-1C se una a Sentinel-1A en órbita para restablecer la constelación Sentinel-1 ([Copernicus](#), s.f.).

### 2.5.3. Sentinel-1

Los satélites Sentinel-1 han sido diseñados por un consorcio industrial liderado por Thales Alenia Space Italia, con Astrium Alemania a cargo de la carga útil C-SAR y Astrium Reino Unido responsable del subsistema de electrónica de radar ([Copernicus](#), s.f.).



Figura 2.16. Representación del satélite Sentinel-1. Recuperado de [ESA](#) (2014).

Es un satélite estabilizado en tres ejes (cabeceo, guiñada y balanceo) y cuenta con avanzados sistemas de sensores solares, estelares, giroscópicos y de campo magnético, junto con un sistema de control de órbita y actitud compuesto por cuatro ruedas de reacción y tres barras de torsión. El sistema de energía del satélite está compuesto por dos alas de paneles solares capaces de generar 5.900 W al final de su vida útil, almacenando energía en una batería modular de 324 Ah ([Copernicus](#), s.f.).

El satélite se basa en el bus PRIMA (Piattaforma Italiana Multi Applicativa), similar al utilizado en las misiones RADARSAT-2 y COSMO-SKYMED, proporcionando un alto grado de precisión en el apuntamiento (aproximadamente  $0,01^\circ$ ), junto con un sistema de propulsión para mantener una órbita de referencia con un control preciso dentro de un tubo orbital de 120 m de diámetro durante el funcionamiento normal ([Copernicus](#), s.f.).

La plataforma satelital incluye diversas funcionalidades, como la gestión de sistemas de control de actitud y órbita, manejo de datos científicos con una capacidad de almacenamiento de hasta 1.410 Gb, y un sistema de propulsión y control térmico ([Copernicus](#), s.f.). También está equipado con sistemas de comunicación en banda X y ópticos (EDRS) para la transmisión de datos a 520 Mbit/s, y enlaces en banda S para telemetría y comandos.

El peso total del satélite en el lanzamiento es de aproximadamente 2.300 kg, de los cuales 130 kg corresponden al combustible ([Copernicus](#), s.f.).

#### 2.5.4. Instrumento SAR

El C-SAR es un sofisticado instrumento a bordo de los satélites Sentinel-1, desarrollado por la empresa EADS Astrium GmbH. Se caracteriza por ser una antena de matriz en fase activa que proporciona escaneos rápidos tanto en elevación como en acimut. Una de sus principales características es su capacidad de doble polarización, lo que mejora la calidad y cantidad de datos obtenidos. Además, el sistema cuenta con un esquema de calibración interna que facilita el monitoreo de la amplitud y fase de las señales transmitidas, mejorando la estabilidad radiométrica general del instrumento ([Copernicus](#), s.f.).

Para más información sobre el instrumento C-SAR, se puede consultar el trabajo de Torres *et al.*, (2012), donde se detallan aspectos técnicos y operativos del radar utilizado en la misión Sentinel-1.

#### 2.5.5. Modos de adquisición

Los satélites Sentinel-1 operan en cuatro modos de adquisición (véase la **Figura 2.17**) ([Copernicus](#), s.f.).

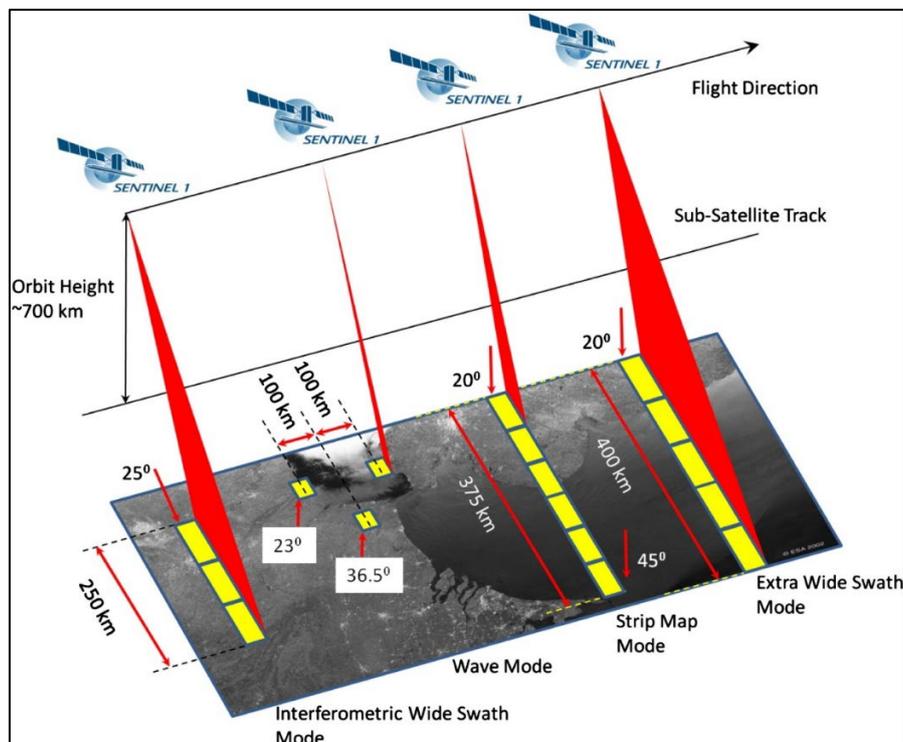


Figura 2.17. Modos de adquisición de imágenes radar de Sentinel-1. Tomado de Torres *et al.* (2012).

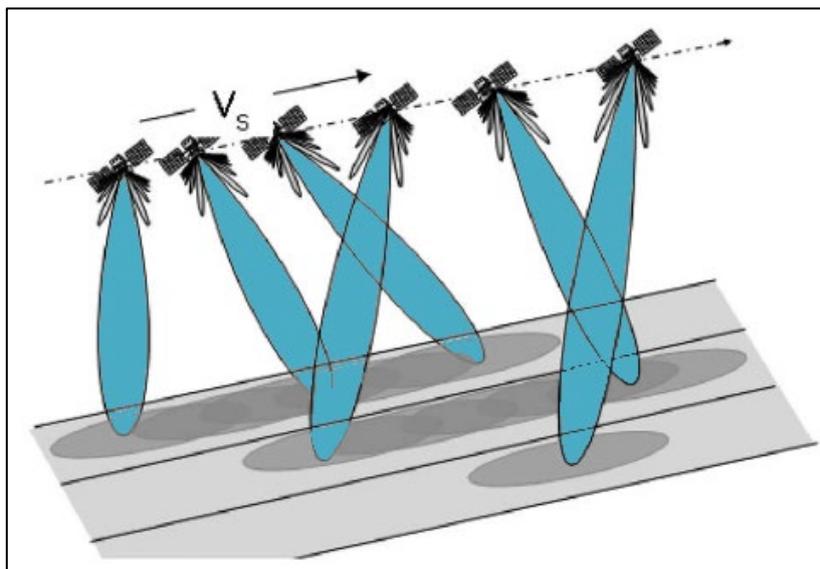
### Stripmap (SM)

El modo SM es un modo de adquisición que cubre una franja terrestre de 80 km con una resolución espacial de aproximadamente 5 m x 5 m (**Figura 2.17**). En total, seis franjas superpuestas pueden abarcar un rango de hasta 375 km. Las imágenes resultantes tienen una calidad uniforme a lo largo de la trayectoria, con un ángulo de incidencia constante. Se usa para captar imágenes de pequeñas islas y, en raras ocasiones, para apoyar gestiones de emergencias.

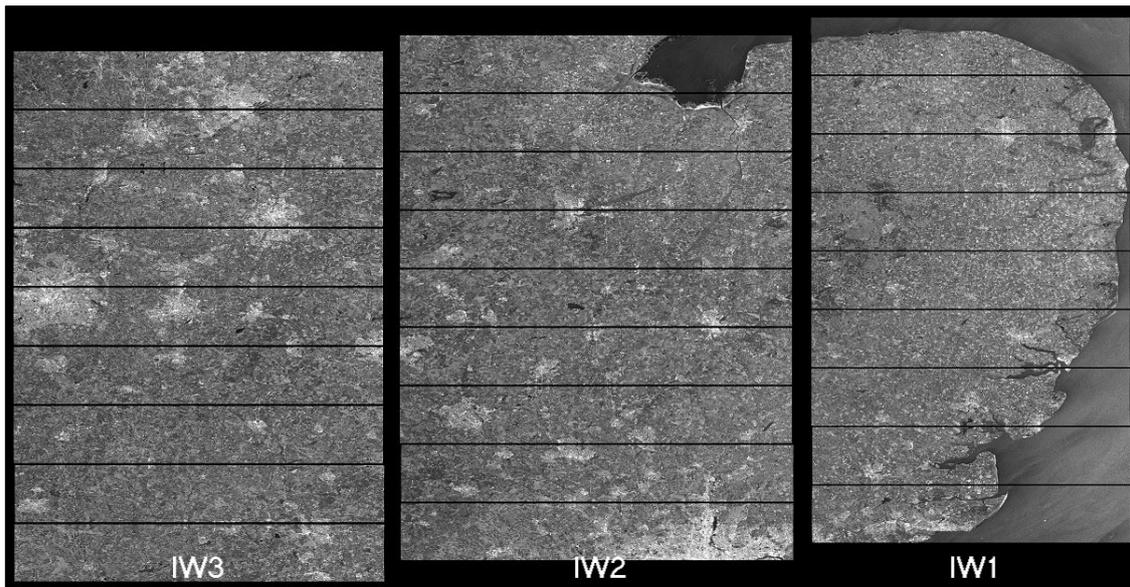
### Interferometric Wide Swath (IW)

El modo de adquisición IW es el principal modo de adquisición sobre áreas terrestres. Funciona tanto en polarización dual (HH + HV, VV + VH) como en polarización simple (HH, VV). Adquiere datos con una franja de cobertura de 250 km y una resolución espacial de 5 m x 20 m (**Figura 2.17**). El modo IW emplea la técnica *Terrain Observation with Progressive Scans SAR* (TOPSAR) (**Figura 2.18**) para capturar tres subfranjas consecutivas. A diferencia del modo ScanSAR, TOPSAR no solo dirige el haz en el rango, sino que además lo desplaza electrónicamente en la dirección del azimut, de atrás hacia adelante, durante cada ráfaga. Este procedimiento reduce en gran medida el efecto de festoneado y garantiza la obtención de imágenes homogéneas a lo largo de toda la franja. Como resultado, el modo IW capturan tres subfranjas designadas como IW1, IW2 e IW3 (**Figura 2.19**), generando una imagen por cada subfranja y por canal de polarización. De esta manera, se obtienen un total de tres imágenes en productos de polarización simple o seis imágenes en productos de polarización dual. Cada subfranja consta de una serie de ráfagas, donde cada ráfaga se ha procesado como una imagen SLC independiente. Existe una superposición suficiente entre ráfagas adyacentes y entre subfranjas que garantiza una cobertura continua del terreno.

Una característica fundamental del modo IW es su capacidad para aplicaciones interferométricas, ya que garantiza la sincronización precisa de las ráfagas, así como la estabilidad en la línea de base y el *Doppler*, lo cual es esencial para el análisis interferométrico.



**Figura 2.18.** Representación gráfica de la adquisición de subfranjas de la técnica TOPSAR. Recuperado de [Copernicus](#) (s.f.).



**Figura 2.19.** Representación de las subfranjas y ráfagas en los productos *Single Look Complex* (SLC) del modo *Interferometric Wide Swath* (IW). Recuperado de [Copernicus](#) (s.f.).

### Extra-Wide Swath (EW)

El modo EW utiliza la técnica TOPSAR para adquirir datos sobre un área más extensa que el modo IW, abarcando una franja de 400 km mediante la captura de cinco subfranjas (**Figura 2.17**). Este modo proporciona imágenes con una resolución espacial de 20 m x 40 m. Su aplicación principal se centra en el monitoreo de hielo marino, zonas polares y áreas marítimas, siendo útil para la vigilancia del hielo, el control de derrames de petróleo y operaciones de seguridad. El modo EW también se puede utilizar para interferometría como el modo IW.

### Wave (WV)

El modo WV presenta características avanzadas en la adquisición de las imágenes, este modo opera con franjas de 20 km x 20 km y una resolución de 5 m x 5 m, recolectando datos cada 100 km a lo largo de la órbita y alternando entre ángulos de incidencia (**Figura 2.17**). Las franjas en el mismo ángulo de incidencia están separadas por 200 km. Este modo es particularmente útil en mar abierto, manteniendo características de interferometría similares a las del modo IW.

### 2.5.6. Formato de imagen y nivel de procesamiento

Los productos Sentinel-1 se distribuyen en tres niveles de procesamiento: Nivel 0, Nivel 1 y Nivel 2 ([Copernicus](#), s.f.).

#### Nivel 0

Los datos de Nivel 0, correspondientes a los modos SM, IW y EW, se generan en proporciones de longitud definida a lo largo de la trayectoria orbital. Posteriormente, estos datos se procesan sistemáticamente para obtener productos de Nivel 1 y Nivel 2, que resultan más manejables para los usuarios. Es importante destacar que, en el caso del modo WV, los productos del Nivel 0 no se distribuyen.

#### Nivel 1

Los productos del Nivel 1 se dividen en dos categorías:

### ***Single Look Complex (SLC)***

Estos productos consisten en datos SAR enfocados y georreferenciados mediante información orbital y de actitud del satélite. Estos productos son proporcionados en geometría de rango oblicuo, es decir, alineados con la línea de visión natural del radar hacia los objetos reflectantes y con orientación *Doppler cero*. Los datos SLC son complejos, conservan la información de fase, lo que los hace aptos para aplicaciones interferométricas.

Los productos SLC están disponibles en distintos modos de adquisición, tales como SM, IW y EW. En los modos IW y EW, las franjas incluyen subfranjas con ráfagas de imágenes consecutivas y superpuestas en acimut, lo que asegura una cobertura contigua del terreno y facilita el proceso interferométrico entre pares de imágenes adquiridas en diferentes períodos.

### ***Ground Range Detected (GRD)***

Los productos GRD consisten en datos SAR enfocados que han sido detectados, procesados y proyectados a escala terrestre utilizando el elipsoide de referencia WGS84, con una reducción del moteado mediante la disminución de la resolución espacial. Las coordenadas de rango inclinado se proyectan sobre el rango terrestre, y los valores de los pixeles representan únicamente la amplitud detectada, por lo que la información de fase se pierde.

Este tipo de productos son adecuados para análisis visual y cartográfico, permitiendo la identificación de cambios en la superficie terrestre a través de la amplitud de la señal.

## **Nivel 2**

Los productos de Nivel 2 comprenden datos geofísicos geolocalizados derivados de productos de Nivel 1. Los productos *Ocean* (OCN) de Nivel 2, son utilizados para el análisis de parámetros oceánicos, tales como viento, olas y corrientes.

### 3. MARCO GEOLÓGICO

#### 3.1. Marco geológico regional

La cuenca Neuquina corresponde a una de las principales cuencas productoras de hidrocarburos de la República Argentina (**Figura 3.1**). Esta cuenca se localiza en el centro-oeste de Argentina, entre los 35° y 41° de latitud Sur y los 66° y 71° de longitud Oeste (**Figura 3.2**). Actualmente abarca gran parte de la superficie de la provincia del Neuquén, noroeste de Río Negro, suroeste de La Pampa y sur de Mendoza. Su forma es más o menos triangular, cubriendo una superficie de aproximadamente 120.000 km<sup>2</sup> (Yrigoyen, 1991).

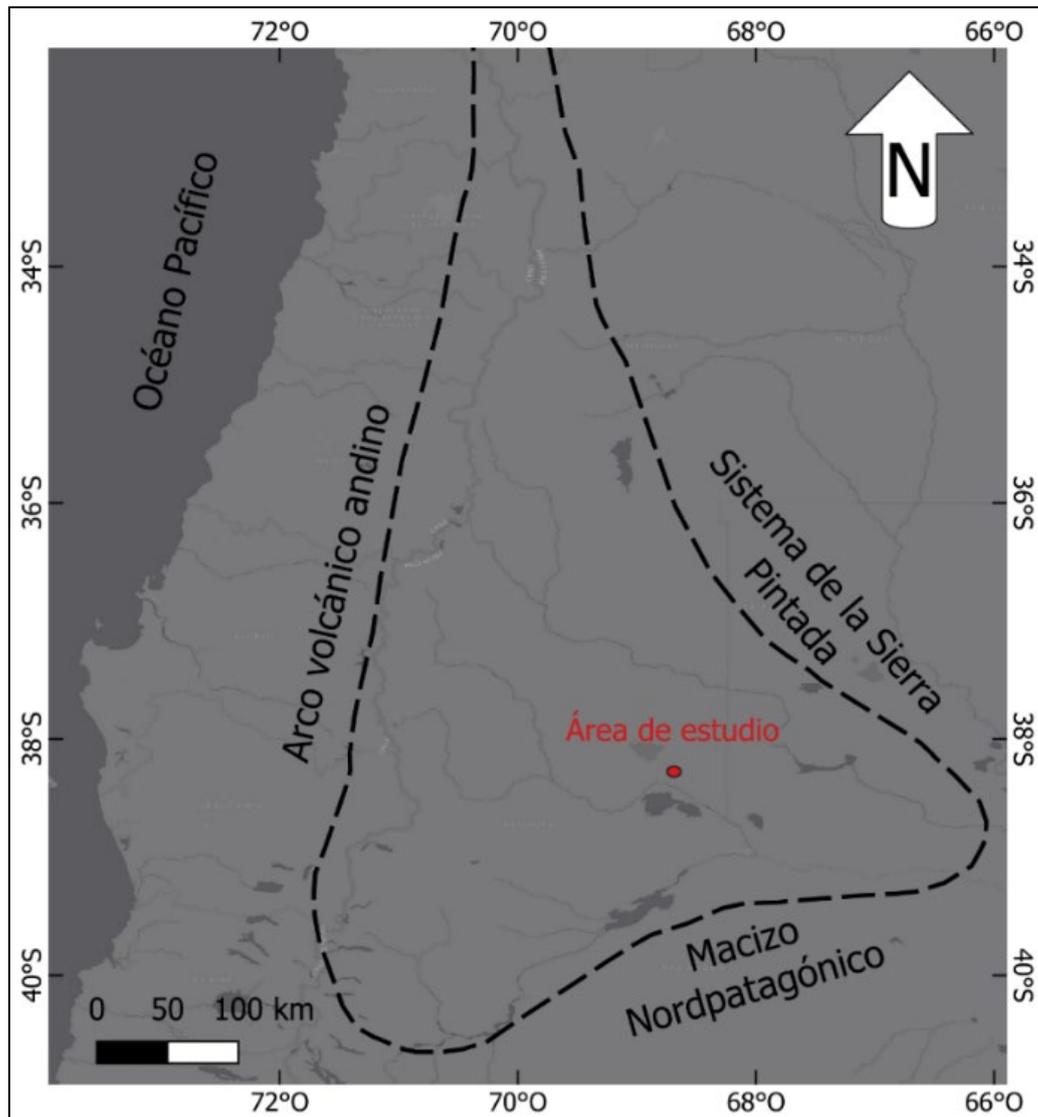
La cuenca está limitada por el arco volcánico Andino hacia el oeste, el Macizo Nordpatagónico al sur y el Sistema de la Sierra Pintada hacia el noreste (Howell *et al.*, 2005) (**Figura 3.2**). Presenta una considerable columna sedimentaria que supera los 6.000 m de espesor, abarcando desde el Triásico superior hasta el Paleoceno (Casadío y Montagna, 2015). El registro estratigráfico incluye una gran variedad de rocas, de origen tanto marino como continental, compuesta por variedades clásticas, carbonáticas, evaporíticas, piroclásticas y, en menor medida, volcánicas (Legarreta y Gulisano, 1989).

En la cuenca Neuquina se distinguen dos regiones principales. Hacia el oeste, los Andes Neuquinos que se caracterizan por una serie de cinturones plegados y corridos de orientación norte-sur. En contraste, hacia el este se encuentra la región del Engolfamiento Neuquino, donde el registro sedimentario se encuentra relativamente sin deformar (Howell *et al.*, 2005).



**Figura 3.1.** Cuencas productivas de Argentina. Tomado de Schiuma *et al.* (2002).

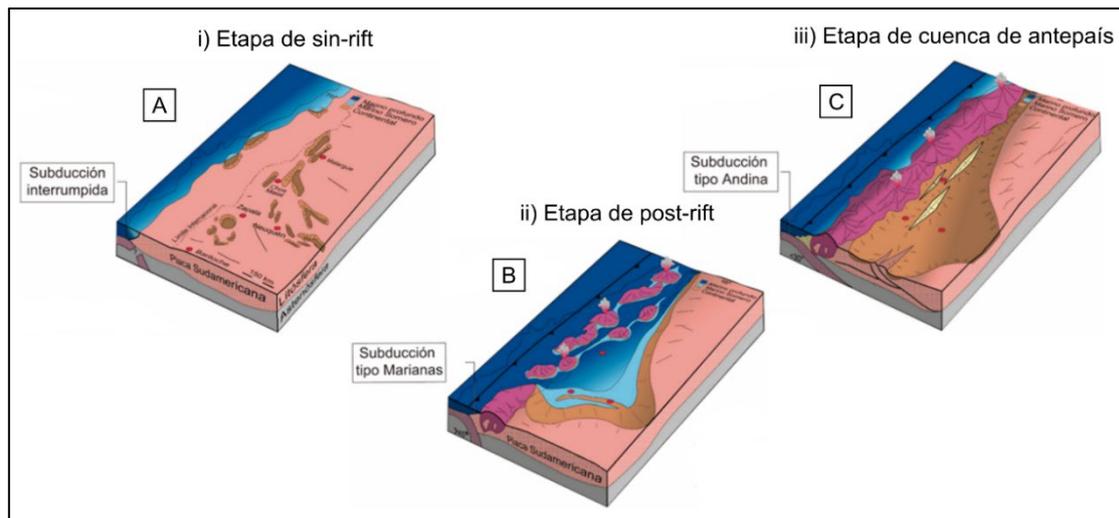
La cuenca Neuquina es reconocida como una de las 36 supercuenas globales principales (**Figura 1.1**). El término supercuenca se refiere a una provincia rica en petróleo que cuenta con una infraestructura existente sustancial, una columna estratigráfica portadora de hidrocarburos con múltiples objetivos, al menos dos rocas generadoras primarias de gran espesor, un historial de producción acumulada de al menos 5 mil millones de barriles de petróleo equivalente (Bboe) y una producción potencial futura de al menos 5 mil millones de Bboe a partir de reservorios convencionales y no convencionales (Minisini *et al.*, 2020). En este contexto, la cuenca Neuquina destaca particularmente por contener los depósitos de la Formación Vaca Muerta, la cual constituye la principal roca generadora de hidrocarburos.



**Figura 3.2.** Ubicación y límites de la cuenca Neuquina. Se indica el área de estudio. Modificado de Howell *et al.* (2005).

### 3.1.1. Evolución tectonosedimentaria de la cuenca Neuquina

La evolución geotectónica de la cuenca está caracterizada por tres etapas principales (**Figura 3.3**) (Howell *et al.*, 2005): (i) etapa de sin-rift, (ii) etapa de post-rift y (iii) etapa de cuenca de antepaís.



**Figura 3.3.** Evolución tectonosedimentaria de la Cuenca Neuquina. **A.** Etapa de sin-rift, **B.** Etapa de post-rift, **C.** Etapa de cuenca de antepaís. Modificado de Howell *et al.* (2005).

### i. Etapa de sin-rift (Triásico Tardío-Jurásico Temprano)

Esta etapa está dominada por una subsidencia mecánica controlada por un sistema de fallas normales de rumbo predominante noroeste-sureste (**Figura 3.3A**), que afectan un basamento integrado por metamorfitas de bajo grado de edad silúrica-pérmica, y plutonitas y vulcanitas permo-triásicas incluidas dentro del Grupo Choiyoi (Vergani *et al.*, 1995; Franzese y Spalletti, 2001; Cristallini *et al.*, 2009). Este sistema de fallas habría permitido el desarrollo de una serie de grábenes y hemigrábenes paralelos al margen oeste de Gondwana, que habrían actuado como subcuencas aisladas (Gulisano, 1981). Estos fueron rellenos por los depósitos clásticos, volcánicos y volcanoclásticos, agrupados bajo la denominación de Grupo Precuyo (Gulisano, 1981; Gulisano *et al.*, 1984; Vergani *et al.*, 1995; Franzese y Spalletti, 2001). No se han reconocido evidencias de un sistema de subducción activo durante este período en las vecindades de la cuenca Neuquina (Howell *et al.*, 2005); se interpreta que habría predominado un sistema de transurrencia subparalelo al margen occidental de Gondwana (Franzese y Spalletti, 2001), adjudicado al desmembramiento del supercontinente Gondwana (Uliana *et al.*, 1989).

### ii. Etapa de post-rift (Jurásico Temprano-Cretácico Temprano)

Esta etapa se caracterizó por la existencia de un sistema de subducción de alto ángulo en el margen occidental de Gondwana (**Figura 3.3B**) que, durante el Jurásico Tardío, propició el desarrollo del arco magmático Andino asociado a un régimen tectónico extensional (Howell *et al.*, 2005). Esta configuración geotectónica permitió establecer una conexión semipermanente con el océano proto-Pacífico, que llevó a que la cuenca evolucionara hacia una cuenca de retroarco caracterizada por una alternancia de ciclos de sedimentación marina y continental (Digregorio *et al.*, 1984). Estos ciclos transgresivos y regresivos, junto con un ascenso del nivel del mar, una importante subsidencia termal de post-rift y procesos de extensión regional, favorecieron la acumulación de al menos 4.000 metros de depósitos marinos y continentales, pertenecientes a los grupos Cuyo, Lotena y Mendoza (Howell *et al.*, 2005; Leanza *et al.*, 2011). Durante esta etapa, se desarrolló la morfoestructura conocida como la Dorsal de Huincul, relacionada a pulsos de actividad tectónica sin-sedimentaria, la cual tuvo una fuerte influencia en la

distribución de las facies y espesores de las unidades depositadas en las subcuencas al norte y sur de la Dorsal (Zavala y Freije, 2002; Freije *et al.*, 2002).

### iii. Etapa de cuenca de antepaís (Cretácico Tardío-Cenozoico)

Durante esta etapa, la horizontalización del ángulo de subducción sumada a la aceleración en la velocidad de convergencia de las placas habría provocado el desarrollo de un régimen tectónico compresional (**Figura 3.3C**), que resultó en la inversión tectónica positiva de algunas estructuras extensionales previas y permitió la transición hacia una cuenca de antepaís (Vergani *et al.*, 1995; Franzese *et al.*, 2003; Howell *et al.*, 2005). Esta reconfiguración tectónica provocó un significativo cambio en la forma y tamaño de la cuenca, y que los depocentros preexistentes migraran en sentido del antepaís, dando lugar al desarrollo de las fajas plegadas y corridas en el oeste de la cuenca (Ramos, 1999; Franzese *et al.*, 2003; Howell *et al.*, 2005). Los sistemas depositacionales activos dentro de la cuenca estuvieron fuertemente controlados por el régimen compresivo, lo que favoreció la acumulación de más de 2.000 metros de depósitos continentales en los principales depocentros (Grupos Rayoso y Neuquén) (Vergani *et al.*, 1995; Legarreta y Uliana, 1999; Howell *et al.*, 2005). Hacia finales del Cretácico la sedimentación continental logró su máxima expansión, conectando la cuenca Neuquina con otros depocentros localizados al sur (Franzese *et al.*, 2003). Esta configuración de la cuenca, sumado al aumento del nivel eustático en el Maastrichtiano condujeron a la primera transgresión marina desde el Atlántico (Howell *et al.*, 2005). Finalmente, la reactivación de la faja plegada y corrida durante el Mioceno marcó el punto culminante en la estructuración de la cuenca Neuquina (Ramos y Folguera, 2005).

#### 3.1.2. Formación Vaca Muerta

La Formación Vaca Muerta, depositada durante el Jurásico Tardío-Cretácico Temprano (Ramos *et al.*, 2020), es una de las unidades litoestratigráficas de mayor extensión de la cuenca Neuquina, abarcando el sur de la provincia del Neuquén hasta el norte de la provincia de Mendoza, y hacia el este la provincia de Río Negro. Esta formación fue inicialmente propuesta por Weaver (1931) y, siguiendo la recomendación de Fossa Mancini *et al.* (1938), se adoptó la denominación de Formación (de la) Vaca Muerta, en reemplazo de “Margas Bituminosas del Tithoniano” (Otharán, 2020).

La Formación Vaca Muerta se compone principalmente por una sucesión heterogénea de fangolitas arcillosas bituminosas, intercaladas con fangolitas calcáreas y silíceas, dentro de las cuales son comunes los niveles de caliza intercalados (Otharán, 2020).

La Formación Vaca Muerta es reconocida como la principal roca madre de Argentina, constituyendo la mayor fuente de hidrocarburos de reservorios no convencionales tipo *shale* de Sudamérica. Los reservorios no convencionales se caracterizan por su muy baja permeabilidad, lo que implica que se requiere el uso de técnicas especiales, como la fractura hidráulica (técnica más utilizada), para estimular la producción de hidrocarburos. Los reservorios tipo *shale oil* y *shale gas* forman parte de lo que se denomina un sistema petrolero no convencional, en el que la roca madre constituye en sí misma un sistema petrolero, ya que cumple funciones de roca generadora, roca reservorio, roca sello y trampa. Los yacimientos no convencionales en reservorios *shale* explotan los hidrocarburos que permanecen retenidos en la roca madre y no han sido expulsados hacia reservorios convencionales. En este contexto, el término *shale* hace

referencia a la roca generadora donde se encuentra retenido el petróleo y/o gas (Otharán, 2020).

Si bien todo el espesor de la Formación Vaca Muerta presenta contenido orgánico, no toda la columna posee el mismo potencial oleogénico. En términos generales, el contenido de materia orgánica disminuye progresivamente desde la base hacia el techo de la formación, lo que se interpreta como el resultado de una mayor dilución de la materia orgánica debido a un aumento progresivo en el aporte sedimentario. El principal intervalo generador se localiza en la sección basal condensada, conocida como Vaca Muerta Inferior (informalmente llamada “cocina”), donde se desarrollan lutitas bituminosas con un tenor de materia orgánica que pueden alcanzar hasta un 12% de carbono orgánico total (COT) (Otharán, 2020).

## **3.2.Marco geológico local**

### **3.2.1. Principales estructuras morfoestructurales**

Entre las principales estructuras morfológicas reconocidas en la cuenca Neuquina (**Figura 3.4**) se incluyen, de oeste a este, el arco volcánico, la fosa de retro-arco de Loncopué, la faja plegada y corrida del Agrio, el bajo de Añelo y el anticlinal de los Chihuidos. Al este de este último, se ha sugerido el crecimiento actual de una estructura denominada anticlinal de Añelo (Messager *et al.*, 2010, 2023).

El área de estudio está ubicada en el sector centro-este de la cuenca Neuquina, en el límite transicional entre el área morfoestructural del Engolfamiento Neuquino y la Plataforma nororiental, también conocida como Flanco Oriental (**Figura 3.4**). Concretamente, se localiza en el sector del Bajo de Añelo o Depocentro de Añelo, un rasgo estructural de orientación noroeste, casi rectilíneo, que divide al Engolfamiento Neuquino en dos vertientes: hacia el noreste la plataforma nororiental y hacia el sur y oeste la plataforma sur y la faja plegada. Este rasgo estructural se extiende a lo largo de aproximadamente 280 km, desde la ciudad de General Roca hasta el área al noroeste del volcán Auca Mahuida, siendo claramente visible en mapas estructurales desde la base del Grupo Cuyo (Jurásico Temprano) hasta el tope del Grupo Neuquén (Cretácico Tardío). A lo largo de su extensión, se presenta como un sinclinorio con un relieve estructural de 750 m (Pángaro *et al.*, 2011a).

El Bajo de Añelo se subdivide en tres segmentos que exhiben diferencias en términos de morfología, mecanismos de subsidencia y evolución estructural. De acuerdo con Pángaro *et al.* (2011a), el área de estudio corresponde al segmento central del Bajo de Añelo.

El Engolfamiento Neuquino corresponde a la región extraandina del Neuquén, se caracteriza por un considerable espesor de sedimentos (Casadío y Montagna, 2015). La mayor parte de la secuencia sedimentaria se encuentra en el subsuelo (Casadío y Montagna, 2015), y se distingue por un plegamiento suave de las secuencias mesozoicas y terciarias (Ramos *et al.*, 2011), así como por fallamiento extensional con una ligera componente de desplazamiento de rumbo, sobre las cuales se desarrollan pliegues y narices estructurales (Casadío y Montagna, 2015). En cuanto a los límites del engolfamiento, se extiende desde el flanco norte de la Dorsal de Huincul, con la que

presenta un límite transicional al sur, y tiene como límite occidental la Cordillera Principal. Hacia el sector nororiental, limita con la Plataforma Nororiental.

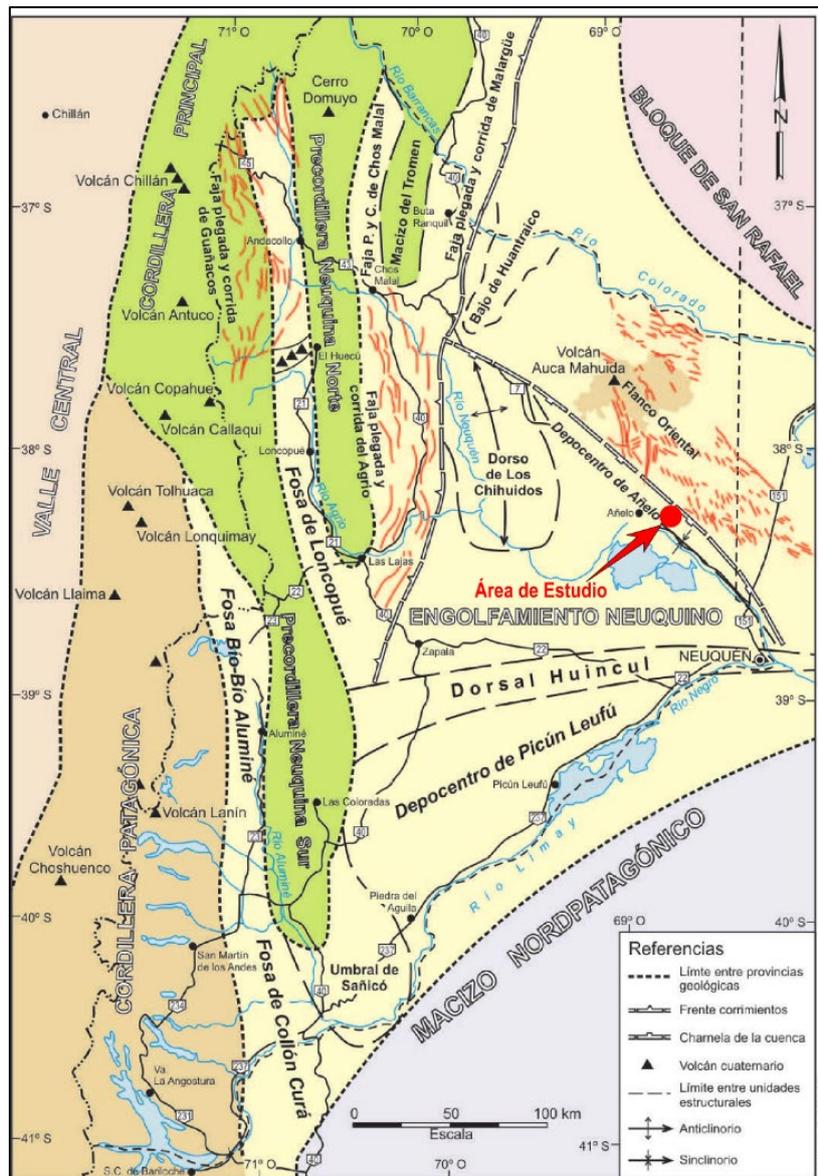


Figura 3.4. Ubicación del área de estudio en el contexto morfoestructural de la Cuenca Neuquina. Modificado de Ramos *et al.* (2011).

### 3.2.2. Evolución y características estructurales

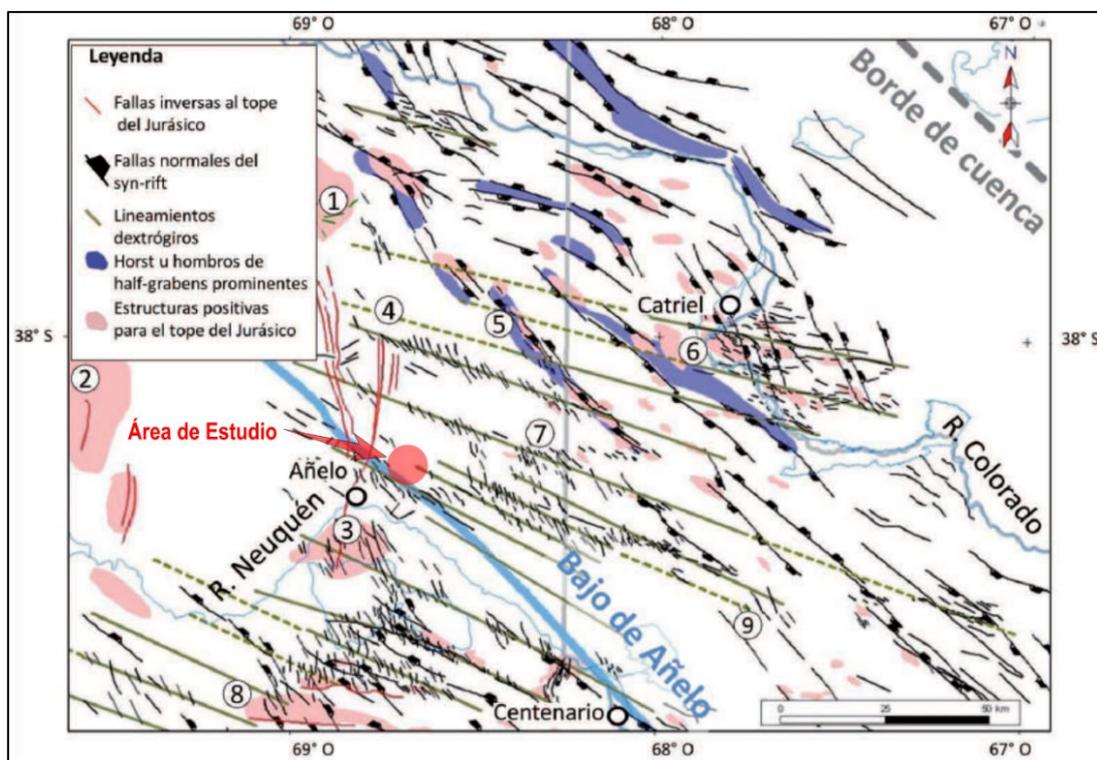
La geología estructural de la zona de estudio presenta un escenario relativamente menos complejo en comparación con otras áreas ubicadas al este y sur de la cuenca (Figura 3.5). Los principales rasgos estructurales corresponden a fallas normales precuyanas que afectan al basamento, generando numerosos hemigrábenes, grábenes y altos de basamento. Estas estructuras son de gran importancia tanto por su extensión como por el control que ejercen sobre la geometría y estructuración de los depósitos posteriores (Basaldúa, 2018).

Este sistema de grábenes y hemigrábenes se desarrolló durante la etapa de *syn-rift* del Triásico Tardío-Jurásico Temprano y presenta una dirección predominante noroeste en toda la región (Figura 3.5) (Cristallini *et al.*, 2009; Basaldúa, 2018).

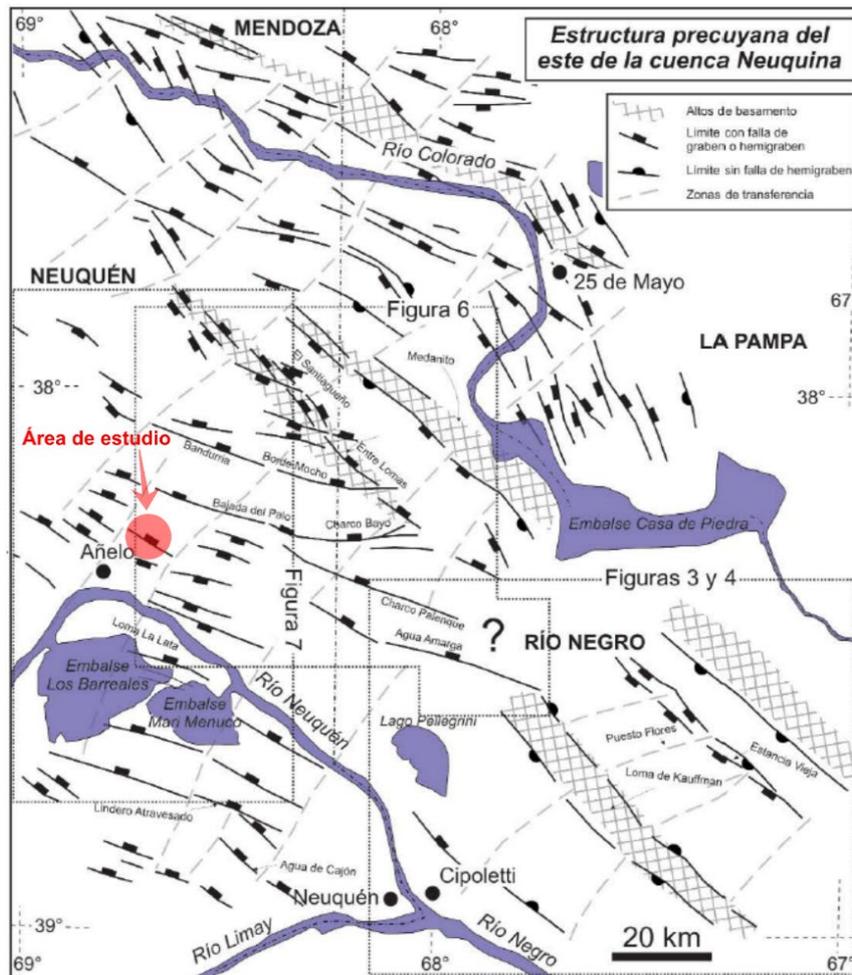
Cristallini *et al.* (2009) identificaron dos poblaciones de fallas precuycanas con orientaciones y características bien definidas (**Figura 3.6**). La primera, que incluye por ej. las fallas de los lineamientos de Entre Lomas, presentan una orientación NO-SE a NNO-SSE, y acomodan grábenes y hemigrábenes profundos de gran extensión. En el sector del área de estudio, la segunda población de fallas se orienta en dirección ONO-ESE y da lugar a cuencas más pequeñas y en general menos profundas (ej. los hemigrábenes de las zonas de Loma de la Lata, Bajada del Palo, Bandurria, etc.). Estas fallas son responsables de la generación de pliegues supratenuos, suaves anticlinales tipo *rollover* y estructuras con cierre contra falla, aunque las de la segunda población presentan un relieve menor. Justamente las principales trampas estructurales de hidrocarburos en esta zona están asociados a pliegues desarrollados sobre los hombros de hemigrábenes y *horsts* (Basaldúa, 2018).

Durante el Jurásico Tardío y el Cretácico Temprano, se registró reactivación de las estructuras precuycanas, con la propagación de nuevas fallas normales y la proliferación de fracturamiento tensional (Cristallini *et al.*, 2009; Basaldúa, 2018). Estas estructuras se concentran sobre las fallas precuycanas de los grábenes y hemigrábenes, así como en sus zonas de charnela (Basaldúa 2018 y referencias allí citadas). En general, presentan una dirección NO-SE, disponiéndose de manera paralela a las estructuras precuycanas y en forma escalonada (*en echelón*) (Cristallini *et al.*, 2009; Basaldúa, 2018). Estas estructuras tienen un interés económico significativo, ya que generan espacios de acumulación de hidrocarburos por fracturamiento (Cristallini *et al.*, 2009).

Por otro lado, en el sector del área de estudio se han identificado fallas inversas con rumbo cercano norte-sur al tope del Jurásico (**Figura 3.5**) (Pángaro *et al.*, 2011b).



**Figura 3.5.** Superposición de las estructuras mapeadas al tope del Precuyano y basamento con los sistemas de fallas mapeados para el tope del Jurásico. En rojo se indica el área de estudio. 1. Volcán Auca Mahuida. 2. Dorso de los Chihuidos. 3. Alto de Sauzal Bonito. 4. Aguada San Roque. 5. Alto Entre Lomas. 6. Medanito-25 de Mayo. 7. Coirón Amargo. 8. Aguada Toledo. 9. Alto de Kauffman. Modificado de Pángaro *et al.* (2011b).



**Figura 3.6.** Principales fallas y transferencias desarrolladas durante el Triásico Tardío-Jurásico Temprano en el este de la cuenca Neuquina. Se distinguen dos poblaciones de fallas bien marcadas. Modificado de Cristallini *et al.* (2009).

### 3.2.3. Unidades aflorantes en el área de estudio

En la superficie del área de estudio, el registro sedimentario está compuesto predominantemente por depósitos cuaternarios, en los que destacan depósitos aluviales, abanicos aluviales actuales y depósitos que cubren pedimentos (**Figura 3.7**). El registro estratigráfico aflora principalmente en los márgenes sur y oeste del área de estudio.

Dentro del área, afloran rocas sedimentarias pertenecientes a las formaciones Anacleto y Agua de la Caldera, mientras que más al sur, en las cercanías a la localidad de Añelo, afloran las formaciones Plottier y Puertezuelo.

A continuación, se describen las principales unidades aflorantes en el área de estudio, teniendo en cuenta la Hoja Geológica 3969-II Neuquén, descrita por Rodríguez *et al.* (2007)

#### Depósitos aluviales y abanicos actuales

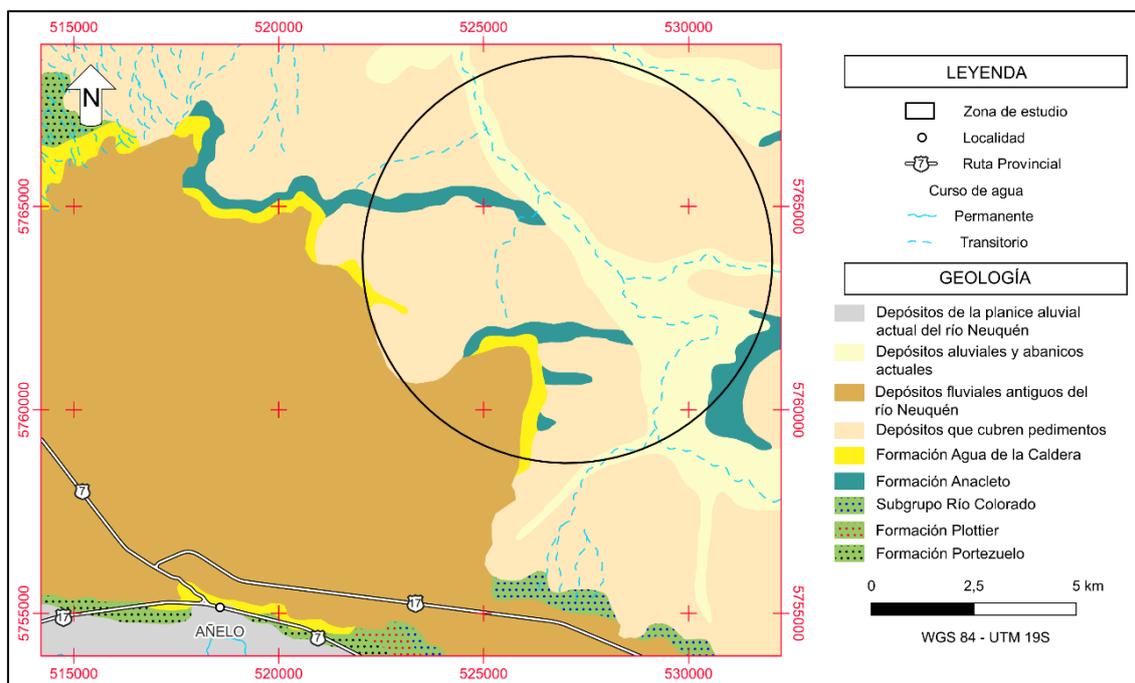
Corresponden a sedimentos transportados por cursos fluviales de carácter efímero, conforman rellenos de canal y abanicos aluviales. Predominan granulometrías arenosas a pelíticas, con proporciones menores de grava fina en delgadas laminas (Rodríguez *et al.*, 2007).

### Depósitos fluviales antiguos de los ríos Neuquén y Negro

Se trata de ortoconglomerados polimícticos compuestos por clastos subredondeados de volcanitas mesosilíceas y básicas, con diámetros de hasta 25 cm. Estos depósitos pueden presentar una estratificación grosera con intercalaciones arenosas (Rodríguez *et al.*, 2007 y referencias allí citas).

### Depósitos que cubren niveles pedimentados

Se trata de sedimentos arenosos a conglomerádicos, vinculados en su origen con superficies de pedimentación. En la zona de estudio estos depósitos recubren pedimentos con pendientes al Bajo de Añelo. Uliana (1979) los agrupó y definió como un conjunto de arenas conglomerádicas, subconsolidadas, dispuestas sobre las pendientes que conforman el flanco de las mesetas, adoptando la forma de mantos de espesor variable (Rodríguez *et al.*, 2007 y referencias allí citadas).



**Figura 3.7.** Mapa geológico de la región norte de la localidad de Añelo, donde se destacan las principales unidades aflorantes y el área de estudio. Modificado de Rodríguez *et al.* (2007).

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

Para alcanzar los objetivos propuestos, se realizó una recopilación bibliográfica sobre el área de estudio. Dicha recopilación incluyó la caracterización geológica y climática de la región, así como datos de producción e inyección y registros de fracturamiento hidráulico de pozos ubicados dentro del área de interés. Adicionalmente, se recopilaron estudios previos sobre procesos de subsidencia y la aplicación de técnicas InSAR para la detección y monitoreo de estos fenómenos.

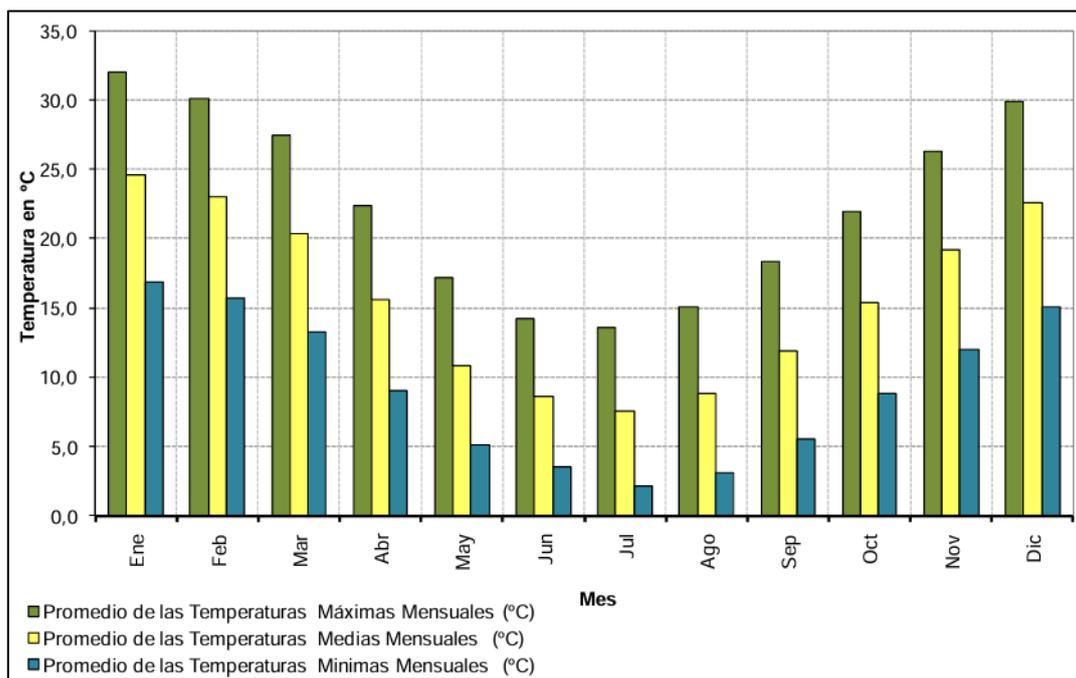
### 4.1. Caracterización climática

El clima del área de estudio está determinado por la interacción de los anticiclones Atlántico y Pacífico, centrados alrededor de los 30° de latitud sur. Otros factores determinantes son, la cordillera de Los Andes, que actúa como una barrera natural entre ellos, y las diferencias de temperatura y presión entre el sector cordillerano en el oeste y de la meseta en el este. La zona de estudio se encuentra comprendida dentro del clima árido de la estepa patagónica, que se caracteriza por ser ventoso, fresco y seco y relativamente uniforme durante todo el año. El promedio anual de lluvia oscila entre los 150 y 200 mm.

La caracterización climática se basó en los datos de precipitación diaria de la Estación Meteorológica La Higuera, dependiente de la Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas (AIC). Dicha estación está ubicada a 65 km al suroeste de la zona de estudio.

#### 4.1.1. Temperaturas

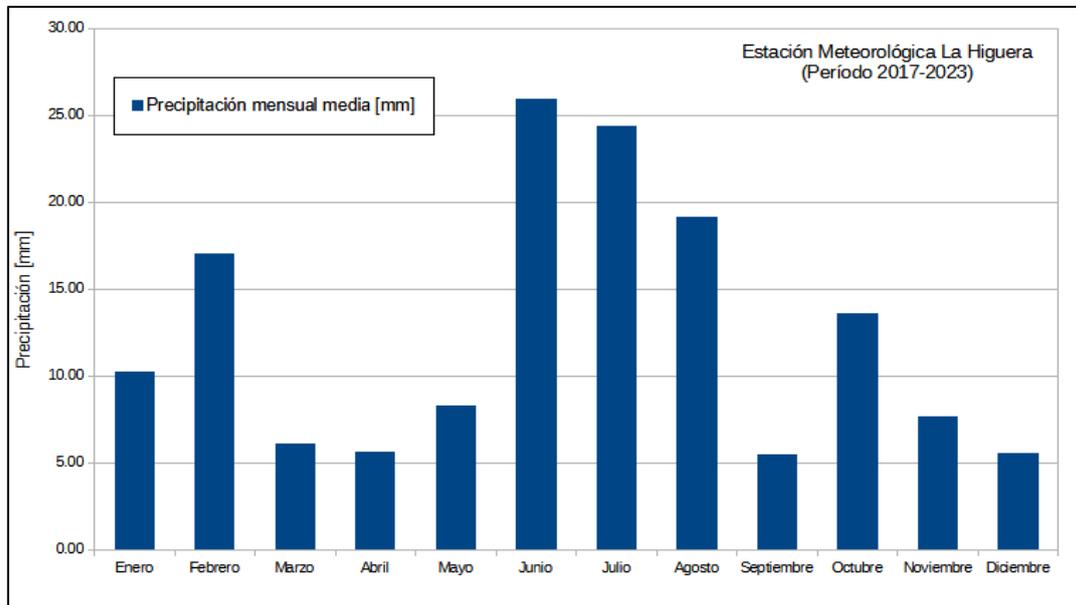
La temperatura media anual correspondiente al período 2005-2015 es de 15,7 °C. El mes de enero se identifica como el más cálido, con una temperatura media de 24,6 °C, mientras que julio, el mes más frío, presenta una temperatura media de 7,5 °C (ver **Figura 4.1**).



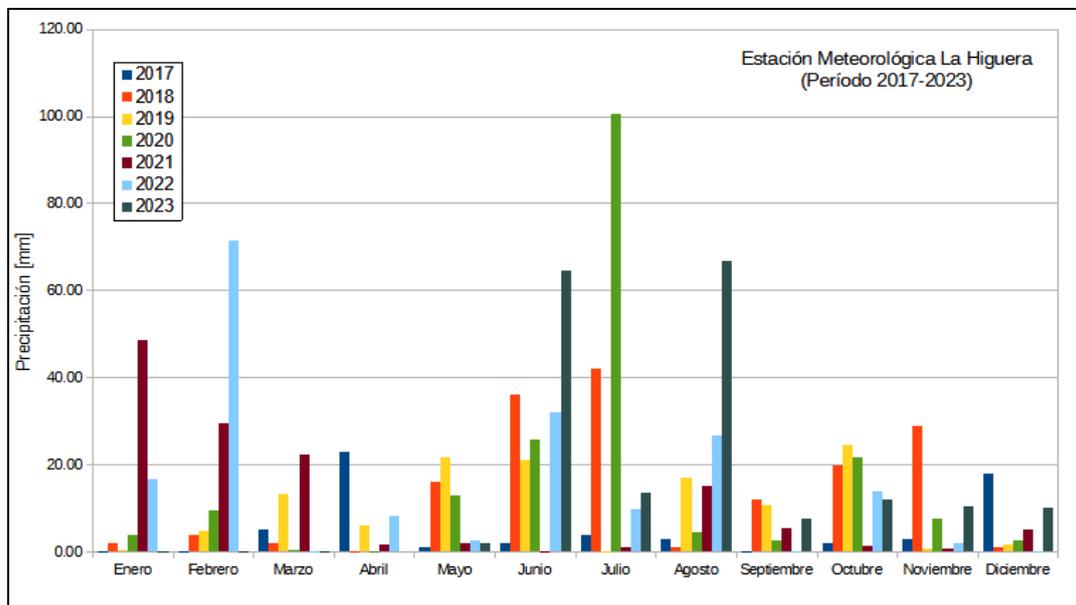
**Figura 4.1.** Temperaturas medias mensuales (°C) de la Estación Meteorológica La Higuera para el período 2005-2015.

### 4.1.2. Precipitaciones

La precipitación media anual para el período (2017-2023) es de 149,8 mm, clasificando a la región dentro de la franja semiárida de la estepa patagónica. Tal como se observa en las **Figuras 4.2 y 4.3**, junio se destaca como el mes con mayor precipitación, con un promedio de 25,9 mm, mientras que septiembre es el mes más seco, con un promedio de solo 5,49 mm.



**Figura 4.2.** Precipitaciones medias mensuales (mm) de la Estación Meteorológica La Higuera para el período 2017-2023.



**Figura 4.3.** Precipitaciones totales mensuales (mm) de la Estación Meteorológica La Higuera para el período 2017-2023.

### 4.2. Datos de producción y fractura

Para el análisis de los volúmenes de extracción e inyección, se utilizaron datos de producción de petróleo y gas por pozo, junto con los datos de fractura de pozos de hidrocarburos, proporcionados por la Secretaría de Energía de Argentina (ver ANEXO

2 y 3). Los datos abarcan el período enero 2016 – julio 2024 y fueron descargados de bases de datos públicas.

Las bases de datos utilizadas proporcionan una descripción detallada de cada pozo, incluyendo su ubicación, empresa operadora, profundidad, estado (abandonado, operativo), así como la producción mensual por pozo y tipo de fluido (petróleo, gas natural, agua). De manera análoga, la información sobre fracturas incluye datos sobre los materiales inyectados, presión operativa, período de ejecución, cantidad de etapas de fractura, longitud de la rama horizontal y otros parámetros relevantes.

Este análisis se centró exclusivamente en los pozos ubicados dentro del área de estudio definida, identificándose un total de 117 pozos, tanto convencionales como no convencionales. Estos fueron clasificados para facilitar su posterior análisis (ver Figuras 4.4, 4.5 y 4.6).

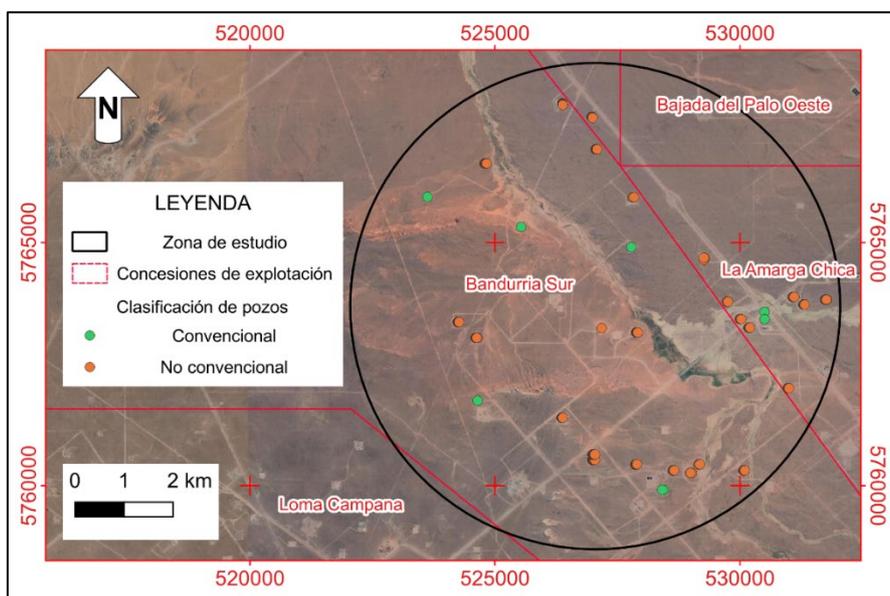


Figura 4.4. Ubicación de pozos en el área de estudio según tipo de reservorio.

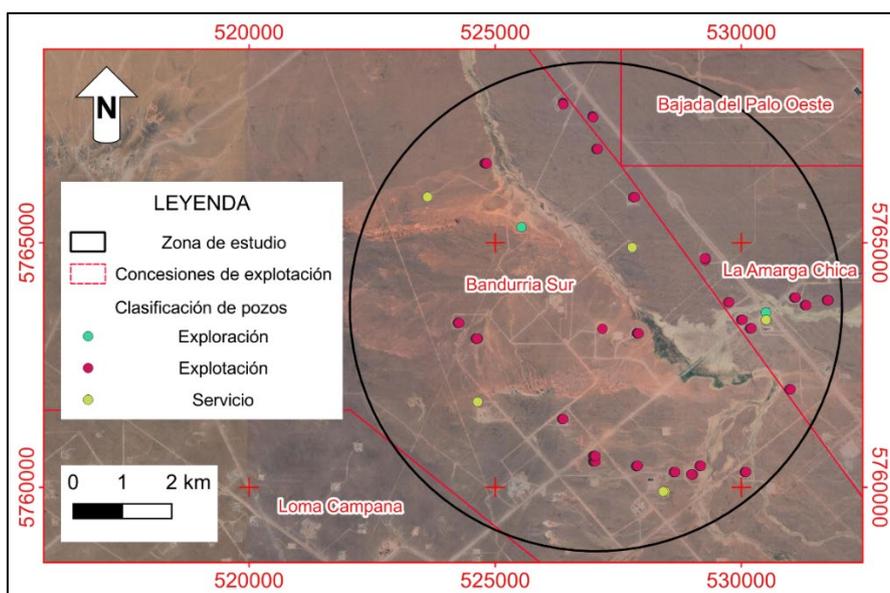


Figura 4.5. Ubicación de pozos en el área de estudio según su clasificación.

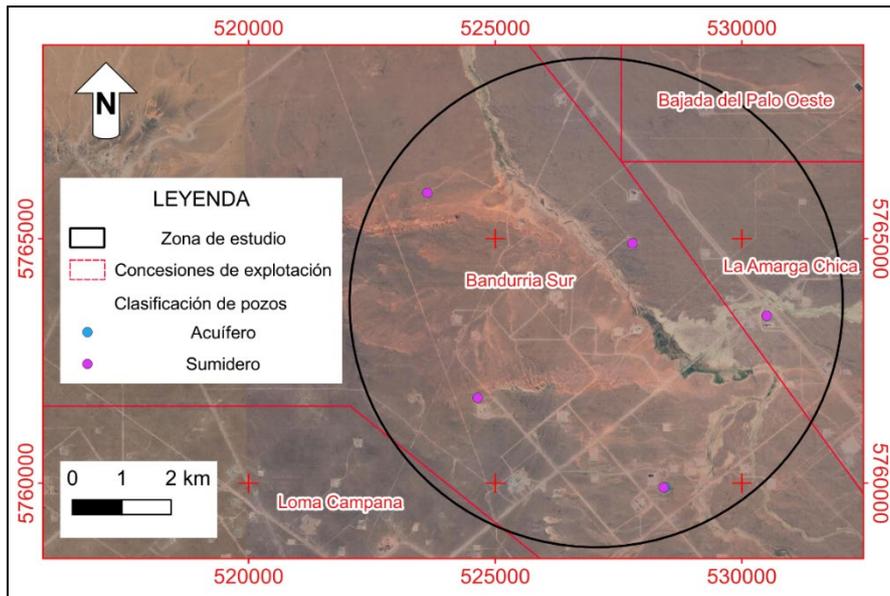


Figura 4.6. Ubicación de pozos de servicio en el área de estudio según su subclasificación.

Los volúmenes de producción de petróleo y agua se expresan en metros cúbicos ( $m^3$ ), por lo que no requirieron conversión. En cambio, las arenas inyectadas y el gas producido se informan en unidades diferentes. Las arenas, expresadas en toneladas métricas, fueron convertidas a metros cúbicos considerando la densidad de las arenas de fractura (ver ANEXO 4), con el objetivo de facilitar su comparación. Por su parte, el gas, informado en miles de metros cúbicos ( $10^3 m^3$ ) en condiciones estándar (1 bar y 288 K), fue convertido a condiciones de yacimiento mediante relaciones PVT basadas en el comportamiento de gases ideales (ver ANEXO 5), estimándose así el volumen desplazado desde la formación.

#### 4.2.1. Producción convencional

Los datos analizados de producción convencional indican que, dentro del área de estudio y durante el período de análisis, no se registró producción de hidrocarburos convencional. Sin embargo, se identificaron dos registros de producción de agua, ambos asociados a la Formación Rayoso (ver Figura 4.7).

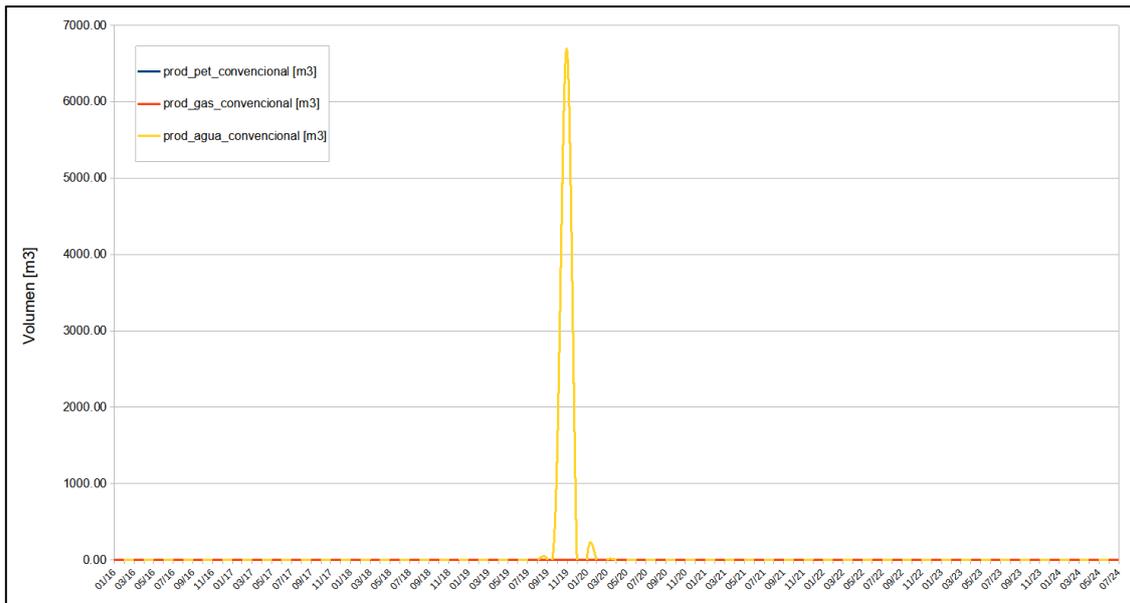


Figura 4.7. Volúmenes de producción convencional mensual total de petróleo, gas y agua en m<sup>3</sup>.

#### 4.2.2. Producción no convencional

Los datos analizados de producción no convencional revelan un aumento significativo en la producción de hidrocarburos y agua a partir de principios de 2019 (ver **Figura 4.8**). Asimismo, se observa una marcada diferencia entre los volúmenes de producción, con una mayor producción de petróleo en comparación con el gas y el agua.

Los picos observados en los gráficos de producción presentan un comportamiento complejo, influenciados por una combinación de factores técnicos, económicos, regulatorios, operativos y otros condicionantes externos.

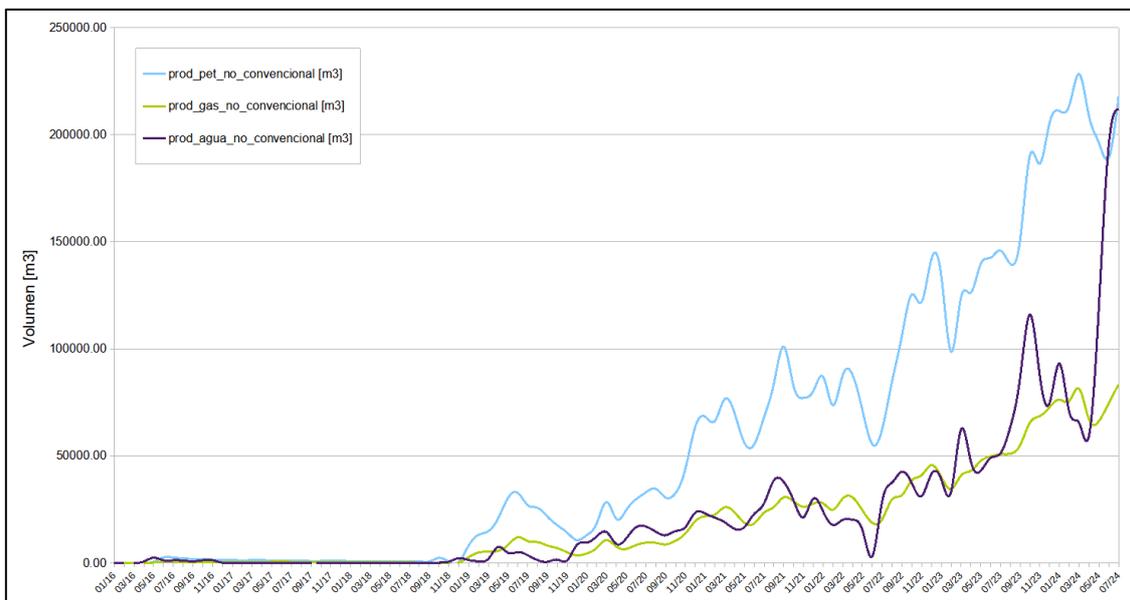
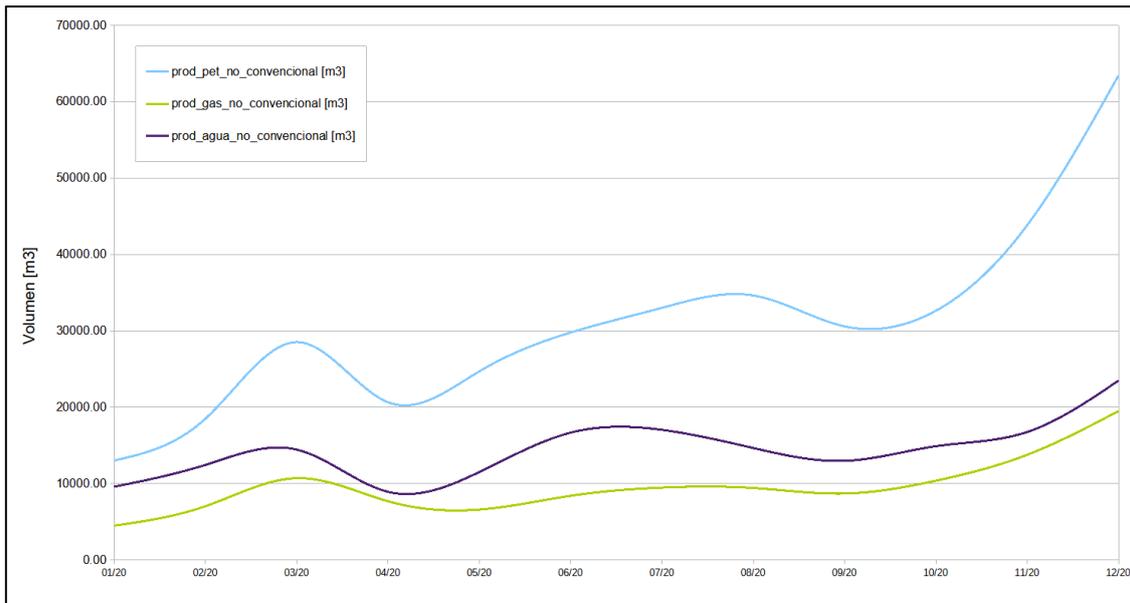


Figura 4.8. Volúmenes de producción no convencional mensual total de petróleo, gas y agua en m<sup>3</sup>.

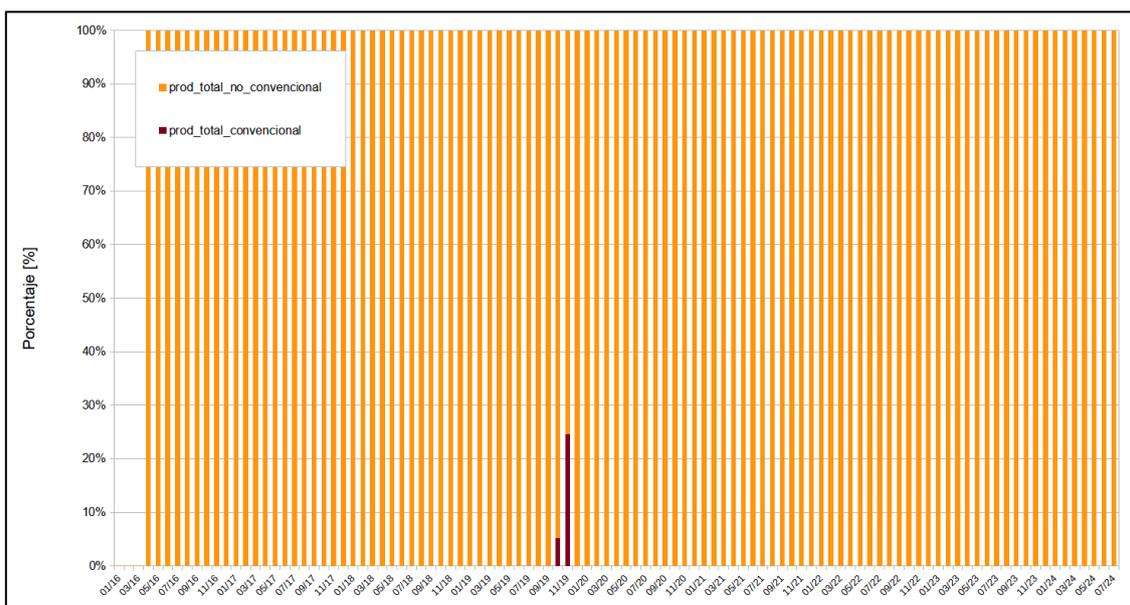


**Figura 4.9.** Volúmenes de producción mensual total no convencional de petróleo, gas y agua en m<sup>3</sup>, correspondiente al año 2020.

La **Figura 4.9** muestra una caída en la producción a finales del primer trimestre y principios del segundo trimestre del año 2020, seguida de una recuperación gradual hacia finales de ese mismo año. Este comportamiento podría atribuirse a los efectos de la pandemia de COVID-19 en la industria.

En términos generales, la producción de petróleo experimentó una marcada declinación hasta mediados de 2018. A partir de ese momento, comenzó una recuperación moderada, la cual se vio interrumpida en 2020 debido al impacto de la pandemia, tanto a nivel local como global.

#### 4.2.3. Comparación entre producción convencional y no convencional



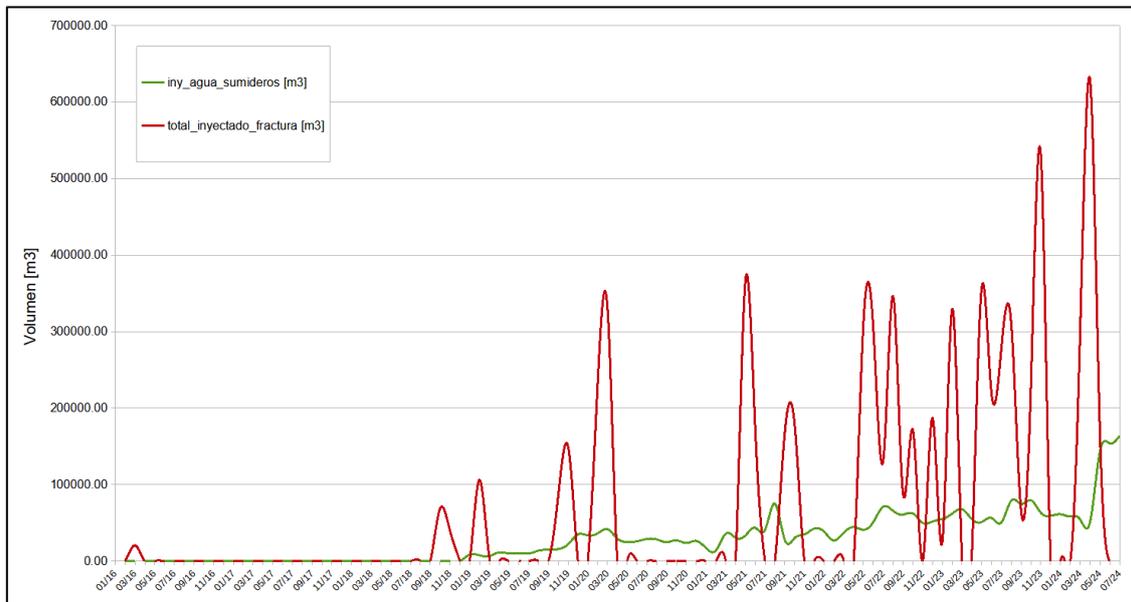
**Figura 4.10.** Porcentaje de producción total mensual según el tipo de reservorio.

Los porcentajes de producción no convencional muestran una diferencia significativa en comparación con la producción convencional (ver **Figura 4.10**). Cabe destacar que los

únicos valores registrados de producción convencional corresponden a los previamente identificados como producción de agua.

Estos datos permiten concluir que la producción de hidrocarburos en el área de estudio es netamente no convencional, con la Formación Vaca Muerta como la principal roca reservorio.

#### 4.2.4. Inyección



**Figura 4.11.** Volúmenes totales mensuales de agua inyectada en pozos sumideros e inyectada para fractura en  $m^3$ .

Los volúmenes de agua inyectados en pozos sumideros de la Formación Centenario son considerablemente menores que los volúmenes de arena y agua empleados en las operaciones de fractura hidráulica en la Formación Vaca Muerta (ver **Figura 4.11**). En particular, la inyección asociada a la fractura hidráulica muestra un aumento progresivo en los volúmenes inyectados a lo largo del tiempo. Sin embargo, los datos relacionados con estas operaciones no evidencian un patrón uniforme, lo que sugiere variaciones atribuibles a las estrategias aplicadas y a las condiciones operativas.

#### 4.2.5. Comparación entre volúmenes extraídos e inyectados

Los datos de extracción muestran un crecimiento sostenido, particularmente a partir del año 2019, como se mencionó previamente. En contraste, los datos de inyección presentan un patrón irregular (**Figura 4.12**).

Durante el período analizado, se observa que las operaciones no convencionales son las principales responsables de los cambios en el volumen del subsuelo, con un marcado aumento a partir de 2019 (ver **Figura 4.13**). Los volúmenes de producción de petróleo no convencional experimentaron un incremento progresivo, especialmente en comparación con los de gas y agua, a partir del año 2021. Los volúmenes de producción no convencional son ligeramente mayores que los de inyección para fractura, este comportamiento indicaría que la producción no convencional de hidrocarburos está dominando la dinámica del subsuelo en el área de estudio.

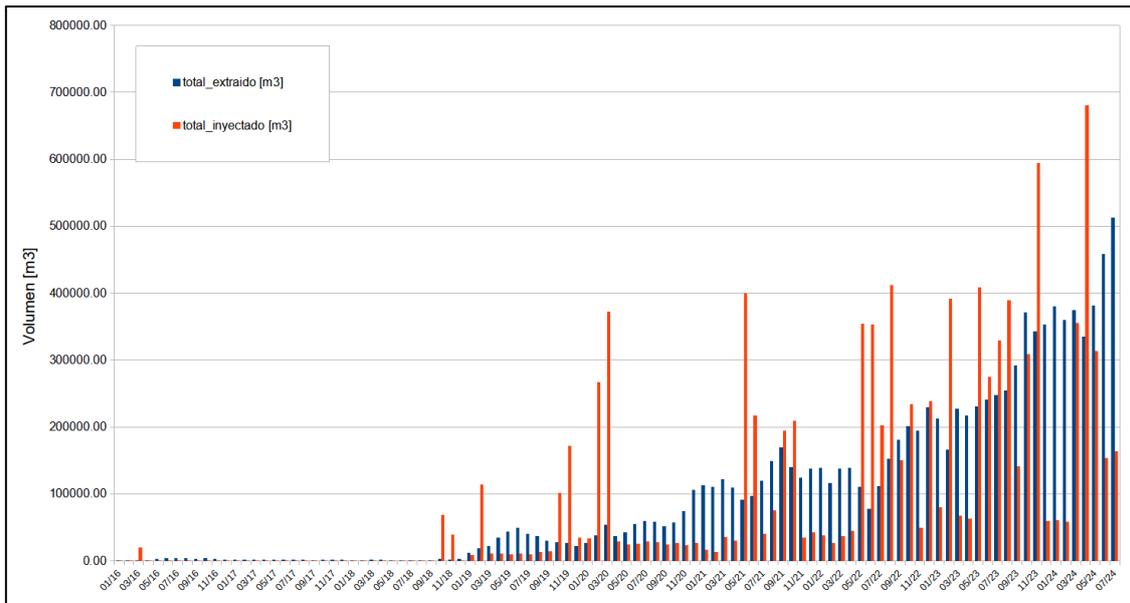


Figura 4.12. Volúmenes mensuales totales inyectados e extraídos en m³.

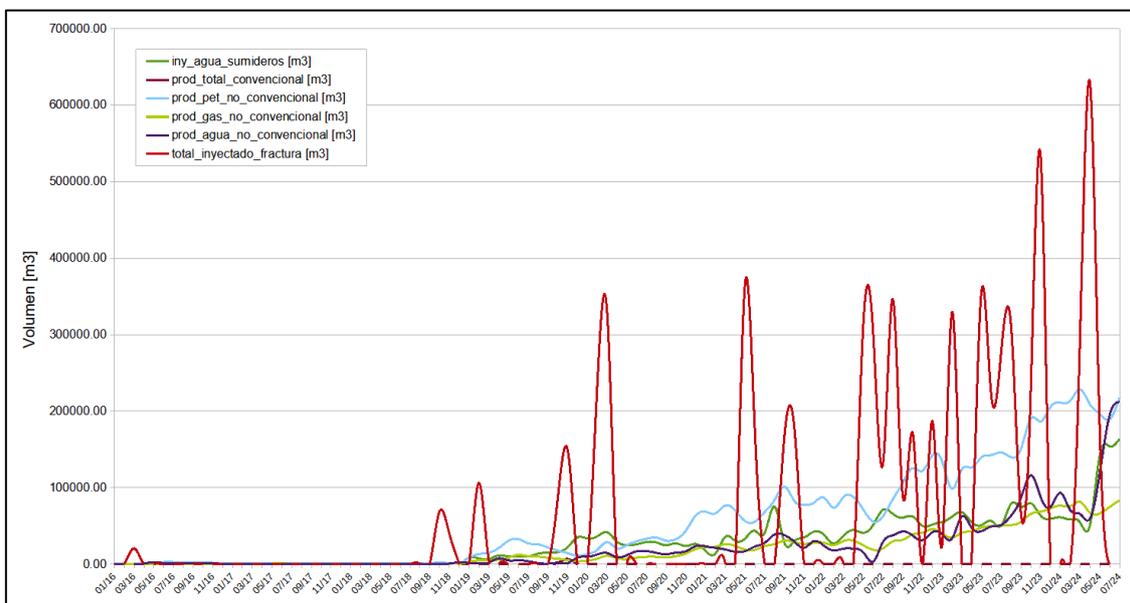


Figura 4.13. Evolución de la producción de hidrocarburos en m³.

### 4.3. Procesamiento de datos SAR

Actualmente, existen diversos procedimientos para el monitoreo de deformaciones superficiales. El avance tecnológico en los últimos años ha permitido el desarrollo de métodos alternativos, como el uso de redes de servidores remotos para el procesamiento de datos y la generación de subproductos específicos.

En este trabajo, se utilizó la plataforma Alaska Satellite Facility (ASF), que gestiona datos SAR y proporciona servicios de procesamiento, facilitando el manejo y análisis de grandes volúmenes de información. Esto lo hace a través de tres servicios principales:

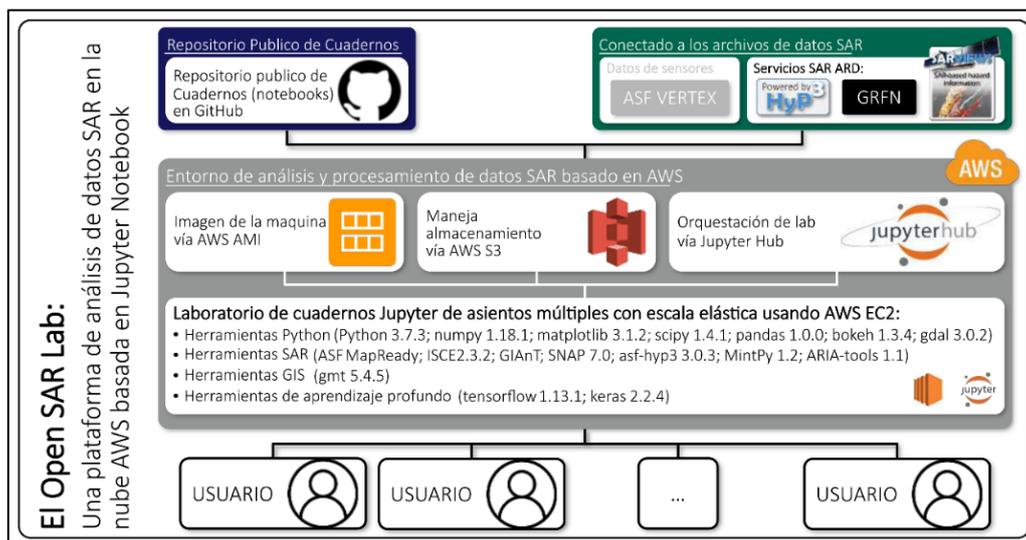
- Vertex Data Search: interfaz para explorar adquisiciones de Sentinel-1 y seleccionar imágenes para su procesamiento a pedido.

- Hybrid Pluggable Processing Pipeline (HyP3): herramienta integrada en Vertex para el procesamiento *on demand* de imágenes SAR.
- OpenSARLab: entorno computacional personalizable basado en la nube, diseñado para el análisis de datos SAR.

El flujo de trabajo para el procesamiento a pedido y el análisis de datos en la nube se describe siguiendo a Lewandowski (2023):

- I. **Identificación de la escena de referencia para una pila de interferogramas**
  - ✓ Vertex Data Search
- II. **Construcción y ordenamiento de una pequeña pila de interferogramas**
  - ✓ Pluggable Processing Pipeline (HyP3)
- III. **Análisis de series temporales InSAR utilizando la técnica SBAS**
  - ✓ OpenSARLab
  - ✓ Miami InSAR Time-Series Software (MintPy)

La **Figura 4.14** presenta un esquema de la estructura del servicio OpenSARLab.



**Figura 4.14.** Estructura del servicio OpenSARLab. Traducido de Meyer *et al.* (2021).

### 4.3.1. Vertex Data Search

La interfaz de búsqueda Vertex (<https://search.asf.alaska.edu/>) permite el acceso a productos SAR mediante diversos criterios de búsqueda, facilitando la recopilación de imágenes que cumplen los intereses del usuario. Además, permite explorar adquisiciones y seleccionar imágenes para su procesamiento a pedido. Para más información sobre este servicio, se encuentra disponible la [Guía de introducción de Vertex](#).

### 4.3.2. Hybrid Pluggable Processing Pipeline (HyP3)

HyP3 es un servicio diseñado para el procesamiento de imágenes SAR que resuelve muchos de los problemas comunes que enfrentan los usuarios de datos SAR, como la eliminación de distorsiones, la necesidad de recursos informáticos y el uso de *softwares* complejos o costosos para el procesamiento SAR (Alaska Satellite Facility, s.f.-b). Para abordar estos desafíos, HyP3 ofrece un servicio gratuito que permite a los usuarios solicitar el procesamiento SAR *on demand*.

Cabe destacar que este servicio está disponible exclusivamente para conjuntos de datos Sentinel-1. Las solicitudes de procesamiento son gestionadas de manera automatizada, por lo que los usuarios no requieren un conocimiento profundo sobre procesamiento SAR ([Alaska Satellite Facility](#), s.f.-b). Para más información sobre el servicio HyP3, se puede consultar [Alaska Satellite Facility's Hybrid Pluggable Processing Pipeline \(ASF HyP3\)](#).

Por su parte, Vertex permite realizar solicitudes de procesamiento, de modo que incluye el servicio HyP3.

En el **ANEXO 6** se describe el procedimiento implementado en este estudio para la búsqueda y posterior solicitud de procesamiento *on demand*. Asimismo, se describe el flujo de trabajo InSAR empleado en la plataforma HyP3.

Para más información, se puede consultar [Solicitud de conjuntos de datos InSAR de Sentinel-1 desde ASF](#).

### 4.3.3. OpenSARLab



Figura 4.15. Interfaz con las características del servidor utilizado para el procesamiento.

OpenSARLab es un servicio que proporciona acceso al procesamiento SAR en la nube a través de un entorno JupyterLab. Se encuentra alojado junto a los archivos de ASF en Amazon Web Services (AWS), lo que permite la transferencia de productos de gran tamaño con baja latencia ([Alaska Satellite Facility](#), s.f.-c). La automatización del análisis satelital en OpenSARLab está disponible para fines científicos y académicos.

OpenSARLab aborda diversas problemáticas asociadas al desarrollo e implementación de técnicas de ciencia de datos SAR. Entre los desafíos más destacados se encuentran, la necesidad de instalar múltiples paquetes de forma independiente, los elevados requisitos de recursos de *hardware* para realizar análisis, así como las limitaciones de ancho de banda que dificultan la descarga de productos SAR de gran tamaño ([Alaska Satellite Facility](#), s.f.-c).

Para más información acerca del servicio OpenSARLab visitar la [Guía de usuario de OpenSARLab](#).

### 4.3.4. Miami InSAR Time-Series Software (MintPy)

El software MintPy es un paquete *Open Source* para el análisis de series temporales InSAR. Lee una pila de interferogramas corregidos y desenrollados, con referencia al pixel más coherente, calcula el cierre de fase y estima los errores de desenvolvimiento, invierte la red de interferogramas en series temporales que se calculan con la coherencia espacial y elimina rampas de fase, corrige errores del DEM para generar productos en 2D y estimar la velocidad con el análisis temporal del desplazamiento en dirección de la

línea de visión (LOS). La caja de herramientas MintPy contiene *scripts* de utilidades individuales para poder comparar velocidades estimadas a partir de series temporales (MintPy, s.f.).

#### 4.3.5. Procedimiento de análisis de series temporales

Para la selección de los interferogramas, se tuvieron en cuenta los datos de precipitaciones de la estación meteorológica La Higuera, proporcionados por la AIC, correspondientes al período enero 2017 – julio 2024. Este procedimiento también consideró la disponibilidad de imágenes Sentinel-1, lo que permitió optimizar la selección de las más adecuadas para el análisis. Además, se establecieron criterios técnicos específicos, priorizando pares con una línea base perpendicular menor o igual a 150 m y la menor línea base temporal posible. Los interferogramas resultantes de este procedimiento se presentan listados en el ANEXO 7.

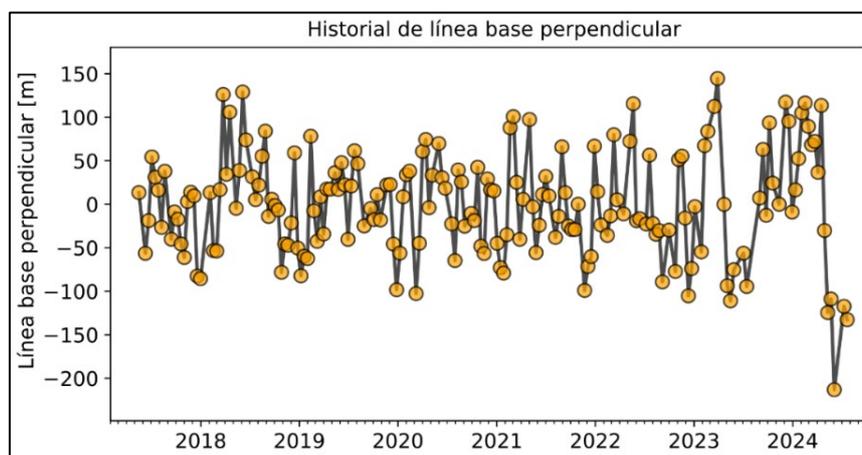


Figura 4.16. Descripción de la línea base perpendicular del período de estudio.

Se ha procesado un total de 183 interferogramas, correspondientes al período comprendido entre el 17 de mayo de 2017 y el 21 de julio de 2024. En la **Figura 4.16** se señala mediante puntos los interferogramas procesados. Estos presentan una línea base perpendicular máxima de 145 m y una línea base temporal que varía entre 12 y 36 días, determinada por la disponibilidad de imágenes.

Una vez procesados los interferogramas mediante el servicio *on demand* HyP3, los productos obtenidos fueron procesados en el entorno virtual OpenSARLab utilizando cuadernos Jupyter Notebooks. Los *scripts* empleados, disponibles en el repositorio de GitHub [OpenSARLAB\\_MintPy\\_Recipe\\_Book](#), son de libre acceso y permiten la ejecución de procesos SAR en un entorno Conda. A continuación, se describe el flujo de trabajo implementado en este estudio dentro de OpenSARLab:

##### I. Instalación del entorno Conda

El primer paso fue la instalación del entorno Conda, lo que permitió disponer de las herramientas, bibliotecas y *scripts* necesarios para el procesamiento de los datos SAR.

##### II. Acceso a los datos de HyP3

Asumiendo que ya se había solicitado el procesamiento de una pila SBAS utilizando HyP3, se creó un directorio de trabajo para el análisis, donde se migró la pila. A su vez, se eliminaron los datos innecesarios y se generó un subconjunto de la pila basado en un área de interés (AOI, por sus siglas en inglés) (**Figura 4.17**).

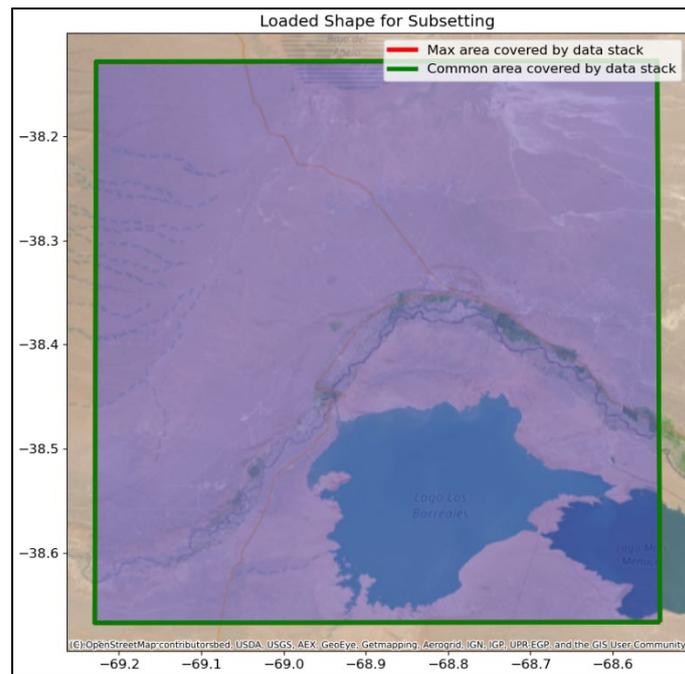


Figura 4.17. Selección del AOI del área de interés.

### III. Carga de la pila de datos en MintPy

Este paso consistió en la configuración de los parámetros de análisis de la serie temporal. Para ello, se seleccionó el directorio en el cual se guardó la pila HyP3 preparada para MintPy, se definió un nombre para el proyecto y se creó un directorio para almacenar los archivos de salida generados durante el análisis.

### IV. Configuración del análisis de series temporales

El análisis de series de tiempo en MintPy se definió en un archivo de configuración denominado *smallbaselineApp.cfg*. Este archivo contenía opciones con configuraciones predeterminadas e integraba varios subprocesos secuenciales para invertir la pila de interferogramas desenvueltos y aplicar correcciones con el fin de obtener series temporales de desplazamiento del suelo. Se seleccionaron las opciones que se ajustan comúnmente.

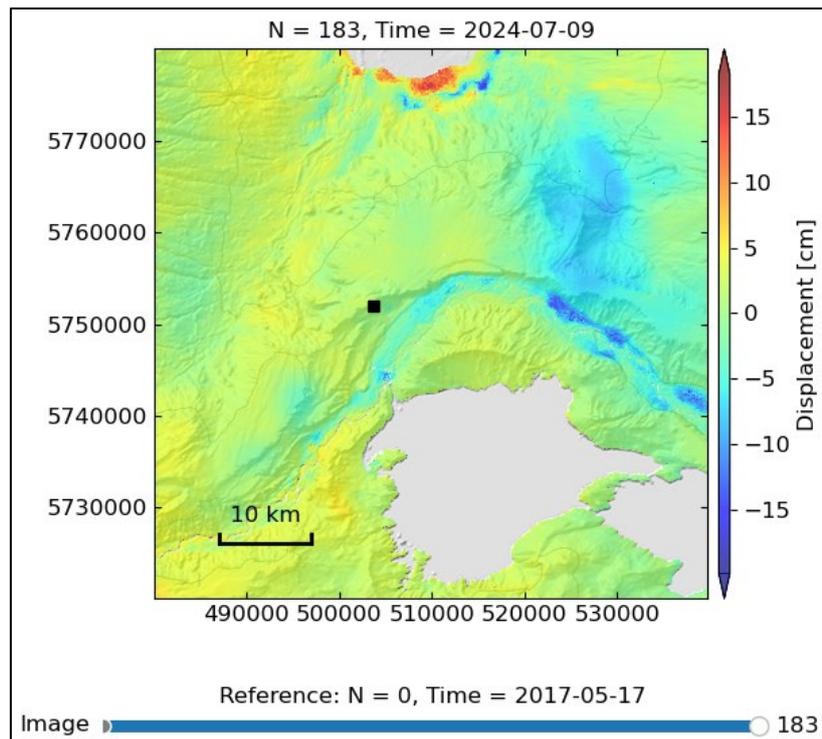
### V. Análisis de series temporales del subconjunto SBAS

El análisis de series de tiempo del subconjunto de línea de base pequeña (SBAS) se ejecutó mediante la carga de datos interferométricos, la modificación de la de la red de interferogramas, la selección de un punto de referencia (el pixel con mayor coherencia), la inversión de la red, la corrección topográfica, el cálculo de residuales RMS, la elección de la fecha de referencia, el cálculo de velocidad en la línea de visión (LOS), la geocodificación de la velocidad y la obtención de un ráster para su visualización en Google Earth con extensión KMZ. Asimismo, se generó la serie temporal invertida desenrollada y se obtuvo un archivo *shapefile* de puntos de la serie temporal.

### VI. Procesos posteriores a las series temporales

#### *Generación del mapa de desplazamiento acumulativo*

Se generó un mapa de desplazamiento acumulativo en la dirección de la LOS, que permitió observar el desplazamiento en diferentes puntos y en diferentes períodos de tiempo (Figura 4.18).



**Figura 4.18.** Mapa de desplazamiento acumulativo en dirección de la LOS de la región central de la cuenca Neuquina.

#### ***Creación de geotiffs de coherencia, velocidad y desplazamiento***

Se almacenaron los archivos de desplazamiento desenrollado, interferogramas enrollados, coherencia temporal y espacial media, y velocidad en formato *geotiff*. Estos fueron descargados para su procesamiento en un *software* SIG.

#### **Procesamiento en el *software* QGIS**

Una vez descargados los archivos ráster en formato *geotiff*, se reclasificó la coherencia espacial con el fin de generar una máscara de coherencia que se aplicó sobre el ráster de velocidad. Se generó un AOI común para todos los ráster mediante un nuevo *shapefile*, garantizando que cubrieran la misma área superficial.

Se extrajeron los valores de desplazamiento acumulado a lo largo del tiempo a partir del archivo *shapefile* de puntos. Se seleccionaron seis puntos, cuyos datos se procesaron en una hoja de cálculos para obtener las series de desplazamiento en el tiempo, las cuales se analizan en detalle más adelante en este trabajo.

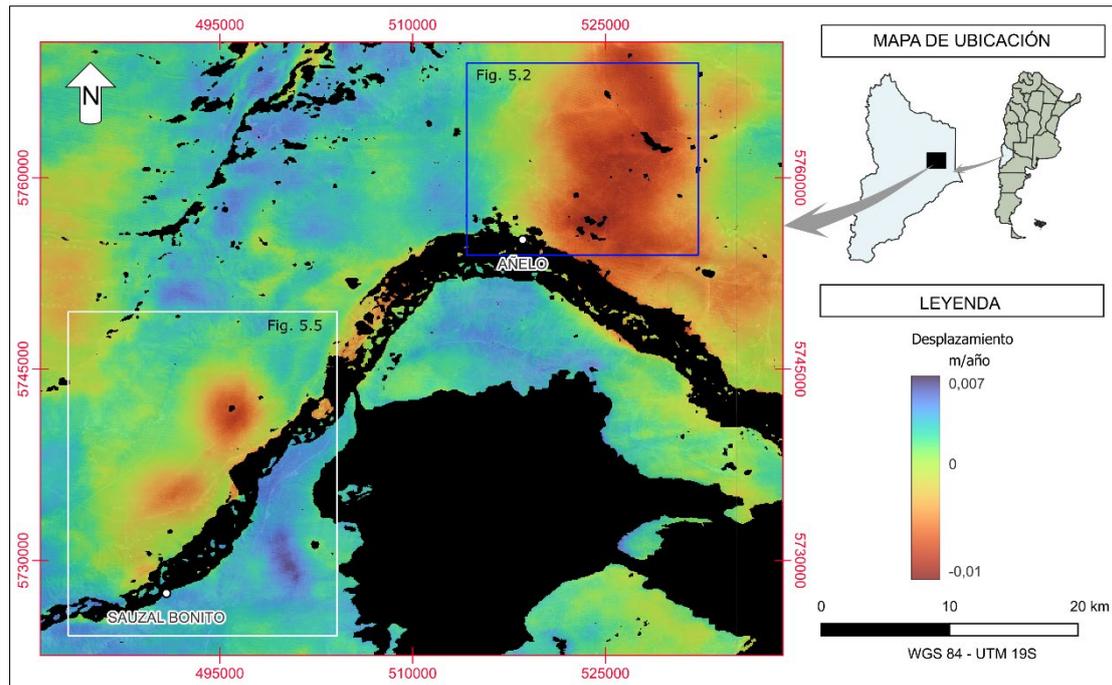
Se recortaron dos áreas de interés, definiéndose dos *shapefile*: uno correspondiente al noreste de la localidad de Añelo y otro al sector ubicado al noroeste de la comunidad de Sauzal Bonito.

Por último, se generaron los mapas de desplazamiento acumulado en la dirección de la LOS, aplicando la máscara de coherencia. Estos mapas se presentan en la sección de resultados.

## 5. RESULTADOS

Una vez aplicada la metodología de trabajo se obtuvieron tres modelos de desplazamientos verticales de la región central de la cuenca Neuquina. Los modelos obtenidos son archivos ráster, donde cada celda contiene un valor promedio de desplazamiento vertical de la superficie, calculado para el período de mayo de 2017 a julio de 2024. La resolución de pixel de los modelos es de 80 m x 80 m.

Además, se obtuvieron las series temporales de desplazamiento acumulado en seis puntos.



**Figura 5.1.** Mapa de desplazamiento vertical en la dirección de la LOS del sector centro-oeste de la cuenca Neuquina. Nótese los recuadros que delimitan las Figuras 5.2 y 5.5, correspondientes al sector noreste de Añelo y al sector norte de Sauzal Bonito.

La **Figura 5.1** muestra los valores de desplazamiento vertical en la dirección de la LOS. El modelo permite identificar principalmente dos áreas con valores negativos, lo que indica un hundimiento de la superficie terrestre. El primer sector, señalado con un recuadro azul, se encuentra al noreste de la localidad de Añelo. Este sector abarca una superficie significativa y, como se observa en la **Figura 5.2**, constituye el foco principal del análisis desarrollado en este trabajo. Por otro lado, el segundo sector, señalado con un recuadro blanco, se localiza al oeste del embalse Los Barreales, en la margen oeste del río Neuquén. Este último sector fue analizado previamente por Tamburini Beliveau *et al.* (2020), análisis que se discutirá más adelante en este trabajo.

### 5.1. Sector noreste de Añelo

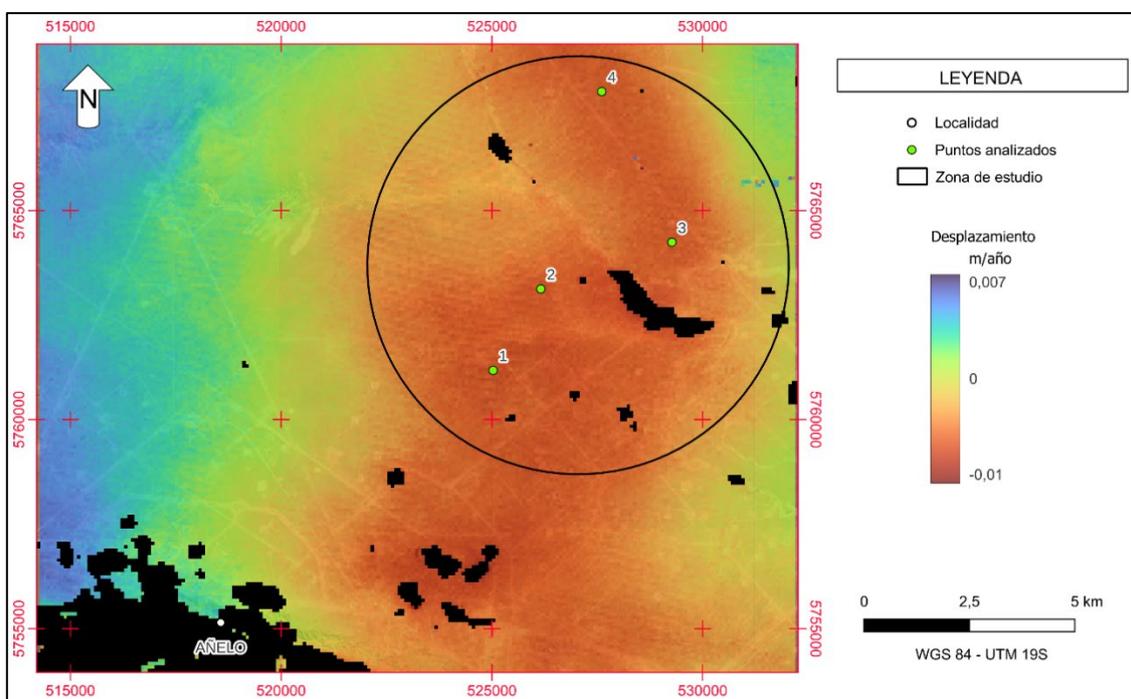
En el área de estudio, se identifica una extensa superficie con una marcada subsidencia, alcanzando valores promedio cercanos a los 7 mm/año (ver **Figura 5.2**).

A continuación, se presenta una tabla que resume los desplazamientos promedio obtenidos en los puntos analizados, incluyendo su ubicación geográfica expresada en coordenadas X e Y.

Punto	Coordenada Y	Coordenada X	Desplazamiento (Velocidad LOS)
1	5761200	525040	-7,1 mm/año
2	5763119	526159	-7,1 mm/año
3	5764239	529280	-7,0 mm/año
4	5767840	527599	-6,7 mm/año

**Tabla 5.1.** Puntos analizados en el área de estudio, con su ubicación y desplazamiento vertical promedio.

Los valores de desplazamiento, representados en las series temporales de la **Figura 5.3**, fueron promediados mensualmente con el objetivo de analizar la distribución del desplazamiento vertical a lo largo del tiempo (véase la **Figura 5.4**).



**Figura 5.2.** Mapa de desplazamiento vertical en la dirección de la LOS correspondiente a la zona noreste de la localidad de Añelo. Se señala el área de estudio y los puntos seleccionados para el análisis.

### Análisis por períodos

2017-2019: Durante este periodo, los cuatro puntos presentan valores de desplazamiento cercanos a cero, con leves oscilaciones. Esta fase puede interpretarse como una etapa de relativa estabilidad, sin evidencias claras de subsidencia sostenida. Se observan pequeñas fluctuaciones que no alcanzan magnitudes significativas, y en algunos casos, como en los puntos 3 y 4, incluso se registran valores positivos (leve elevación).

2019-2021: A partir de 2019, comienza a registrarse una tendencia negativa creciente en los desplazamientos acumulados. En todos los puntos, pero especialmente en los puntos 1 y 2, se evidencia una caída progresiva de los valores, lo que marca el inicio del proceso de subsidencia. En los puntos 3 y 4, la transición es más gradual, aunque igualmente notoria.

2021-2024: Este periodo muestra una aceleración del desplazamiento negativo, con valores que alcanzan entre -60 mm y -80 mm. Todos los puntos reflejan una intensificación clara del proceso de hundimiento, sin señales de reversión. El comportamiento sugiere una consolidación del fenómeno.

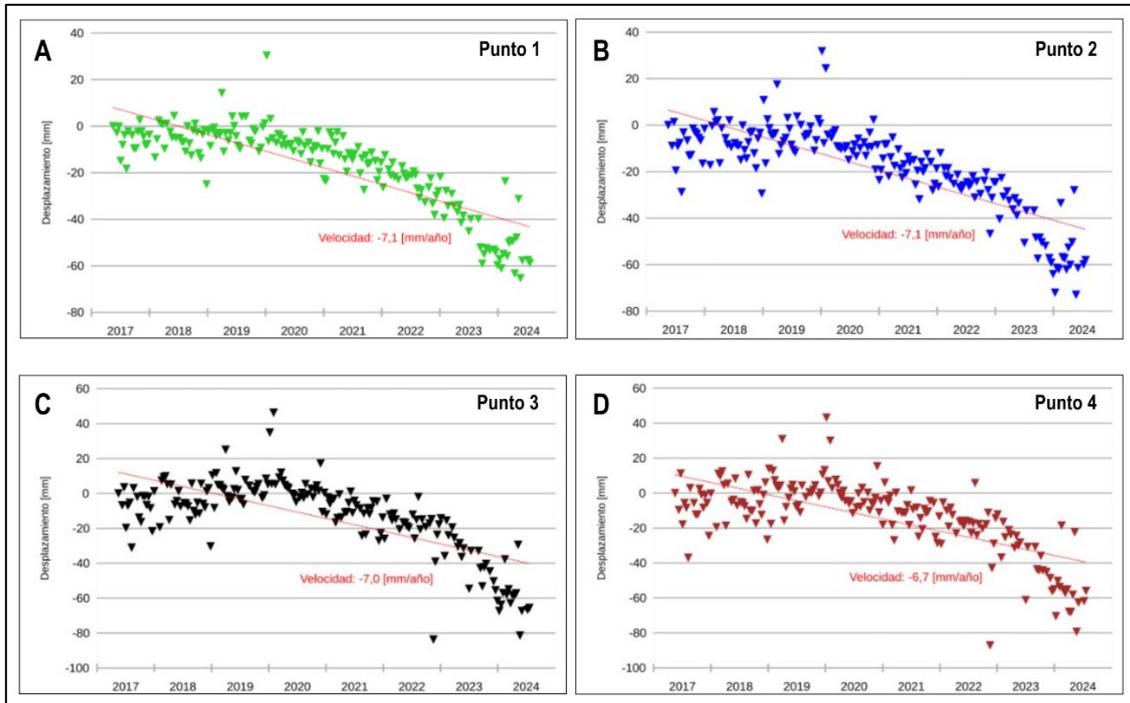


Figura 5.3. Series temporales del desplazamiento vertical, en el sector noreste de Añelo, durante el período mayo 2017 - julio 2024.

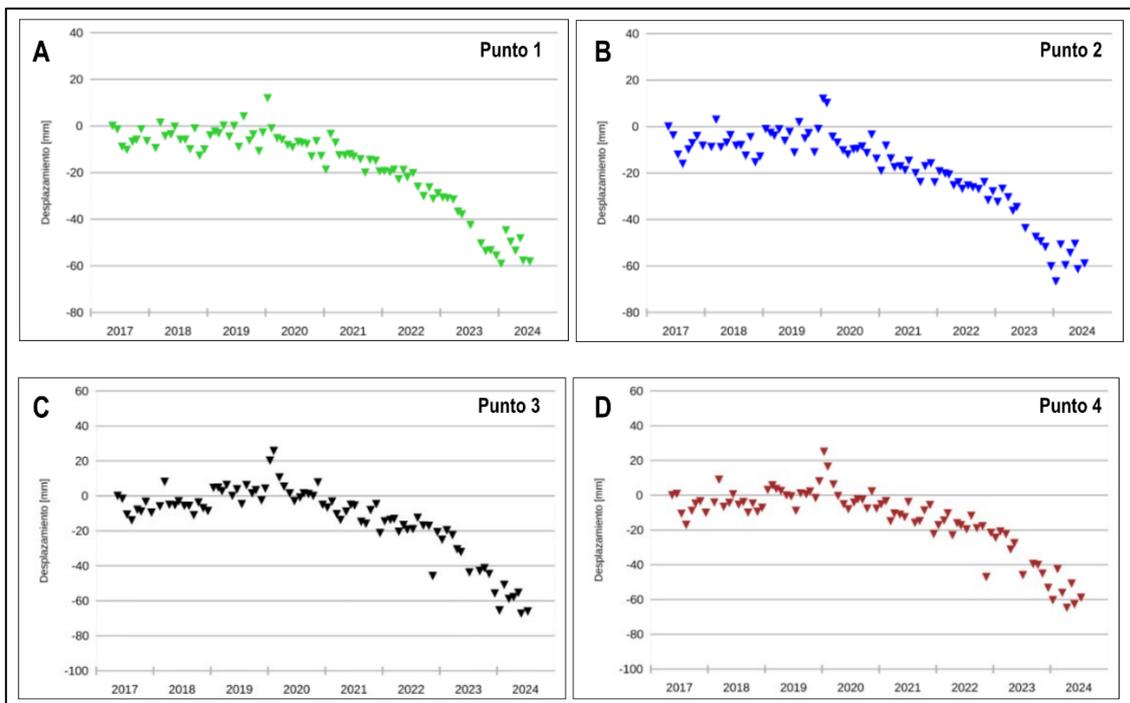


Figura 5.4. Series temporales del desplazamiento vertical mensual promedio, en el sector noreste de Añelo, durante el período mayo 2017 - julio 2024.

En conclusión, el análisis del desplazamiento acumulado de la superficie en el sector noreste de Añelo revela una tendencia predominante a la subsidencia en los cuatro

puntos, con fluctuaciones en períodos específicos. La deformación más significativa se registra en los últimos años, con episodios de recuperación temporal, aunque sin una reversión del proceso de subsidencia.

### 5.2.Sector norte de Sauzal Bonito

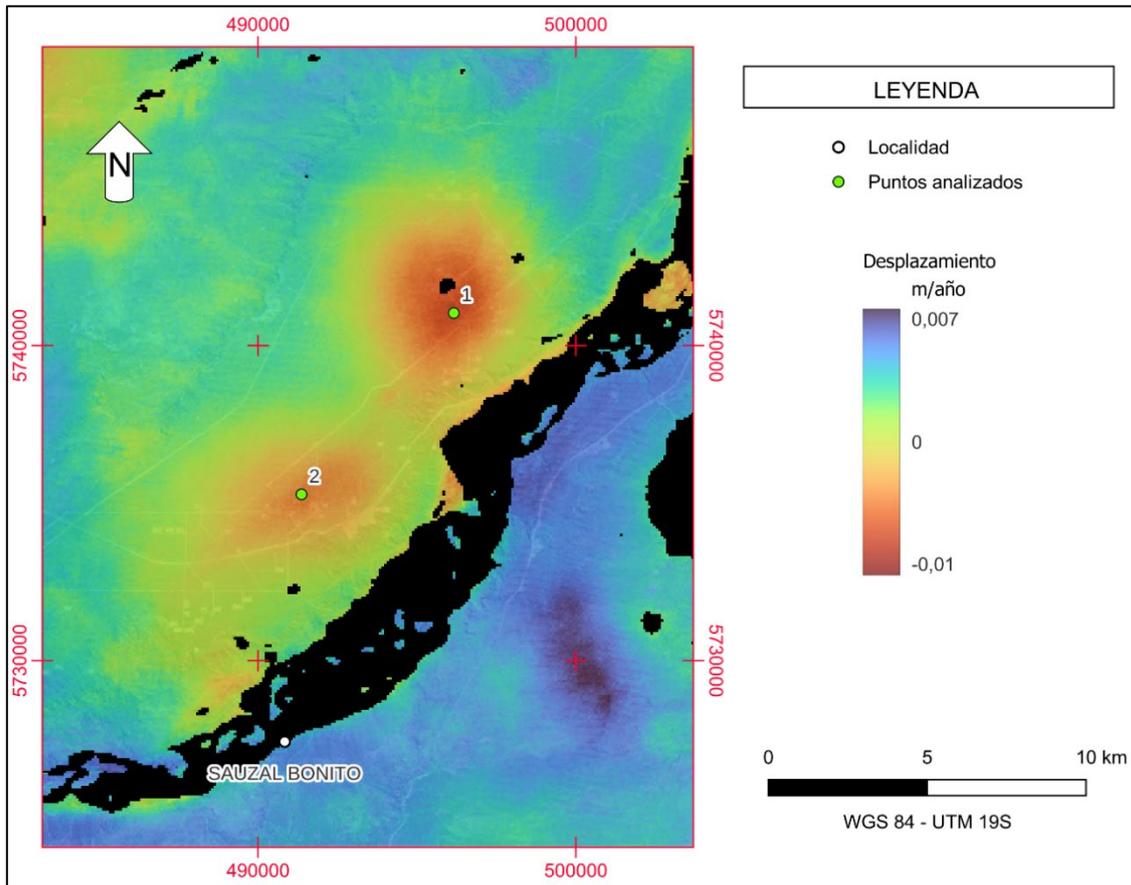


Figura 5.5. Mapa de desplazamiento vertical en la dirección de la LOS correspondiente a la zona norte del paraje Sauzal Bonito. Se señalan los puntos seleccionados para el análisis.

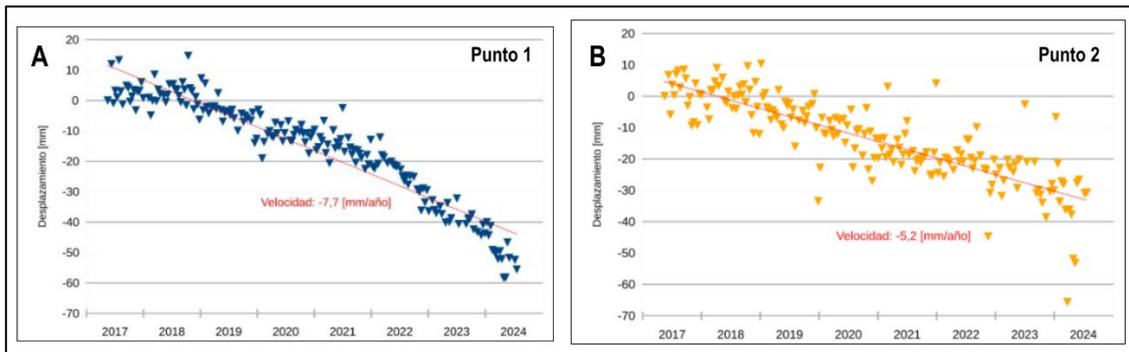
En este sector se identificaron dos áreas con desplazamiento negativo (ver Figura 5.5), las cuales presentan valores promedio de -7,7 mm/año en el punto 1 y -5,2 mm/año en el punto 2, evidenciando subsidencia del terreno (Figura 5.6). Los valores de desplazamiento fueron promediados mensualmente, al igual que en el otro sector, con el objetivo de analizar su comportamiento temporal (véase la Figura 5.7).

Por otro lado, en el sector suroeste se detecta un levantamiento del terreno (solevamiento), con un valor promedio de desplazamiento de 7 mm/año.

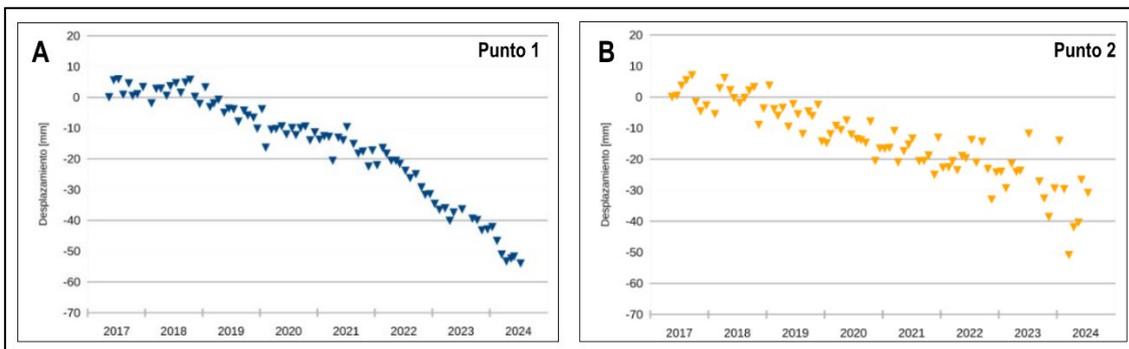
En este trabajo se analizaron las variaciones temporales de desplazamiento en los dos puntos, cuyas posiciones se encuentran listadas en la **Tabla 5.2**.

Punto	Coordenada Y	Coordenada X	Desplazamiento (Velocidad LOS)
1	5741040	496160	-7,7 mm/año
2	5735280	491359	-5,2 mm/año

Tabla 5.2. Puntos analizados en el área norte de Sauzal Bonito, con su ubicación y desplazamiento vertical promedio.



**Figura 5.6.** Series temporales del desplazamiento vertical, en el sector norte de Sauzal Bonito, durante el período mayo 2017 - julio 2024.



**Figura 5.7.** Series temporales del desplazamiento vertical mensual promedio, en el sector noreste de Añelo, durante el período mayo 2017 - julio 2024.

### Análisis por períodos

2017-2019: Durante este periodo, ambos puntos muestran desplazamientos cercanos a cero, con valores ligeramente positivos y negativos. Se observa una estabilidad relativa, sin una tendencia clara a la subsidencia. En el punto 1, los desplazamientos oscilan entre 5 mm y -5 mm. En el punto 2, con una mayor dispersión, se mantiene el mismo comportamiento general, con valores positivos hasta mediados de 2019.

2019-2021: A partir de 2019, comienza a evidenciarse una tendencia descendente continua en ambas curvas. En el punto 1, el desplazamiento acumulado cae progresivamente, alcanzando cerca de -20 mm hacia fines de 2021. El punto 2 presenta una disminución más escalonada pero sostenida, ubicándose en valores cercanos a -25 mm. Este comportamiento indica el inicio de un proceso de subsidencia, sin episodios claros de reversión o recuperación.

2021-2024: En el último tramo de la serie, se observa una aceleración marcada del desplazamiento negativo. En el punto 1, los valores alcanzan aproximadamente -55 mm hacia 2024, con un descenso notorio a partir de 2022. En el punto 2, si bien la pendiente es menos pronunciada, se alcanza un desplazamiento acumulado cercano a -40 mm. Este comportamiento refleja una intensificación del proceso de subsidencia.

En conclusión, el análisis del desplazamiento acumulado en los puntos 1 y 2 confirma una tendencia general a la subsidencia en la zona estudiada.

## 6. DISCUSIONES

Las deformaciones de la superficie de la Tierra asociadas con la recuperación de hidrocarburos han ocurrido en numerosos campos petroleros y gasíferos alrededor del mundo. Estas deformaciones están vinculadas a cambios en la presión de poro y el esfuerzo efectivo de los yacimientos, los cuales pueden inducir compactación o expansión del reservorio (Togaibekov, 2020).

La extracción de fluidos reduce la presión de poro, lo que conlleva a un aumento del esfuerzo efectivo, pérdida de porosidad y compactación del yacimiento. En casos extremos, esta compactación puede traducirse en subsidencia de la superficie terrestre (Sharifi, 2023). Por el contrario, en yacimientos sometidos a inyección de fluidos como agua, vapor o CO<sub>2</sub>, puede producirse una expansión del reservorio (Euillades *et al.*, 2018a).

Entre las principales consecuencias de la compactación de los yacimientos se incluyen la pérdida de porosidad, inestabilidad del pozo, sismicidad inducida, fallas en la infraestructura, colapso de pozos y tuberías, migración no deseada de fluidos y mayor vulnerabilidad a inundaciones (Abija y Abam, 2022; Sharifi, 2023).

Por otro lado, la compactación del yacimiento puede tener ciertos beneficios, como una fracturación hidráulica más efectiva y una mayor producción y recuperación de hidrocarburos (Abija y Abam, 2022). Sin embargo, los impactos negativos de la subsidencia pueden ser severos, generando daños ambientales, estructurales y riesgos para la seguridad humana (Euillades *et al.*, 2018b).

El agotamiento de los yacimientos de hidrocarburos y su impacto ambiental probablemente representará un desafío interesante en las próximas décadas (Sharifi, 2023). Con el envejecimiento de numerosos yacimientos en todo el mundo, resulta crucial profundizar en el estudio de la subsidencia de los yacimientos (Sharifi, 2023), para optimizar estrategias de producción y minimizar sus efectos adversos (Euillades *et al.*, 2018b). En este sentido, los fenómenos de subsidencia pueden constituir herramientas valiosas para la caracterización de reservorios y la localización de nuevas reservas (Euillades *et al.*, 2008).

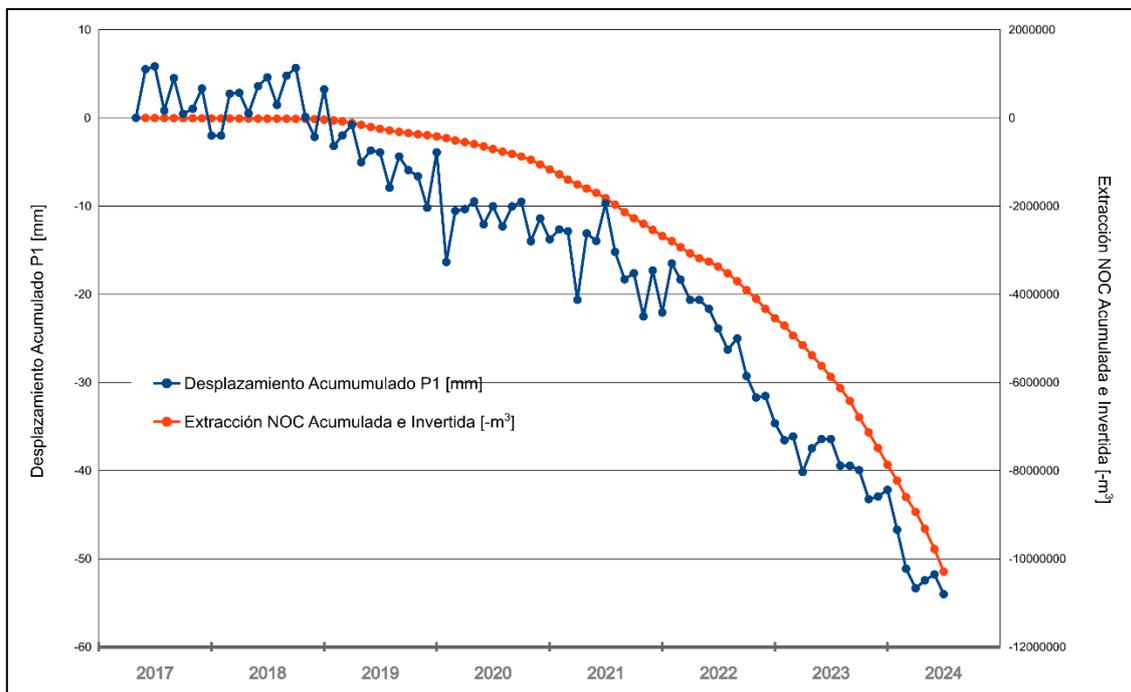
Existen pocos antecedentes que reporten la detección de deformación de la superficie terrestre en yacimientos de petróleo y gas ubicados en cuencas de la Argentina. Considerando que la explotación de petróleo en el país comenzó en la década de 1910, y que muchos yacimientos se explotan desde hace décadas mediante técnicas de recuperación secundaria, resulta llamativo que no se hayan manifestado fenómenos de subsidencia y sollevamiento en algunos de ellos. Es posible que esto se deba a que dichos fenómenos hayan sido de baja magnitud y no provocaron efectos visibles tales como roturas de pozos o instalaciones relacionadas, lo cual pudo no haber llamado la atención lo suficiente como para profundizar en su estudio (Euillades *et al.*, 2018a).

En el caso de la cuenca Neuquina, los resultados de este trabajo indican que en la zona noroeste de la localidad de Añelo, un área de forma irregular y de importante superficie presenta valores de desplazamientos promedios de -7 mm/año (**Figura 5.2**), lo que demuestra que existen cambios en la superficie. Dicha zona afectada, es un área que está

siendo explotada por sus reservorios no convencionales por la empresa YPF, particularmente desde principios del año 2019 (**Figura 4.8**).

Dado que el patrón de deformación de las series temporales en los cuatro puntos seleccionados para este análisis presenta un comportamiento similar (**Figura 5.3**), se optó por el Punto 1 para realizar la correlación con los datos de extracción no convencional.

El grado de correlación entre el desplazamiento acumulado y la extracción no convencional es alto (igual a 0,97), lo que sugiere que existe una relación entre los fenómenos en la zona de estudio (**Figuras 6.1 y 6.2**). Asimismo, los registros de producción de hidrocarburos y fracturamiento indicarían que la principal variable que domina la dinámica del subsuelo en el área es la explotación de hidrocarburos no convencionales (**Figura 4.13**).



**Figura 6.1.** Serie temporal del desplazamiento vertical acumulado en el Punto 1 ubicado al noreste de la localidad de Añelo comparada con el volumen total extraído de petróleo, gas y agua no convencional (NOC). Los valores de volumen extraído han sido invertidos para facilitar la comparación visual.

Además, tal como lo indica la **Figura 6.1**, el incremento en la tasa de subsidencia a partir del año 2021 es coincidente con el período de mayor producción en el área.

Por otro lado, en el sector del yacimiento Fortín de Piedra, ubicado a la vera del río Neuquén, y operado por la empresa Tecpetrol, pueden identificarse dos sectores claramente diferenciados, con valores de desplazamiento vertical negativo, indicando valores de subsidencia promedios de 7,7 y 5,2 mm/año. Comparando los resultados obtenidos con los de Tamburini Beliveau *et al.* (2020) puede observarse un patrón similar para el período 2017-2020, mismas características, con un radio aproximado de 2 km. Estos autores identifican en la zona de hundimiento un alto número de pozos de fractura para el período enero 2017-diciembre 2020. Además, demuestran que los períodos de aceleración y desaceleración concuerdan bien con la reducción y el aumento de las actividades de extracción. Considerando el período enmarcado en este trabajo, la

actividad predominante en términos de cambios de volumen del subsuelo es la extracción de gas no convencional.

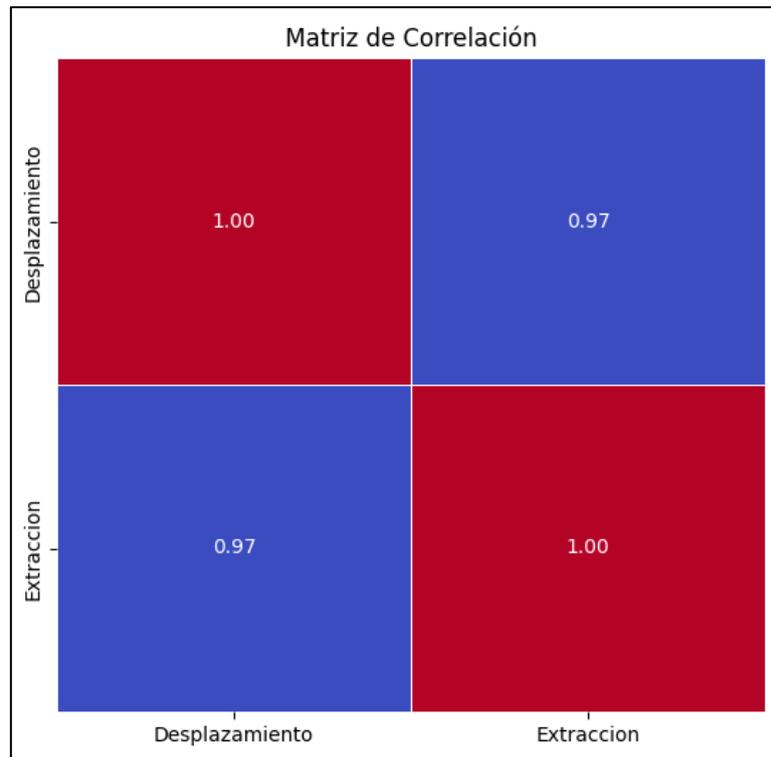


Figura 6.2. Matriz de correlación del desplazamiento vertical acumulado y el volumen de fluidos extraídos.

El área de estudio se localiza en un sector de la cuenca con una evolución estructural compleja, como se observa en las Figuras 3.5 y 3.6. Sin embargo, los resultados obtenidos en este trabajo no permiten establecer una relación clara entre el proceso de subsidencia y el estructuramiento de este sector. La metodología empleada no estuvo orientada específicamente al análisis del efecto de las estructuras sobre el hundimiento, por lo que no es posible dilucidar dicha relación en base a los datos disponibles.

Lo que sí se observa es una fuerte correlación entre los fenómenos de subsidencia y la extracción de grandes volúmenes de hidrocarburos, lo que sugiere que posibles cambios en el campo de esfuerzos del yacimiento, inducidos por esta actividad, podrían constituir un factor dominante en la dinámica del subsuelo. No obstante, no se descarta que la estructuración regional pueda tener alguna participación, por lo cual se considera recomendable realizar estudios adicionales que permitan comprender con mayor detalle el rol de las estructuras en los mecanismos de subsidencia.

En síntesis, el análisis de estas áreas ha demostrado que existe una clara relación entre las actividades de extracción de hidrocarburos y el desplazamiento de la superficie del terreno.

## 7. CONCLUSIONES

En relación con los objetivos planteados, se logró realizar un análisis de la deformación superficial en la región noreste de Añelo mediante la técnica DInSAR. A continuación, se enumeran las conclusiones de este trabajo.

- El análisis de series temporales reveló una tasa promedio de subsidencia de 7 mm/año en el área noroeste de Añelo, alcanzando una deformación acumulada próxima a los 60 mm durante el período comprendido entre mayo de 2017 y julio de 2024.
- Los resultados obtenidos sugirieron una clara relación entre la subsidencia y la extracción de hidrocarburos en la región, con una intensificación a partir de 2021.
- La aplicación de la técnica DInSAR ha demostrado ser una herramienta eficaz, replicable y de bajo costo para el monitoreo y cuantificación de la deformación superficial.
- Los resultados obtenidos evidencian el gran potencial de las imágenes SAR para la detección y cuantificación de movimientos de la superficie terrestre de forma masiva y sobre áreas extensas.
- La combinación de *software* de código abierto con datos satelitales de libre acceso refuerza la viabilidad de esta técnica para el análisis de deformaciones superficiales y la gestión de riesgo en zonas susceptibles a procesos de deformación del terreno.

## 8. REFERENCIAS

- Abija, F.A. y Abam, T.K.S.** 2022. Predicting Ground Subsidence Due to Long Term Oil/Gas Production in A Niger Delta Basin, Nigeria: Implications for CO2 EOR and Geosequestration. Research Square. <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-357959/v2>
- Alaska Satellite Facility.** s.f.-a. Introduction to SAR. NASA ASF. Recuperado de [https://hyp3-docs.asf.alaska.edu/guides/introduction\\_to\\_sar/](https://hyp3-docs.asf.alaska.edu/guides/introduction_to_sar/)
- Alaska Satellite Facility.** s.f.-b. HyP3 Documentation. NASA ASF. Recuperado de <https://hyp3-docs.asf.alaska.edu/>
- Alaska Satellite Facility.** s.f.-c. OpenSARLab Documentation. NASA ASF. Recuperado de <https://opensarlab-docs.asf.alaska.edu/>
- Allen, P.A. y Allen, J.R.** 2013. Basin Analysis: Principles and Application to Petroleum Play Assessment. John Wiley & Sons, 632p.
- Arbiol, R., Palá, V., Pérez, F., Castillo, M. y Crosetto, M.** 2001. Aplicaciones de la tecnología InSAR a la cartografía. Teledeteccion, Medio Ambiente y Cambio Global, 653-658.
- Basaldúa, A.** 2018. Geología del sector de la Sierra Auca Mahuida, departamentos de Añelo y Peuhennes, provincia del Neuquén. Tesis de Licenciatura. Universidad de Buenos Aires, 161p.
- Bagheri Gavkosh, M., Hosseini, S.M., Ataie Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimian, H., Morovat, F. y Ashrafi, S.** 2021. Land subsidence: A global challenge. Science of The Total Environment, 778, 146193, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146193>
- Benardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. y Sansosti, E.** 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(11), 2375-2383. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
- Casadío, S. y Montagna, A.O.** 2015. Estratigrafía de la Cuenca Neuquina. En: Casadío, S., Ponce, J.J., Montagna, A.O. y Carmona, N. (eds.), Geología de la Cuenca Neuquina y sus sistemas petroleros: una mirada integradora desde los afloramientos al subsuelo. Fundación YPF-Universidad Nacional de Río Negro, 8-21.
- Copernicus.** s.f.. Sentinel Wiki. Recuperado de <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s1-mission>
- Correa Otto, S.A., Nacif Suvire, S.V., Pesce, A., Nacif, A.A., Gianni, G.M., Furlani, R., Giménez, M. y Nacif, A.** 2018. Intraplate seismicity recorded by a local network in the Neuquén Basin, Argentina. Journal of South American Earth Sciences, 87, 211-220. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.12.007>
- Cristallini, E., Tomezzoli, R., Pando, G., Gazzera, C., Martínez, J., Quiroga, J., Buhler, M., Bechis, F., Barredo, S. y Zambrano, O.** 2009. Controles precuycanos en la estructura de la Cuenca Neuquina. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 65(2), 248-264.
- Derauw, D.M., d'Oreye, N., Jaspard, M., Caselli, A.T. y Samsonov, S.** 2020. Ongoing automated ground deformation monitoring of Domuyo - Laguna del Maule area (Argentina) using Sentinel-1 MSBAS time series: Methodology description and first observations for the period 2015-2020. Journal of South American Earth Sciences, 104, 102850, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102850>
- Digregorio, J.H., Gulisano, C.A., Gutiérrez Pleimling, A.R. y Minniti, S.A.** 1984. Esquema de la evolución geodinámica de la Cuenca Neuquina y sus implicancias paleogeográficas. 9º Congreso Geológico Argentino, Bariloche, Actas, 1, 174-162.
- ESA.** 2014. Sentinel-1 radar visión. Recuperado de [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2014/01/Sentinel-1\\_radar\\_vision](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2014/01/Sentinel-1_radar_vision)
- Euillades, P.A., Blanco, M. y Euillades, L.D.** 2008. Caracterización de fenómenos deformativos mediante imágenes de radar: potenciales aplicaciones en el campo petrolero. 7º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Instituto Argentino del Petróleo y Gas, Mar del Plata.

- Euillades, L.D., Euillades, P.A., Isuani, N., Noguerol, M. y Rosell P.** 2018a. Solevamientos y subsidencia superficial vinculados a la operación de yacimientos de petróleo y gas. Casos de estudio en Argentina. 10° Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Instituto Argentino de Petróleo y Gas, Mendoza.
- Euillades, L.D., Euillades, P.A., Noguerol, M., Isuani, N. y Rosell, P.** 2018b. Caracterización de campos de deformación cortical mediante información geo-espacial. 10° Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Instituto Argentino de Petróleo y Gas, Mendoza.
- Ferretti, A., Monti, Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F. y Massonet, D.** 2007. InSAR principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. ESA Publications. Netherlands, 252p.
- Fielding, E.J., Blom, R.G. y Goldstein, R.M.** 1998. Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry. *Geophysical research letters*, 25(17), 3215-3218. <http://dx.doi.org/10.1029/98GL52260>
- Figuroa Miranda, S., Tuxpan Vargas, J., Ramos Leal, J.A., Hernández Madrigal, V.M. y Villaseñor Reyes, C.I.** 2018. Land subsidence by groundwater over-exploitation from aquifers in tectonic valleys of Central Mexico: A review. *Engineering Geology*, 246, 91-106. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.09.023>
- Franzese, J.R. y Spalletti, L.A.** 2001. Late Triassic-early Jurassic continental extension in southwestern Gondwana: tectonic segmentation y pre-break-up rifting. *Journal of South American Earth Sciences*, 14, 257-270. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(01\)00029-3](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(01)00029-3)
- Franzese, J.R, Spalletti, L.A, Gómez Pérez, I. y Macdonald, D.** 2003. Tectonic and paleoenvironmental evolution of Mesozoic sedimentary basins along the Andes foothills of Argentina (32°- 54°S). *Journal of South American Earth Sciences*, 16, 81-90. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(03\)00020-8](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(03)00020-8)
- Fredrich, J.T., Arguello, J.G., Deitrick, G.L. y de Rouffignac, E.P.** 2000. Geomechanical modeling of reservoir compaction, surface subsidence, and casing damage at the Belridge diatomite field. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 3(04), 348-359. <http://dx.doi.org/10.2118/65354-PA>
- Freije, H., Azúa, G., González, R., Ponce, J.J. y Zavala, C.** 2002. Actividad tectónica sinsedimentaria en el Jurásico del sur de la Cuenca Neuquina. 5° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Instituto Argentino de Petróleo y Gas, Mar del Plata.
- Geertsma, J.** 1973. Land subsidence above compacting oil and gas reservoirs. *Journal of petroleum technology*, 25(06), 734-744. <https://doi.org/10.2118/3730-PA>
- Geoscience Australia.** 2017. Interferometric Synthetic Aperture Radar. Recuperado de <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/positioning-australia/geodesy/geodetic-techniques/interferometric-synthetic-aperture-radar>
- Gulisano, C.A.** 1981. El Ciclo Cuyano en el norte del Neuquén y sur de Mendoza. 8° Congreso Geológico Argentino, Buenos Aires, Actas, 3, 579-592.
- Gulisano, C.A., Gutiérrez Pleimling, A.R. y Digregorio, R.E.** 1984. Esquema estratigráfico de la secuencia jurásica al oeste de la provincia del Neuquén. 9° Congreso Geológico Argentino, Bariloche, Actas, 1, 236-259.
- Howell, J.A., Schwarz, E., Spalletti, L.A. y Veiga, G.D.** 2005. The Neuquén Basin: an overview. En: Veiga, G.D., Spalletti, L.A., Howell, J.A. y Schwarz, E. (eds.), *The Neuquén Basin, Argentina: A Case Study in Sequence Stratigraphy and Basin Dynamics*. Geological Society London, Special Publication, 252, 1-14. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.2005.252.01.01>
- Leanza, H.A., Sattler, F., Martinez, R.S. y Carbone, O.** 2011. La Formación Vaca Muerta y equivalentes (Jurásico Tardío - Cretácico Temprano) en la Cuenca Neuquina. En: Leanza, H.A., Arregui, C. y Carbone, O. (eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*. 18° Congreso Geológico Argentino, Neuquén, Relatorio, 113-129.
- Legarreta, L. y Gulisano, C.A.** 1989. Análisis estratigráfico secuencial de la Cuenca Neuquina (Triásico superior-Terciario inferior). En: Chebli, G. y Spalletti, L.A. (eds.), *Cuencas Sedimentarias Argentinas. Serie Correlación Geológica*, Universidad Nacional de Tucumán, 6, 221-243.

**Legarreta, L. y Uliana, M.A.** 1999. El Jurásico y Cretácico de la Cordillera Principal y la Cuenca Neuquina. En: Caminos, R. (ed.), Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales 29, 339-416.

**Lewandowski, A.** 2023. Jump-Start SAR Data Analysis in the Cloud with ASF OpenSARLab. Alaska Satellite Facility. Recuperado de [https://www.earthdata.nasa.gov/s3fs-public/2023-01/ASF\\_OpenSARLab\\_Webinar\\_1\\_25\\_23.pdf](https://www.earthdata.nasa.gov/s3fs-public/2023-01/ASF_OpenSARLab_Webinar_1_25_23.pdf)

**Massonnet, D. y Feigl, K.** 1998. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's Surface. Reviews of geophysics, 36(4), 441-500. <http://dx.doi.org/10.1029/97RG03139>

**Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K. y Rabaute, T.** 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. Nature, 364(6433), 138-142. <https://doi.org/10.1038/364138a0>

**Messenger, G., Nivière, B., Martinod, J., Lacan, P. y Xavier, J.P.** 2010. Geomorphic evidence for Plio-Quaternary compression in the Andean foothills of the southern Neuquén Basin, Argentina. Tectonics, 29(4). <https://doi.org/10.1029/2009TC002609>

**Messenger, G., Huyghe, D., Bonnel, C., Nivière, B. y Fasentieux, B.** 2023. The Neogene to Quaternary evolution of the Neuquén Andes broken foreland forced by tectonic, climatic and surface processes (southern Central Andes). Journal of South American Earth Sciences, 131, 104620. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104620>

**Meyer, F.** 2019. Spaceborne Synthetic Aperture Radar: Principles, data access, and basic processing techniques. En: Flores, A., Herndon, K., Thapa, R y Cherrington, E. (eds.), The Synthetic Aperture Radar (SAR) Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation. NASA, 21-64.

**Meyer, F.K., Flores, A., Martín, V., Anderson, E. y Cherrington, E.** 2021. Introducción al Radar de Apertura Sintética para Aplicaciones en Ecosistemas. ESA. EO Open Science. Recuperado de [https://eo4society.esa.int/wp-content/uploads/2021/11/NASA-SERVIR\\_SAR-Ecosistemas.pdf](https://eo4society.esa.int/wp-content/uploads/2021/11/NASA-SERVIR_SAR-Ecosistemas.pdf)

**Minisini, D., Fryklund, B., Gerali, F. y Fantín, M.** 2020. The first economical unconventional play outside North America: Context, History, and "Coopetition". En: Minisini, D., Fantín, M., Lanusse Noguera, I. y Leanza, H.A. (eds.), Integrated geology of Unconventionals: The case of the Vaca Muerta play, Argentina. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 121: 1-24.

**MintPy.** s.f. MintPy User Guide. Recuperado de <https://mintpy.readthedocs.io/en/latest/>

**Nemiña, F. y Zajc, T.** 2022. Curso Teledetección SAR - Nivel Introductorio. CONAE.

**NASA EarthData.** s.f.-a. Active Instruments. Recuperado de <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/earth-observation-data-basics/remote-sensing/active-instruments>

**NASA EarthData.** s.f.-b. Synthetic Aperture Radar (SAR). Recuperado de <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/earth-observation-data-basics/sar>

**Otharán, G.** 2020. Sedimentología y análisis de facies de la Formación Vaca Muerta (Tithoniano-Valanginiano), Cuenca Neuquina. El rol de los flujos de fango en la depositación de espesas sucesiones de lutitas. Tesis Doctoral (inérita). Universidad Nacional del Sur, 439p.

**Pángaro, F., Martínez, R., Sattler, F. y Bettini, F.** 2011a. El Bajo de Añelo. En: Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C., Vallés, J.M. (eds.), Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén. 18° Congreso Geológico Argentino, Neuquén, Relatorio, 399-405.

**Pángaro, F., Martínez, R., Sattler, F. y Bettini, F.** 2011b. El flanco oriental. En: Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C., Vallés, J.M. (eds.), Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén. 18° Congreso Geológico Argentino, Neuquén, Relatorio, 407-418.

**Prokopovich, N.P.** 1986. Classification of land subsidence by origin. IAHS-AISH publication, 151, 281-290.

**Ramos, V.A.** 1999. Evolución Tectónica de la Argentina. En: Caminos, R. (ed.), Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales 29, 715-759.

**Ramos, V.A. y Folguera, A.** 2005. Tectonic evolution of the Andes of Neuquén: Constraints derived from the magmatic arc and foreland deformation. En: Veiga, G.D., Spalletti, L.A., Howell, J.A. y Schwarz, E. (eds.), The Neuquén Basin: A case study in sequence stratigraphy and basin dynamics. Geological Society, Special Publications, 252, 15-35. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.2005.252.01.02>

**Ramos, V.A., Folguera, A. y García Morabito, E.** 2011. Las provincias geológicas del Neuquén. En: Leanza, H.A., Arregui, C. y Carbone, O. (eds.), Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén. 18° Congreso Geológico Argentino, Neuquén, Relatorio, 317-326.

**Ramos, V.A., Naipauer, M., Leanza, H.A. y Sigismondi, M.E.** 2020. An exceptional tectonic setting along the Andean continental margin. En: Minisini, D., Fantín, M., Lanusse Noguera, I. y Leanza, H.A. (eds.), Integrated geology of Unconventionals: The case of the Vaca Muerta play, Argentina. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 121: 25-38.

**Raspini, F., Caleca, F., del Soldato, M., Festa, D., Confuorto, P. y Bianchini, S.** 2022. Review of satellite radar interferometry for subsidence analysis. Earth-Science Reviews, 235, 104239, 1-39. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104239>

**Richards, J.A.** 2009. Remote Sensing with Imaging Radar. Springer. Alemania, 361p.

**Rodríguez, M.F., Leanza, H.A. y Salvarredy Aranguren, M.** 2007. Hoja Geológica 3969-II Neuquén, provincias del Neuquén, Río Negro y La Pampa. SEGEMAR, Buenos Aires, 165p.

**Rosen, P.A., Hensley, S., Joughin, I.R., Li, F.K., Madsen, S.N., Rodríguez, E. y Goldstein, R.M.** 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry. Proceedings of the IEEE, 88(3), 333-382. <http://dx.doi.org/10.1109/5.838084>

**Schindler, S., Hegemann, F., Koch, C., König M. y Mark P.** 2016. Radar interferometry based settlement monitoring in tunnelling: Visualisation and accuracy analyses. Visualization in Engineering, 4, 1-16. <http://dx.doi.org/10.1186/s40327-016-0034-x>

**Schioma, M., Hinterwimmer, G. y Vergani, G.** 2002. Rocas reservorio de las cuencas productivas de la Argentina. Simposio del 5° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Instituto Argentino del Petróleo y Gas. Mar del Plata, 778p.

**Segall, P., Grasso, J.R. y Mossop, A.** 1994. Poroelastic stressing and induced seismicity near the Lacq gas field, southwestern France. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 99(B8), 15423-15438. <http://dx.doi.org/10.1029/94JB00989>

**Sharifi, J.** 2023. Evaluation of reservoir subsidence due to hydrocarbon production based on seismic data. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 13(12), 2439-2456. <http://dx.doi.org/10.1007/s13202-023-01678-3>

**Tamburini Beliveau, G., Grosso Heredia, J.A., Béjar Pizarro, M., Pérez López, R., Portela, J., Cismondi Duarte, M. y Monserrat, O.** 2022. Assessment of ground deformation and seismicity in two areas of intense hydrocarbon production in the Argentinian Patagonia. Nature, 12(19198), 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23160-6>

**Togaibekov, A.Z.** 2020. Monitoring of Oil-Production-Induced Subsidence and Uplift. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Massachusetts, 101p.

**Tomás, R., Herrera, G., Delgado, J. y Peña, F.** 2009. Subsistencia del terreno. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 17(3), 295-302.

**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., Huhler, M. y Rostan, F.** 2012. GMES Sentinel-1 mission. Remote sensing of environment, 120, 9-24. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>

**TREE ALTAMIRA.** s.f.. InSAR AT A GLANCE. Recuperado de <https://site.tre-altamira.com/insar/>

**Uliana, M., K. Biddle y Cerdán, J.** 1989. Mesozoic extension and the formation of Argentina sedimentary basins. En: Tankard, A.J y Balkwill, H.R. (eds.), *Extensional Tectonics and Stratigraphy of the North Atlantic Margin*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 46, 599-613.

**Vásquez, J., Spagnotto, S.L, Mescua, J.F., Giambiagi, L.B. y Sigismondi, M.** 2020. Aumento notorio de la sismicidad de la provincia del Neuquén, en el período 2015-2020. *Asociación Geológica Argentina, Boletín Brackebuschiano*, 2020(2), 9-17.

**Vergani, G.D., Tankard, A.J., Belotti, H.J. y Welsink, H.J.** 1995. Tectonic evolution and paleogeography of the Neuquén Basin, Argentina. En: Tankard, A.J., Suárez Soruco, R. y Welsink, H.J. (eds.), *Petroleum Basins of South America*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 62, 383-402.

**Yrigoyen, M.R.** 1991. Hydrocarbon resources of Argentina. 13° World Petroleum Congress, *Petrotecnica, Special Issue 13*, 38-54.

**Zavala, C.A. y Freije, H.** 2002. Cuñas clásticas jurásicas vinculadas a la Dorsal de Huincul. Un ejemplo del área Picún Leufú. *Cuenca Neuquina, Argentina*. 5° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Instituto Argentino de Petróleo y Gas, Mar del Plata.

**Zebker, H.A. y Villasenor, J.** 1992. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 30(5), 950-959. <https://doi.org/10.1109/36.175330>

## **9. ANEXOS**

## ANEXO 1. Datos de producción de la cuenca Neuquina

### Producción de petróleo convencional y no convencional

Año	Producción convencional [m³]	Shale oil [m³]	Tight oil [m³]
2009	14760863.98	1775.78	54962.44
2010	14270499.49	1706.63	50091.56
2011	13462111.81	13495.78	75693.16
2012	12755457.47	30646.72	133384.31
2013	12407406.55	85678.39	152393.90
2014	11284387.58	885092.95	145419.11
2015	10930687.37	1249082.11	184698.65
2016	10090083.85	1706656.67	304120.61
2017	9052788.47	2131412.53	409026.67
2018	8408035.95	3253191.91	480126.36
2019	7959984.07	5170269.24	439249.24
2020	6663138.90	6533617.47	343628.84
2021	6364625.61	9268224.54	295504.03
2022	5890511.89	14050729.06	306350.62
2023	5776109.58	17710584.37	282629.35

Tabla 9.1.1. Datos de producción de petróleo convencional y no convencional de la cuenca Neuquina para el período 2009-2023. Fuente: Ministerio de Economía de la República Argentina, Secretaria de Energía.

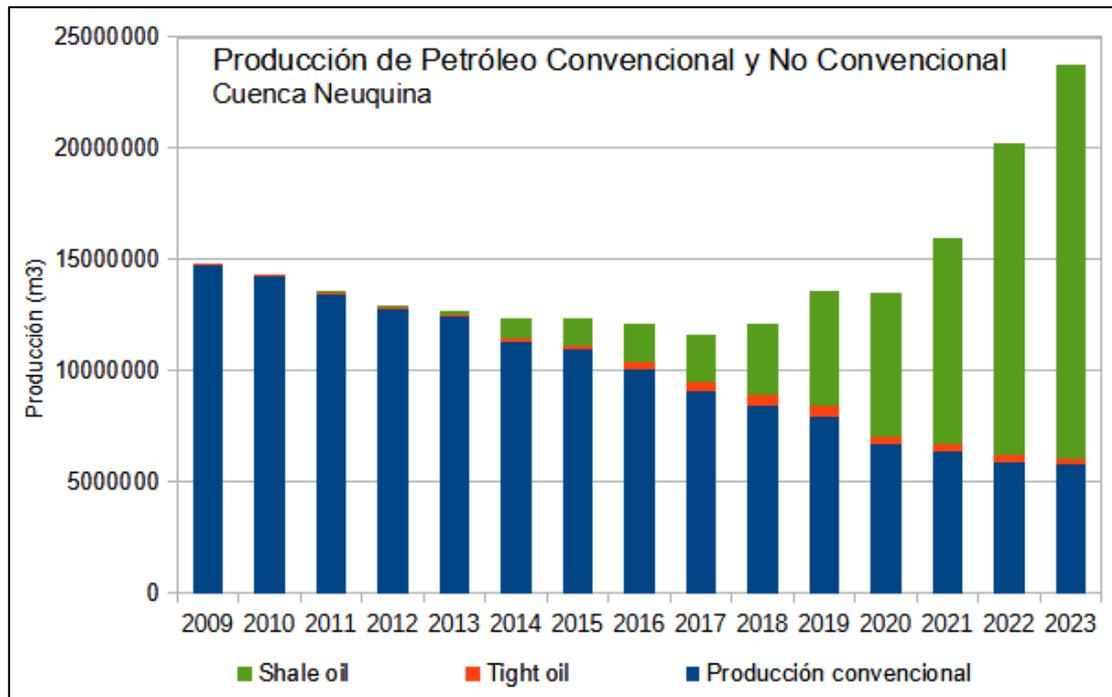


Figura 9.1.1. Datos de producción de petróleo convencional y no convencional de la cuenca Neuquina para el período 2009-2023. Fuente: Ministerio de Economía de la República Argentina, Secretaria de Energía.

### Producción de gas convencional y no convencional

	Producción convencional [Mm³]	Shale gas [Mm³]	Tight gas [Mm³]
2009	26007972.89	1000.40	960725.54
2010	24842153.67	1091.96	1135521.50

2011	23549594.68	3668.93	1615366.36
2012	21783408.72	11692.40	2062651.27
2013	20321433.72	33916.35	2287107.63
2014	19009151.65	459641.18	3748466.36
2015	18301832.31	981771.83	5354486.48
2016	17512466.09	1172534.84	7351854.16
2017	15562538.25	2139956.15	8652395.09
2018	12631416.52	6714472.64	9055634.02
2019	10878917.08	11503221.83	8374636.89
2020	9580188.28	10952422.49	7156292.49
2021	8615739.36	13209263.78	7107730.48
2022	7526873.63	18105653.03	7352947.44
2023	6371776.18	21000936.93	5982680.04

Tabla 9.1.2. Datos de producción de gas convencional y no convencional de la cuenca Neuquina para el período 2009-2023. Fuente: Ministerio de Economía de la República Argentina, Secretaría de Energía.

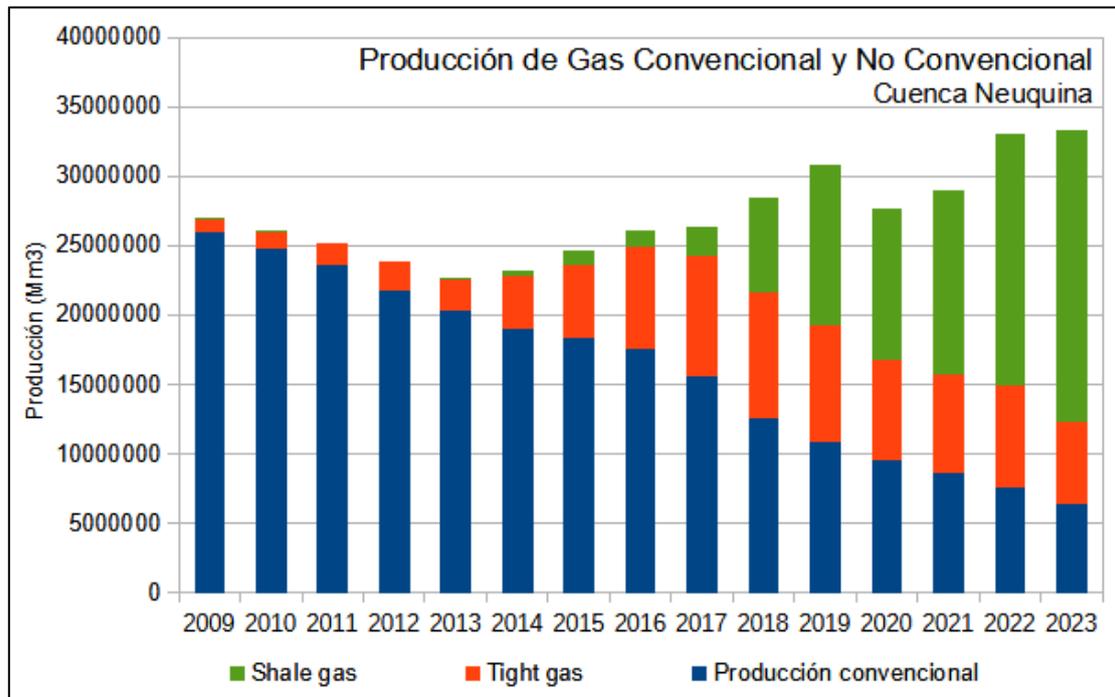


Figura 9.1.2 Datos de producción de gas convencional y no convencional de la cuenca Neuquina para el período 2009-2023. Fuente: Ministerio de Economía de la República Argentina, Secretaría de Energía.

## ANEXO 2. Datos de producción de pozos de gas y petróleo de Argentina

---

<a href="#">Producción mensual de gas y petróleo de pozos de Argentina en el año 2016</a>
<a href="#">Producción mensual de gas y petróleo de pozos de Argentina en el año 2017</a>
<a href="#">Producción mensual de gas y petróleo de pozos de Argentina en el año 2018</a>
<a href="#">Producción mensual de gas y petróleo de pozos de Argentina en el año 2019</a>
<a href="#">Producción mensual de gas y petróleo de pozos de Argentina en el año 2020</a>
<a href="#">Producción mensual de gas y petróleo de pozos de Argentina en el año 2021</a>
<a href="#">Producción mensual de gas y petróleo de pozos de Argentina en el año 2022</a>
<a href="#">Producción mensual de gas y petróleo de pozos de Argentina en el año 2023</a>
<a href="#">Producción mensual de gas y petróleo de pozos de Argentina en el año 2024</a>

---

**Tabla 9.2.1.** Producción de petróleo y gas por pozo (Capítulo IV), del período 2015 - 2024. Fuente: Ministerio de Economía de la República Argentina, Secretaria de Energía.

## **ANEXO 3. Datos de fractura de pozos de hidrocarburos de Argentina**

---

### Datos de fractura de pozos de hidrocarburos

---

**Tabla 9.3.1.** Datos de fractura de pozos de hidrocarburos (Adjunto IV). Fuente: Ministerio de Economía de la República Argentina, Secretaria de Energía.

#### ANEXO 4. Estimación de volumen de arena de fractura inyectada

Las cantidades de arena inyectada en las fracturas de pozos son expresadas en toneladas. Para estimar el volumen total inyectado en las operaciones de fractura hidráulica, fue necesario convertir los volúmenes de área a metros cúbicos ( $m^3$ ). Para ello, se consideró una densidad típica de arena utilizada en fractura,  $1,5 \text{ g/cm}^3$ , equivalente a  $1,5 \text{ tn/m}^3$ . A partir de la relación básica de la densidad, que define la relación entre la masa y el volumen, se empleó la siguiente expresión:

$$V = \frac{M}{\rho} \quad (1)$$

Donde:

**V** es el volumen,

**M** es la masa,

**$\rho$**  es la densidad.

Sustituyendo en la ecuación (1) el valor de la densidad típica de arena de fractura, se obtuvo:

$$V = \frac{\text{masa (tn)}}{1,5 \frac{\text{tn}}{\text{m}^3}} \quad (2)$$

Mediante la ecuación (2), se estimaron los volúmenes de arena de inyectadas.

## ANEXO 5. Estimación de volumen de gas desplazado del reservorio

Los valores de producción de gas analizados están expresados en miles de m<sup>3</sup> [Mm<sup>3</sup>] bajo condiciones estándar de presión y temperatura. Con el fin de estimar el volumen real desplazado desde el reservorio, dichos valores fueron convertidos a unidades de volumen en m<sup>3</sup> utilizando la ecuación de los gases ideales, que se expresa como:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Donde:

**P** es la presión,

**V** es el volumen,

**n** es el número de moles de gas,

**R** es la constante de los gases ideales,

**T** es la temperatura.

En este trabajo, se estimó el volumen desplazado del reservorio (**V<sub>prof</sub>**) a partir del volumen de producción (**V<sub>sup</sub>**), considerando como caso de estudio la formación Vaca Muerta, situada aproximadamente 3000 m de profundidad.

Los parámetros empleados son los siguientes:

**P<sub>sup</sub>** es la presión estándar en superficie,

**T<sub>sup</sub>** es la temperatura estándar en superficie,

**V<sub>sup</sub>** es el volumen producido en condiciones estándar,

**T<sub>prof</sub>** es la temperatura en condiciones de reservorio,

**P<sub>prof</sub>** es la presión en condiciones de reservorio.

Expresión derivada de la ley de los gases ideales:

$$P_{sup} \cdot V_{sup} = n \cdot R \cdot T_{sup} \quad (1)$$

Mediante la ecuación (1), se obtuvieron las expresiones para el volumen en condiciones estándar y en condiciones de reservorio:

$$V_{sup} = \frac{n \cdot R \cdot T_{sup}}{P_{sup}} \quad (2)$$

$$V_{prof} = \frac{n \cdot R \cdot T_{prof}}{P_{prof}} \quad (3)$$

Dividiendo miembro a miembro la ecuación (3) por la ecuación (2), se obtuvo la relación:

$$\frac{V_{prof}}{V_{sup}} = \frac{T_{prof} \cdot P_{sup}}{T_{sup} \cdot P_{prof}} \quad (4)$$

Finalmente, despejando **V<sub>prof</sub>**, se obtuvo la siguiente expresión para la conversión:

$$V_{\text{prof}} = \frac{V_{\text{sup}} \cdot T_{\text{prof}} \cdot P_{\text{sup}}}{T_{\text{sup}} \cdot P_{\text{prof}}} \quad (5)$$

**Cálculo de factor de compresibilidad volumétrica**

La conversión de volumen se realizó mediante la ecuación (5) derivada de la ley de los gases ideales, utilizando los siguientes parámetros:

$$T_{\text{sup}} = (20 \text{ °C}) + 273,15 = 293,15 \text{ K},$$

$$P_{\text{sup}} = 1 \text{ atm} = 14,7 \text{ psi},$$

$V_{\text{sup}}$  = es el volumen producido en condiciones estándar en superficie,

$$T_{\text{prof}} = (110 \text{ °C}) + 273,15 = 383,15 \text{ K (considerando un gradiente geotérmico típico en áreas de tectónica activa y alta generación térmica de 30 °C/km),}$$

$$P_{\text{prof}} = 0,84 \text{ psi/ft} = 8267,72 \text{ psi (considerando una presión poral para la “Cocina” de la Formación Vaca Muerta a 3000 m de profundidad) Tabla 11.13).}$$

$$V_{\text{prof}} = \frac{V_{\text{sup}} \cdot 383,15 \text{ K} \cdot 14,7 \text{ psi}}{293,15 \text{ K} \cdot 8267,72 \text{ psi}} = V_{\text{sup}} \cdot 0,00232$$

$$F_c = \frac{V_{\text{prof}}}{V_{\text{sup}}} = 0,00232$$

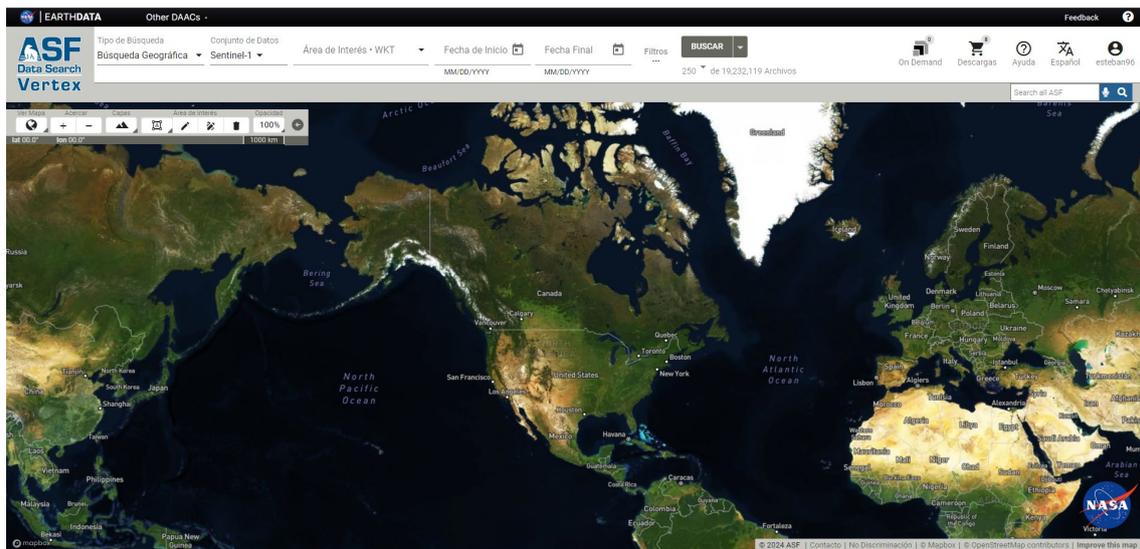
El factor de compresibilidad volumétrica ( $F_c$ ) es aproximadamente 0,00232. Este resultado indica que, para convertir un volumen en superficie a su equivalente en reservorio, debe multiplicarse el volumen superficial ( $V_{\text{sup}}$ ) por este factor  $F_c$ .

EMPRESA	BLOQUE	Pp [psi/ft]
PHOENIX	Corralera Sur	0,87
CHEVRON	El Trapial	0,89
TOTALENERGIES	La Escalonada	0,89
PAMPA ENERGÍA	Parva Negra Este	0,91
YPF/DOW	El Orejano	0,90
EQUINOR	Bandurria Sur	0,79
PLUSPETROL	La Calera	0,88
YPF	Rincón del Mangrullo	0,83
OILSTONE	Aguada de Baguales	0,68
YPF/PETRONAS	La Amarga Chica	0,85
YPF	Loma Campana	0,87
YPF/SHELL	Sierras Blancas	0,80
CAPEX	Aguada del Cajón	0,79
		<b>0,84</b>

**Tabla 9.5.1.** Presiones porales en psi/ft para el intervalo de la “Cocina” de la Formación Vaca Muerta. Tomado de Sosa Massaro *et al.* (2022).

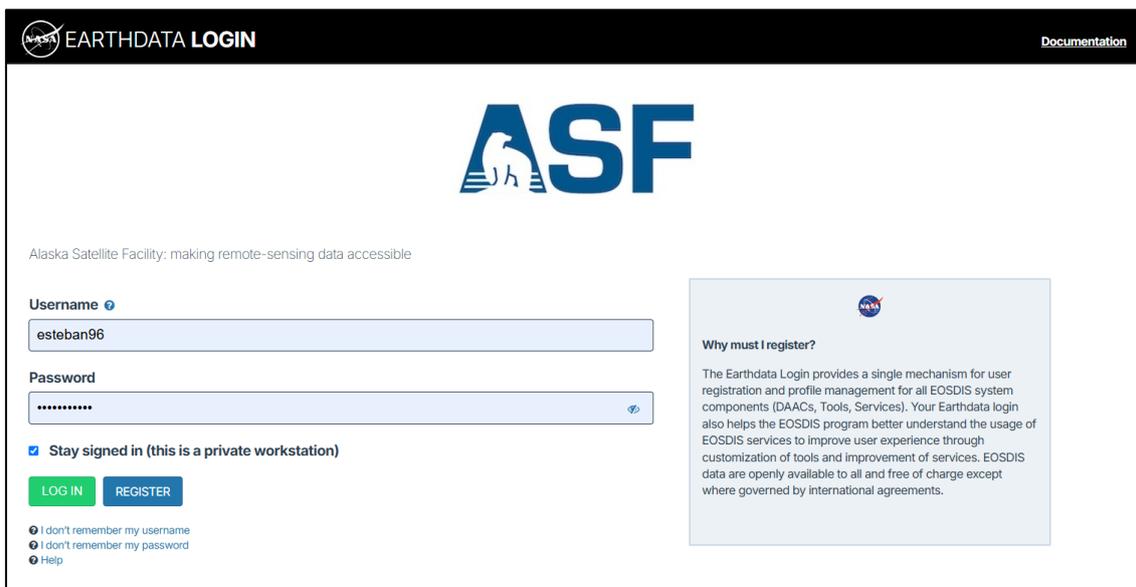
## ANEXO 6. Procesamiento de productos Sentinel-1 a pedido en Vertex

En el presente trabajo, se utilizó la plataforma ASF Data Search Vertex (**Figura 9.6.1**) para la selección y procesamiento de datos Sentinel-1 con el objetivo de llevar a cabo un análisis interferométrico InSAR. Este procedimiento se estructuró en diferentes etapas, que abarcaron desde la búsqueda de escenas adecuadas hasta la obtención de los productos interferométricos.



**Figura 9.6.1.** Vista general del servicio web Data Search Vertex de ASF.

El primer paso para acceder a los datos satelitales consistió en registrarse en la plataforma ASF (**Figura 9.6.2**). Este registro fue un requisito indispensable para habilitar la búsqueda, descarga y gestión de los datos necesarios.



**Figura 9.6.2.** Registro en la plataforma ASF.

### Búsqueda geográfica en Vertex

El primer paso consistió en la búsqueda y selección de escenas Sentinel-1 en la plataforma Vertex, aplicando filtros geoespaciales y temporales. Para definir el área de

interés, se utilizaron herramientas de delimitación manual, así como la importación de archivos georreferenciados (*shapefile* o *KML*) (Figura 9.6.3 y 9.6.4).

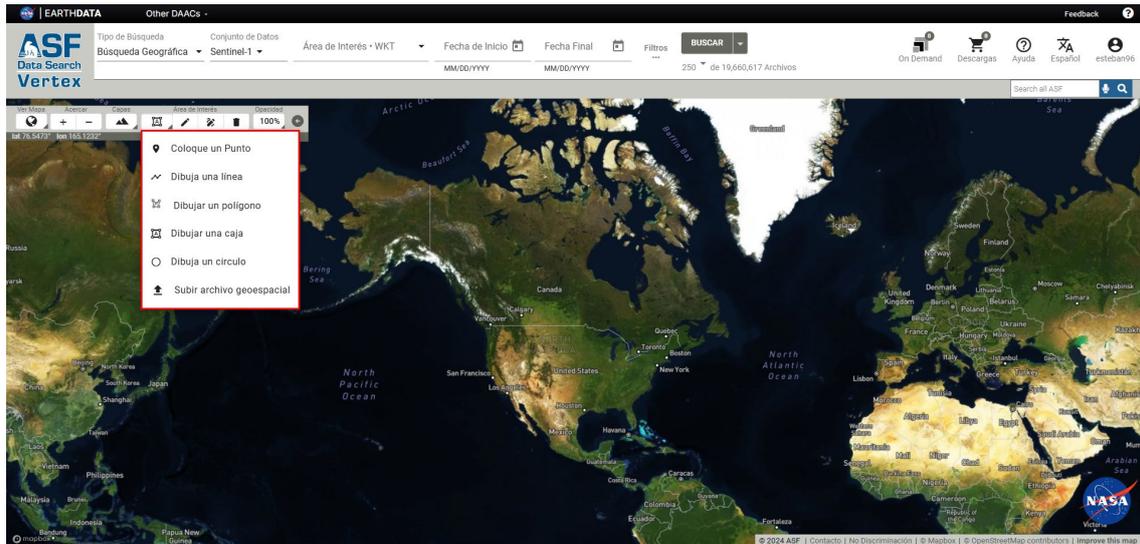


Figura 9.6.3. Se presentan las herramientas utilizadas para delimitar la región de estudio.

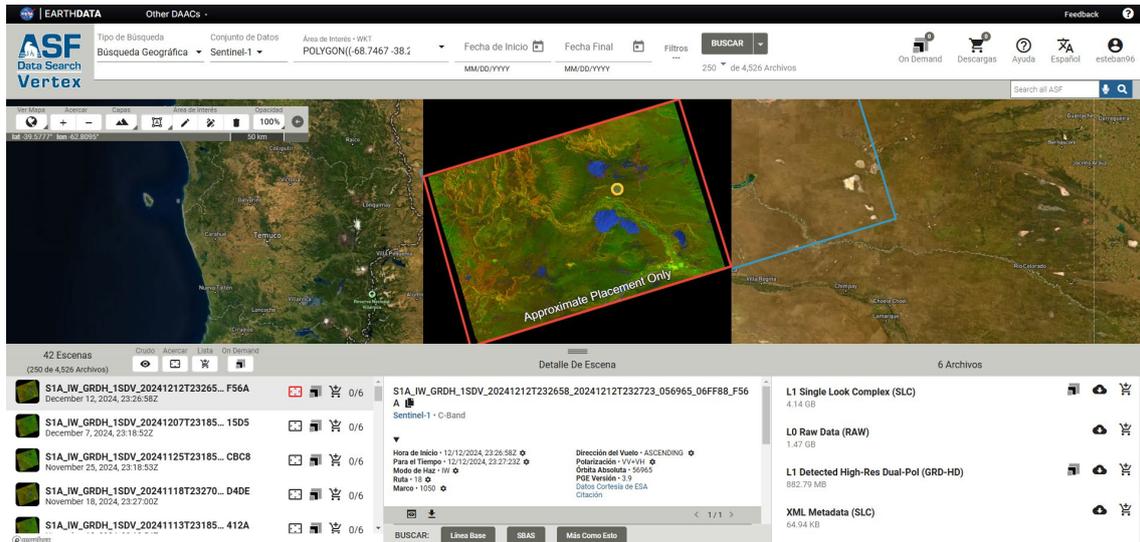


Figura 9.6.4. Resultado de búsqueda tras la definición de un área de interés. Se muestran las escenas disponibles dentro de la región seleccionada antes de aplicar filtros adicionales.

Además, se establecieron filtros específicos para optimizar la selección de datos (Figura 9.6.5), que incluyeron:

- Rango temporal: mayo de 2017 a julio de 2024.
- Tipo de producto: Single Look Complex (SLC), debido a que se preserva la información necesaria para la generación de interferogramas.
- Modo de adquisición: Interferometric Wide Swath (IW).
- Polarización: VV+VH, seleccionada para garantizar una adecuada sensibilidad a los cambios en la superficie.
- Dirección orbital: Ascendente.
- Filtros de ruta y marco: Para asegurar que las imágenes mantengan la misma geometría de visualización, se definieron la ruta y el marco del producto.  
Ruta = 180 y Marco = 1050.

La aplicación de estos filtros permitió la obtención de pares de imágenes SAR compatibles para la generación de interferogramas sucesivos, permitiendo un análisis continuo y preciso de la deformación superficial.

**Filtros de Búsqueda**

**Opciones de Área de Interés**

Área de Interés - WKT  
 POLYGON((-68.7467 -38.265,-68.7473 -38.2679,-68.7478  
 -38.2708,-68.748 -38.2737,-68.7479 -38.2767,-68.7476  
 -38.2796,-68.747 -38.2825,-68.7462 -38.2854,-68.7452  
 -38.2883,-68.7439 -38.291,-68.7425 -38.2937,-68.7407  
 -38.2964,-68.7388 -38.2989,-68.7367 -38.3013,-68.7344  
 -38.2927,-68.7318 -38.2858,-68.7304 -38.2878,-68.7322)

Borrar

Arrastre y Suelta  
 Archivos Geoespaciales  
 (shp, geojson, kml, zip)  
 Importar archivo

Buscar una ubicación

**Filtros de Fecha**

Fecha de Inicio: 5/1/2017  
 Fecha Final: 7/31/2024  
 MM/DD/YYYY

Búsqueda Estacional

**Filtros Adicionales**

L1 Single Look Compl... (1/14 tipos de archivos seleccionados)  
 Ascendente

IW (1/9 modos de haz seleccionados)  
 Subtipo

VV+VH (1/8 polarizaciones seleccionadas)  
 Group ID

1/2 direcciones de vuelo seleccionadas  
 0/2 subtipos seleccionados

**Filtros de Ruta y Marco**

18 18 1050 1050

Borrar Borrar área de búsqueda

**Figura 9.6.5.** Filtros de búsqueda. Ejemplo del filtrado aplicado en este trabajo, mostrando los criterios utilizados para la selección de escenas relevantes en el análisis.

Una vez aplicados los filtros definidos previamente, se procedió a evaluar y cuantificar el número de escenas obtenidas. En el caso de ejemplo, la búsqueda arrojó un total de 239 escenas que cumplían con los criterios establecidos.

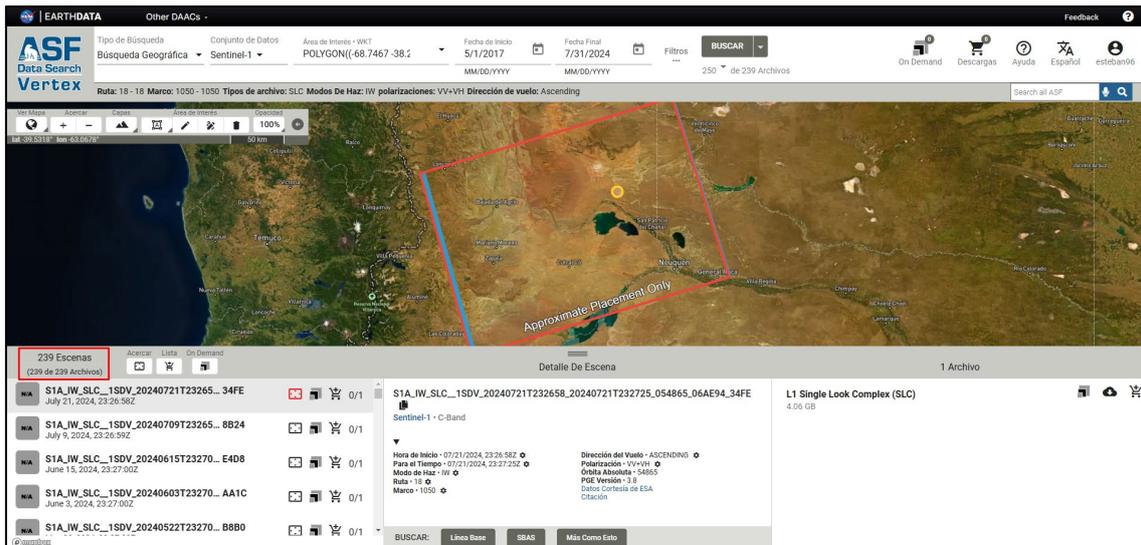


Figura 9.6.6. Resultado de búsqueda tras la definición del área de interés y la aplicación de filtros. El proceso de filtrado redujo el conjunto de datos a 239 escenas.

### Generación de pares interferométricos mediante SBAS

Con una escena seleccionada, se empleó la herramienta de búsqueda SBAS (Small Baseline Subset) para la selección de los pares interferométricos.

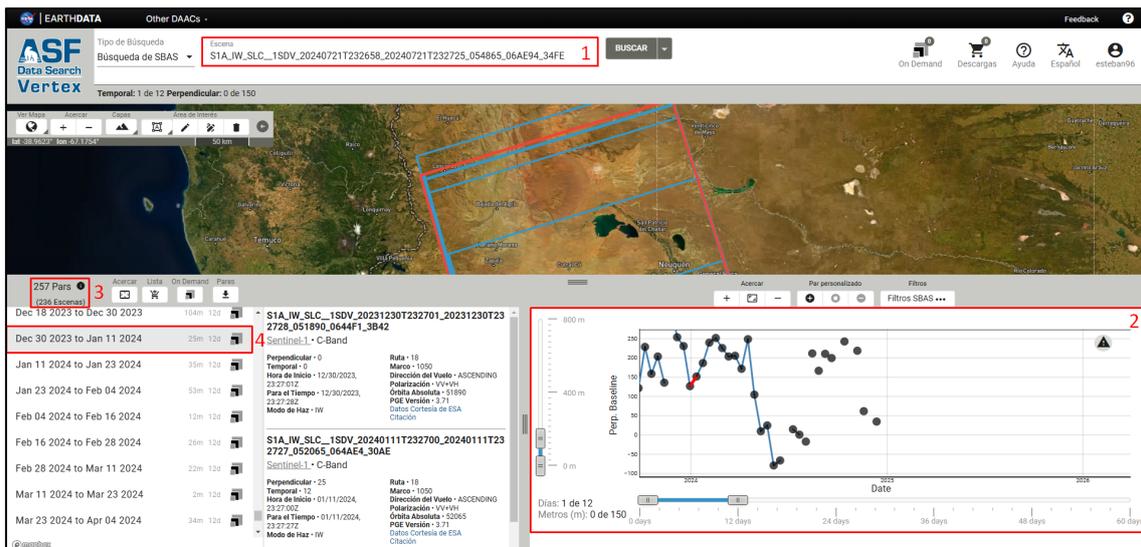


Figura 9.6.7. Escenas filtradas por el buscador. El recuadro rojo señala la herramienta SBAS utilizada para buscar pares de productos de interferometría, empleando una escena seleccionada como referencia.

Para garantizar la calidad de los datos, se definieron los siguientes criterios de selección de pares:

- Línea base perpendicular: Menor o igual a 150 m.
- Intervalo temporal: No superior a 12 días, salvo excepciones condicionadas por datos de precipitación.

Estos criterios aseguraron la calidad y coherencia de los datos utilizados en el análisis interferométrico.



**Figura 9.6.8.** Búsqueda de SBAS. 1. Escena de referencia específica seleccionada a partir de la búsqueda geográfica. 2. El gráfico de línea base temporal vs línea base perpendicular muestra una nube de puntos, donde la mayoría están conectados por una línea recta, lo que indica una correlación exitosa entre imágenes consecutivas. 3. El recuadro informa sobre la cantidad de interferogramas posibles, basados en la línea base temporal y perpendicular dentro del rango de fechas previamente definido, en el ej 1 de mayo de 2017 al 31 de julio de 2024, resultando en 257 pares. 4. Se señala el interferograma a solicitar especificando las imágenes maestra y esclava, 30 de diciembre de 2023 y 11 de enero de 2024.

### Configuración del procesamiento InSAR

Tras la selección de los pares interferométricos (**Figura 9.6.9**), se configuró el procesamiento de interferogramas en la plataforma Vertex (**Figura 9.6.10**). Se establecieron parámetros tales como:

- Opciones de procesamiento (resolución)
- Mascara a aplicar
- Filtro de fase adaptativo
- Productos a incluir

En este trabajo, se seleccionó el ajuste preestablecido que permite la obtención de productos compatibles con MintPy.

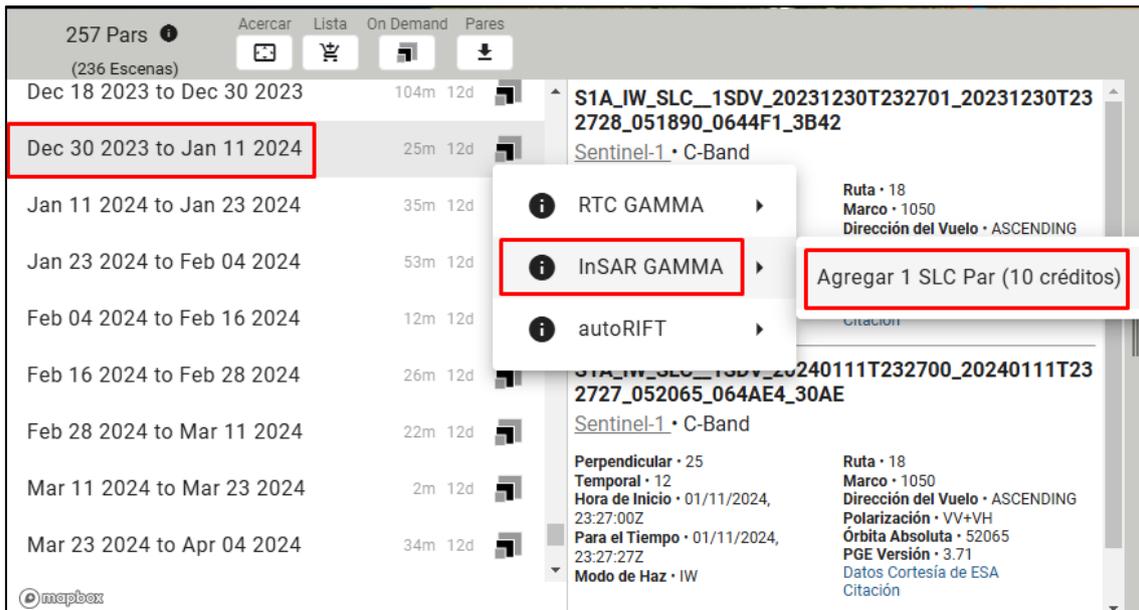


Figura 9.6.9. Proceso de solicitud de interferograma en Vertex utilizando SBAS

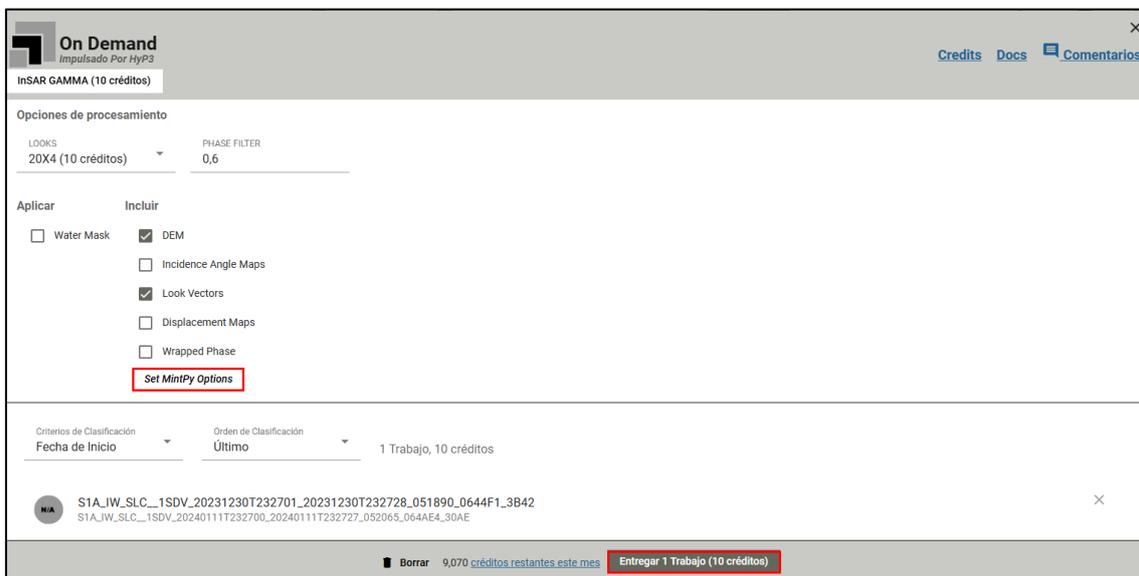


Figura 9.6.10. Solicitud de procesamiento. Se destacan los parámetros establecidos en este trabajo.

Una vez establecidos los parámetros de procesamiento, se procedió a asignar un nombre al proyecto, en este caso de ejemplo, Ejemplo\_TFG (Figura 9.6.11).



Figura 9.6.11. Proceso de envío de solicitud de interferogramas.

### Obtención de productos interferométricos

Una vez completado el procesamiento (Figura 9.6.12), los productos InSAR fueron descargados y se verificó la calidad de los productos generados los cuales se listan en la Figura 9.6.13.

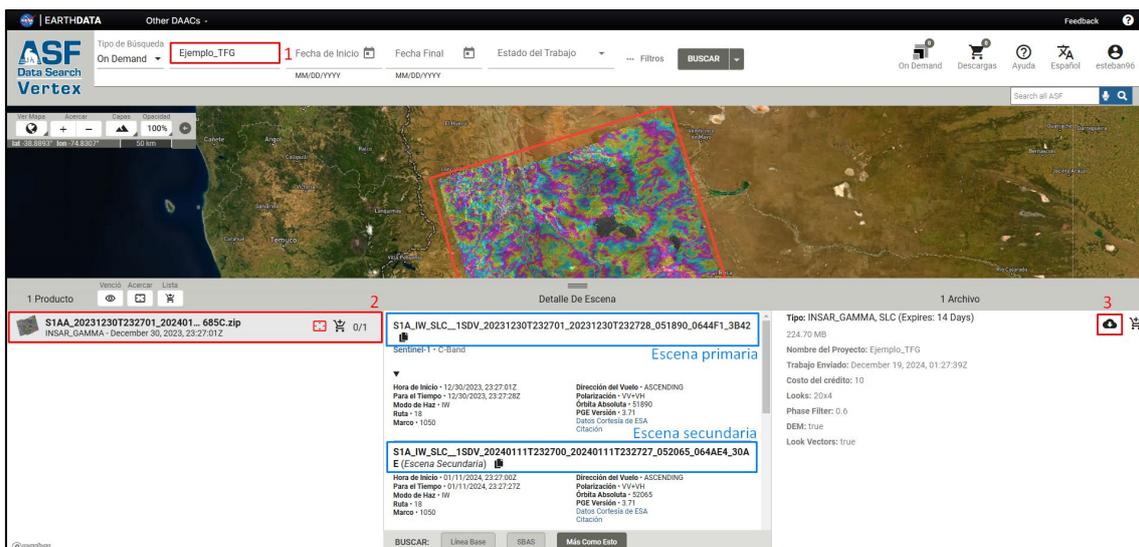


Figura 9.6.12. Búsqueda On Demand. 1. Filtramos por nombre del proyecto, ej Ejemplo\_TFG. 2. Visualización del producto generado. 3. Acceso a la descarga del producto.

Nombre	Tipo	Tamaño
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_color_phase.png	Archivo PNG	1.273 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_unw_phase.png	Archivo PNG	1.079 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_amp.tif	Archivo TIF	29.333 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_corr.tif	Archivo TIF	26.709 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_dem.tif	Archivo TIF	50.901 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_lv_phi.tif	Archivo TIF	34.930 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_lv_theta.tif	Archivo TIF	49.201 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_unw_phase.tif	Archivo TIF	28.352 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_water_mask.tif	Archivo TIF	11.955 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_README.md.txt	Documento de te...	31 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C.txt	Documento de te...	2 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_color_phase.kmz	KMZ	3.422 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_unw_phase.kmz	KMZ	3.188 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_amp.tif.xml	Microsoft Edge H...	13 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_color_phase.png.aux.xml	Microsoft Edge H...	2 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_color_phase.png.xml	Microsoft Edge H...	23 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_corr.tif.xml	Microsoft Edge H...	15 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_dem.tif.xml	Microsoft Edge H...	13 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_lv_phi.tif.xml	Microsoft Edge H...	12 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_lv_theta.tif.xml	Microsoft Edge H...	13 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_unw_phase.png.aux.xml	Microsoft Edge H...	2 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_unw_phase.png.xml	Microsoft Edge H...	25 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_unw_phase.tif.xml	Microsoft Edge H...	22 KB
S1AA_20231230T232701_20240111T232700_VVP012_INT80_G_ueF_685C_water_mask.tif.xml	Microsoft Edge H...	13 KB

Figura 9.6.13. Carpeta descomprimida del producto InSAR descargado.

El procedimiento descrito abarcó el período de mayo de 2017 a julio de 2024. Para la selección de interferogramas, se consideraron además los datos de precipitación proporcionados por la AIC (Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas), con el fin de considerar su influencia en la coherencia y calidad de los resultados obtenidos.

La Figura 9.6.14 presenta un resumen esquemático del procesamiento de los datos Sentinel-1 a través de la plataforma Vertex, destacando las etapas clave del flujo de trabajo.

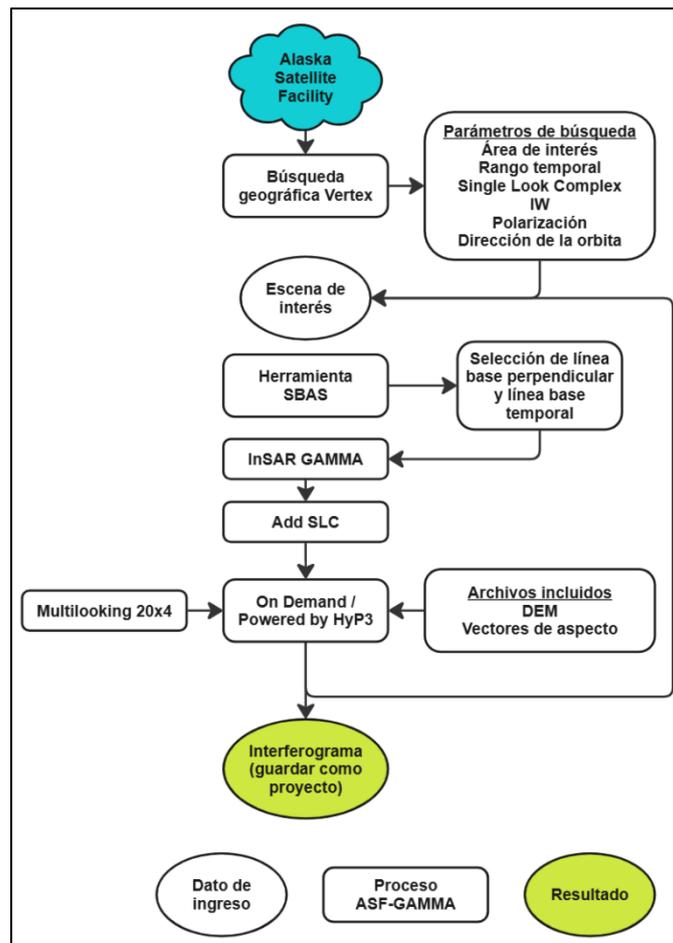


Figura 9.6.14. Procedimiento de generación de interferogramas en la plataforma ASF ejecutado de forma *On demand*.

### Flujo de trabajo de InSAR utilizado en HyP3

ASF, mediante la plataforma HyP3, lleva a cabo la generación de la información solicitada. Para la elaboración de los interferogramas, HyP3 emplea el *software* GAMMA, el cual se encarga del procesamiento, la preparación del interferograma y la creación de los productos resultantes. A continuación, se describe detalladamente el flujo de trabajo implementado por HyP3.

#### Procesamiento

Las imágenes SAR que se emplearán en el proceso interferométrico son preparadas siguiendo una serie de pasos. Estos incluyen la selección de las imágenes, su ingesta y calibración, la generación de un DEM adecuado, y el cálculo de la superposición de ráfagas.

El procesamiento de interferometría SAR (InSAR) de los datos de Sentinel-1 se lleva a cabo utilizando datos *Interferometric Wide Swath Single Look Complex* (IW SLC) como entrada, en los cuales los datos han sido transformados en imágenes mediante el procesamiento SAR. El par SLC es definido por el usuario; para garantizar la coherencia, la imagen más antigua se utiliza como imagen maestra, mientras que la imagen más reciente actúa como imagen esclava. Esto implica que los valores positivos en el interferograma desenrollado resultante representa el movimiento que se aleja de la

plataforma SAR, mientras que los valores negativos indican el movimiento que se aproxima a dicha plataforma. Estos valores son relativos al punto de referencia del interferograma desenrollado; por defecto, los productos InSAR solicitados a la ASF utilizan la ubicación del píxel con el valor de coherencia más alto como punto de referencia.

### ***Preparación del DEM***

Para la obtención de productos InSAR diferenciales que representen el movimiento del terreno, es necesario realizar la resta de la fase topográfica del interferograma. Este procedimiento implica la replicación de la fase topográfica a partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM) existente. El DEM que se utiliza para el procesamiento es el DEM GLO-30 de Copernicus, el cual proporciona una resolución de 30 m por píxel.

Una vez descargados los mosaicos del DEM que cubren la zona de interés, se aplica una corrección al geode al DEM y se procede a su remuestreo, asegurando que coincida con la resolución de salida del producto InSAR, que es de 80 m para productos de 10 x 2. Posteriormente, se lo proyecta a la zona UTM (*Universal Transverse Mercator*), en función de la ubicación geográfica de la zona solicitada.

### ***Cálculo de ráfagas superpuestas***

Los datos del radar de apertura sintética de Sentinel-1 (IW SLC) se estructuran en tres subfranjas, cada una de las cuales se divide adicionalmente en ráfagas. Cada ráfaga está programada con precisión para repetirse en un intervalo temporal determinado, lo que garantiza que comiencen al mismo tiempo en cada pasada alrededor del globo. Para el procesamiento de InSAR, es esencial que las ráfagas sean superpuestas, de lo contrario, el par de imágenes seleccionado no será adecuado para este tipo de análisis y el procesamiento InSAR no se ejecutará.

HyP3 aprovecha la posibilidad de repetición de ráfagas para calcular aquellas que se superponen entre dos escenas. Solo las ráfagas superpuestas son consideradas en las etapas posteriores del procesamiento de InSAR, mientras que las demás ráfagas son descartadas.

### **Creación, corrección y refinamiento de interferogramas**

Es fundamental recordar que las imágenes SAR SLC están en la proyección original del sensor, donde cada píxel se representa mediante un valor complejo que contiene tanto información de amplitud como de fase.

La creación del interferograma dentro del *software* GAMMA se inicia con el mapeo del espacio radar de la imagen SLC al espacio de rango terrestre mediante una tabla de búsqueda. Posteriormente, se simula un interferograma de la topografía utilizando DEM previamente preparado.

El siguiente paso en el proceso consiste en el corrección de las dos imágenes SLC, que se lleva a cabo con una precisión de 0.02 píxeles de forma iterativa. Este proceso incluye las siguientes etapas:

1. Remuestreo del SLC secundario utilizando un polinomio de compensación previamente calculado.

2. Emparejamiento de las imágenes SLC esclava y maestra mediante técnicas de correlación cruzada de intensidad.
3. Estimación de los coeficientes polinómicos de compensación en el rango y acimut, basándose en los resultados de la correlación.
4. Creación de un interferograma diferencial utilizando los SLC corregistrados y el interferograma simulado.
5. Actualización del polinomio de compensación, incorporando las estimaciones actuales.

Una vez completados estos pasos, es imperativo verificar la convergencia del proceso. Si la verificación es satisfactoria, se procede a aplicar el algoritmo de diversidad espectral mejorada (ESD), que permite ajustar el corregistro de las imágenes con una precisión superior a 1/100 de píxel. Posteriormente, se repiten las etapas del 1 a 4, incorporando la compensación ESD, lo que resulta en un interferograma ajustado.

### **Desenrollado de fases**

Las diferencias de fase en los interferogramas enrollados oscilan entre  $-\pi$  y  $\pi$ . El proceso de desenrollado de fase tiene como objetivo asignar múltiplos enteros de  $2\pi$  a cada píxel del interferograma, lo que permite restringir el número de saltos de  $2\pi$  a las regiones donde realmente pueden ocurrir. Estas regiones se identifican como áreas de superposición de radar o de deformación que exceden la mitad de una longitud de onda en la línea de visión del sensor. Adicionalmente, el ruido térmico y la decorrelación interferométrica pueden generar discontinuidades de fase  $2\pi$ , conocidas como residuos.

El algoritmo empleado para el desenrollado de fase en estos productos se basa en el flujo de costo mínimo (MCF) y en la triangulación.

### ***Filtración***

Antes de llevar a cabo el desenrollado del interferograma, es necesario aplicar un filtro para eliminar el ruido presente. Este proceso se realiza mediante un algoritmo de filtrado espectral adaptativo, cuyo objetivo es reducir el ruido de fase, aumentar la precisión de la fase interferométrica y minimizar la cantidad de residuos del interferograma, facilitando así el desenrollado de la fase. En este caso, los residuos se definen como puntos en el interferograma donde la suma de las diferencias de fase entre los píxeles que rodean una trayectoria cerrada no es cero, lo que indica la presencia de un salto de fase.

### ***Enmascaramiento***

La creación de la máscara se efectúa aplicando umbrales a los valores de coherencia y/o amplitud (intensidad de retrodispersión) de un par de imágenes. Para los productos de InSAR por pedido, se establece un umbral de amplitud de 0, de modo que los datos se excluyan únicamente en función del umbral de coherencia. La coherencia se deriva del interferograma normalizado, donde los valores de los píxeles oscilan entre 0 (decorrelación total) y 1 (correlación total). A cualquier píxel de entrada con un valor de coherencia inferior a 0.1 se le asigna un valor de máscara de validez cero, por lo que no se utilizará durante el proceso de desenrollado.

### ***Punto de referencia***

Para realizar el desenrollado de fase, es fundamental seleccionar un píxel como punto de referencia. El desenrollado se realiza en relación con el punto de referencia, aplicando múltiplos enteros de  $2\pi$  a la fase desenrollada, utilizando este píxel como punto de inicio. El valor de la fase desenrollada se establece en 0 en el punto de referencia.

Por defecto, los productos de InSAR solicitados por ASF utilizan la ubicación del píxel con el valor de coherencia más alto como punto de referencia. Se examina el mapa de coherencia para identificar el valor máximo, y todos los píxeles que presentan este valor son analizados mediante una ventana de 9 píxeles. El píxel con la suma más alta de valores dentro de su ventana de 9 píxeles se selecciona como el punto de referencia.

### **Geocodificación y creación de productos**

Una vez que la fase ha sido desenrollada, se procede con los procesos de geocodificación y creación de productos finales.

#### ***Geocodificación***

La geocodificación es el proceso mediante el cual los píxeles se re proyectan desde el espacio de rango oblicuo del radar SAR al espacio de rango terrestre, proyectado en un sistema de coordenadas cartográficas. Para los productos InSAR, este proceso utiliza la proyección UTM de la zona correspondiente al DEM empleado durante el procesamiento. La reubicación de cada píxel se realiza mediante el remuestreo del vecino más cercano, lo que garantiza la conservación de los valores originales de los píxeles.

#### ***Creación de productos***

Los productos generados se exportan desde el formato interno del *software* GAMMA al formato *geotiff*, el cual es ampliamente compatible con sistemas de información geográfica (SIG). En el caso del servicio HyP3 InSAR, la salida es un archivo comprimido en formato zip que contiene múltiples archivos, incluidos los siguientes:

- Archivos *geotiff* con la información de amplitud, coherencia, fase desenrollada y enmascaramiento de agua.
- Imágenes de exploración en formato PNG con información de geolocalización.
- Archivos *KMZ* compatibles con Google Earth.
- Un archivo de metadatos.
- Un archivo *readme*.

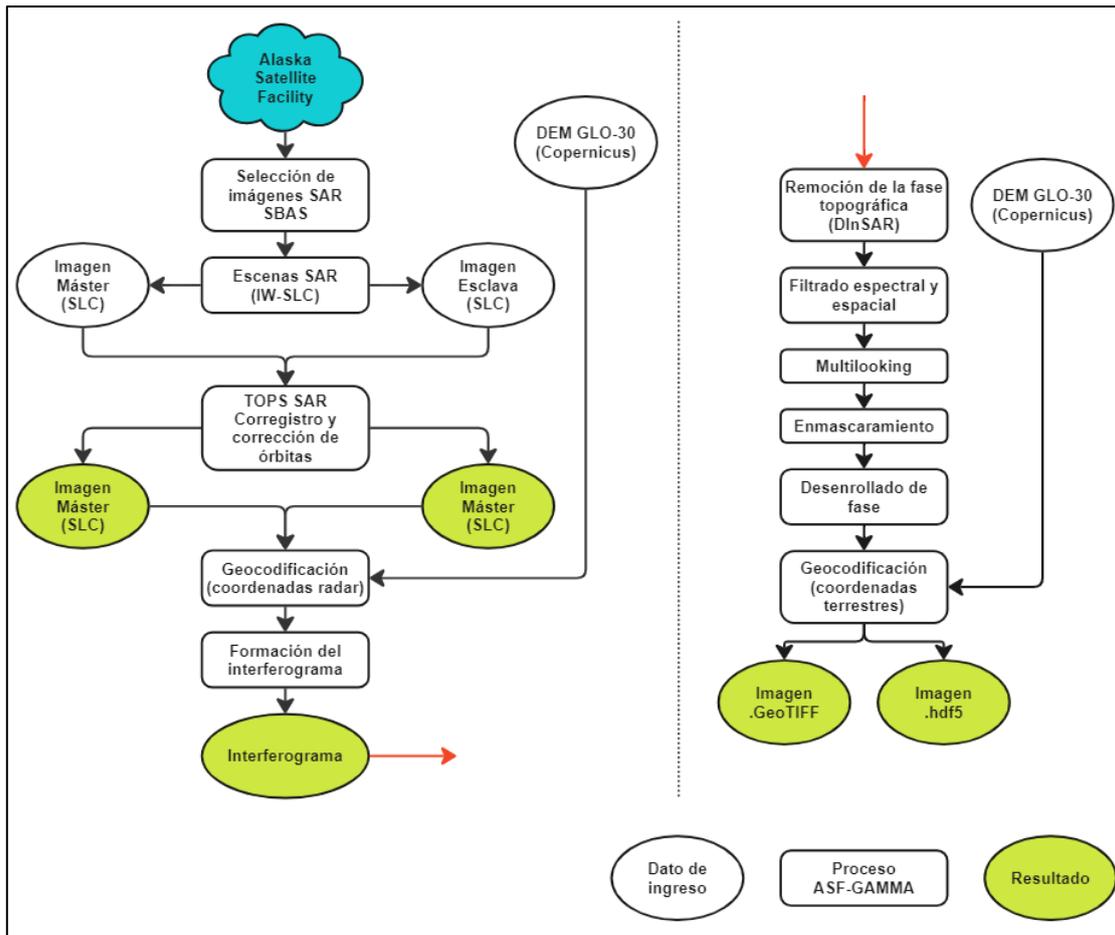


Figura 9.6.15. Metodología de corregistro de imágenes SAR con el modo de adquisición y la formación de cada interferograma en la plataforma ASF.

### ANEXO 7. Lista de interferogramas

A continuación, se listan los interferogramas analizados en este trabajo, indicando para cada uno la fecha de la imagen maestra y esclava, el modo de adquisición, el nivel de procesamiento, entre otras características relevantes de los productos SAR. Además, se especifican la línea base espacial y temporal de cada par interferométrico.

Par	Imagen	Asignación	Modo de Haz	Nivel de procesamiento		Ruta	Marco	Orbita	Dirección	Polarización	Banda	Sentinel	Línea Base Espacial [m]	Línea Base Temporal [días]
				SLC	18									
1	17/05/2017	Maestra	IW	SLC	18	1050	5644	ASC	VV+VH	C	S1B	-69.9	24	
	10/06/2017	Esclava					5994				S1B			
2	10/06/2017	Maestra	IW	SLC	18	1050	5994	ASC	VV+VH	C	S1B	37.6	12	
	22/06/2017	Esclava					6169				S1B			
3	22/06/2017	Maestra	IW	SLC	18	1050	6169	ASC	VV+VH	C	S1B	73.1	12	
	04/07/2017	Esclava					6344				S1B			
4	04/07/2017	Maestra	IW	SLC	18	1050	6344	ASC	VV+VH	C	S1B	-23.3	12	
	16/07/2017	Esclava					6519				S1B			
5	16/07/2017	Maestra	IW	SLC	18	1050	6519	ASC	VV+VH	C	S1B	-14.8	12	
	28/07/2017	Esclava					6694				S1B			
6	28/07/2017	Maestra	IW	SLC	18	1050	6694	ASC	VV+VH	C	S1B	-42.9	12	
	09/08/2017	Esclava					6869				S1B			
7	09/08/2017	Maestra	IW	SLC	18	1050	6869	ASC	VV+VH	C	S1B	64.5	12	
	21/08/2017	Esclava					7044				S1B			
8	21/08/2017	Maestra	IW	SLC	18	1050	7044	ASC	VV+VH	C	S1B	-78.1	24	
	14/09/2017	Esclava					7394				S1B			
9	14/09/2017	Maestra	IW	SLC	18	1050	7394	ASC	VV+VH	C	S1B	31.4	12	
	26/09/2017	Esclava					7569				S1B			
10	26/09/2017	Maestra	IW	SLC	18	1050	7569	ASC	VV+VH	C	S1B	-8.4	12	
	08/10/2017	Esclava					7744				S1B			
11	08/10/2017	Maestra	IW	SLC	18	1050	7744	ASC	VV+VH	C	S1B	-28.4	12	
	20/10/2017	Esclava					7919				S1B			
12	20/10/2017	Maestra	IW	SLC	18	1050	7919	ASC	VV+VH	C	S1B	-15.5	12	
	01/11/2017	Esclava					8094				S1B			
13	01/11/2017	Maestra	IW	SLC	18	1050	8094	ASC	VV+VH	C	S1B	64.3	12	
	13/11/2017	Esclava					8269				S1B			
14	13/11/2017	Maestra	IW	SLC	18	1050	8269	ASC	VV+VH	C	S1B	10.8	12	
	25/11/2017	Esclava					8444				S1B			
15	25/11/2017	Maestra	IW	SLC	18	1050	8444	ASC	VV+VH	C	S1B	-4.2	12	
	07/12/2017	Esclava					8619				S1B			
16	07/12/2017	Maestra	IW	SLC	18	1050	8619	ASC	VV+VH	C	S1B	-92.2	12	
	19/12/2017	Esclava					8794				S1B			
17	19/12/2017	Maestra	IW	SLC	18	1050	8794	ASC	VV+VH	C	S1B	-3.0	12	
	31/12/2017	Esclava					8969				S1B			
18	31/12/2017	Maestra	IW	SLC	18	1050	8969	ASC	VV+VH	C	S1B	98.9	36	
	05/02/2018	Esclava					9494				S1B			

**Tabla 9.7.1.** Lista de interferogramas correspondientes al año 2017 solicitados para procesamiento. Cada interferograma se generó a partir de imágenes SAR adquiridas en diferentes fechas.

Par	Imagen	Asignación	Modo de Haz	Nivel de procesamiento		Ruta	Marco	Orbita	Dirección	Polarización	Banda	Sentinel	Línea Base Espacial [m]	Línea Base Temporal [días]
1	05/02/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	9494	ASC	VV+VH	C	S1B	-66.7	12	
	17/02/2018	Esclava					9669				S1B			
2	17/02/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	9669	ASC	VV+VH	C	S1B	-0.4	12	
	01/03/2018	Esclava					9844				S1B			
3	01/03/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	9844	ASC	VV+VH	C	S1B	70.6	12	
	13/03/2018	Esclava					10019				S1B			
4	13/03/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	10019	ASC	VV+VH	C	S1B	109.4	12	
	25/03/2018	Esclava					10194				S1B			
5	25/03/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	10194	ASC	VV+VH	C	S1B	-91.0	12	
	06/04/2018	Esclava					10369				S1B			
6	06/04/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	10369	ASC	VV+VH	C	S1B	71.4	12	
	18/04/2018	Esclava					10544				S1B			
7	18/04/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	10544	ASC	VV+VH	C	S1B	-110.5	24	
	12/05/2018	Esclava					10894				S1B			
8	12/05/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	10894	ASC	VV+VH	C	S1B	43.5	12	
	24/05/2018	Esclava					11069				S1B			
9	24/05/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	11069	ASC	VV+VH	C	S1B	90.2	12	
	05/06/2018	Esclava					11244				S1B			
10	05/06/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	11244	ASC	VV+VH	C	S1B	-55.1	12	
	17/06/2018	Esclava					11419				S1B			
11	17/06/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	11419	ASC	VV+VH	C	S1B	-42.5	24	
	11/07/2018	Esclava					11769				S1B			
12	11/07/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	11769	ASC	VV+VH	C	S1B	-26.2	12	
	23/07/2018	Esclava					11944				S1B			
13	23/07/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	11944	ASC	VV+VH	C	S1B	16.7	12	
	04/08/2018	Esclava					12119				S1B			
14	04/08/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	12119	ASC	VV+VH	C	S1B	33.3	12	
	16/08/2018	Esclava					12294				S1B			
15	16/08/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	12294	ASC	VV+VH	C	S1B	28.8	12	
	28/08/2018	Esclava					12469				S1B			
16	28/08/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	12469	ASC	VV+VH	C	S1B	-98.1	12	
	09/09/2018	Esclava					12644				S1B			
17	09/09/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	12644	ASC	VV+VH	C	S1B	19.7	12	
	21/09/2018	Esclava					12819				S1B			
18	21/09/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	12819	ASC	VV+VH	C	S1B	-7.2	12	
	03/10/2018	Esclava					12994				S1B			
19	03/10/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	12994	ASC	VV+VH	C	S1B	-5.0	12	
	15/10/2018	Esclava					13169				S1B			
20	15/10/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	13169	ASC	VV+VH	C	S1B	-71.7	12	
	27/10/2018	Esclava					13344				S1B			
21	27/10/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	13344	ASC	VV+VH	C	S1B	32.7	12	
	08/11/2018	Esclava					13519				S1B			
22	08/11/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	13519	ASC	VV+VH	C	S1B	-1.6	12	
	20/11/2018	Esclava					13694				S1B			
23	20/11/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	13694	ASC	VV+VH	C	S1B	25.6	12	
	02/12/2018	Esclava					13869				S1B			
24	02/12/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	13869	ASC	VV+VH	C	S1B	80.6	12	
	14/12/2018	Esclava					14044				S1B			
25	14/12/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	14044	ASC	VV+VH	C	S1B	-109.4	12	
	26/12/2018	Esclava					14219				S1B			
26	26/12/2018	Maestra	IW	SLC	18	1050	14219	ASC	VV+VH	C	S1B	-31.9	12	
	07/01/2019	Esclava					14394				S1B			

**Tabla 9.7.2.** Lista de interferogramas correspondientes al año 2018 solicitados para procesamiento. Cada interferograma se generó a partir de imágenes SAR adquiridas en diferentes fechas.

Par	Imagen	Asignación	Modo de Haz	Nivel de procesamiento		Ruta	Marco	Orbita	Dirección	Polarización	Banda	Sentinel	Línea Base Espacial [m]	Línea Base Temporal [días]
1	07/01/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	14394	ASC	VV+VH	C	S1B	22.6	12	
	19/01/2019	Esclava					14569				S1B			
2	19/01/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	14569	ASC	VV+VH	C	S1B	-2.7	12	
	31/01/2019	Esclava					14744				S1B			
3	31/01/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	14744	ASC	VV+VH	C	S1B	140.6	12	
	12/02/2019	Esclava					14919				S1B			
4	12/02/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	1419	ASC	VV+VH	C	S1B	-85.8	12	
	24/02/2019	Esclava					15094				S1B			
5	24/02/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	15094	ASC	VV+VH	C	S1B	-35.1	12	
	08/03/2019	Esclava					15269				S1B			
6	08/03/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	15269	ASC	VV+VH	C	S1B	51.2	12	
	20/03/2019	Esclava					15444				S1B			
7	20/03/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	15444	ASC	VV+VH	C	S1B	-42.7	12	
	01/04/2019	Esclava					15619				S1B			
8	01/04/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	15619	ASC	VV+VH	C	S1B	51.8	12	
	13/04/2019	Esclava					15794				S1B			
9	13/04/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	15794	ASC	VV+VH	C	S1B	-0.3	12	
	25/04/2019	Esclava					15969				S1B			
10	25/04/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	15969	ASC	VV+VH	C	S1B	19.0	18	
	13/05/2019	Esclava					27215				S1A			
11	13/05/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	27215	ASC	VV+VH	C	S1A	-19.2	12	
	25/05/2019	Esclava					27390				S1A			
12	25/05/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	27390	ASC	VV+VH	C	S1A	30.7	12	
	06/06/2019	Esclava					27565				S1A			
13	06/06/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	27565	ASC	VV+VH	C	S1A	-25.5	12	
	18/06/2019	Esclava					27740				S1A			
14	18/06/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	27740	ASC	VV+VH	C	S1A	-62.6	12	
	30/06/2019	Esclava					27915				S1A			
15	30/06/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	27915	ASC	VV+VH	C	S1A	61.3	12	
	12/07/2019	Esclava					28090				S1A			
16	12/07/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	28090	ASC	VV+VH	C	S1A	40.6	12	
	24/07/2019	Esclava					28265				S1A			
17	24/07/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	28265	ASC	VV+VH	C	S1A	-14.9	12	
	05/08/2019	Esclava					28440				S1A			
18	05/08/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	28440	ASC	VV+VH	C	S1A	-71.6	24	
	29/08/2019	Esclava					28790				S1A			
19	29/08/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	28790	ASC	VV+VH	C	S1A	20.0	24	
	22/09/2019	Esclava					29140				S1A			
20	22/09/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	29140	ASC	VV+VH	C	S1A	-12.7	12	
	04/10/2019	Esclava					29315				S1A			
21	04/10/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	29315	ASC	VV+VH	C	S1A	28.6	12	
	16/10/2019	Esclava					29490				S1A			
22	16/10/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	29490	ASC	VV+VH	C	S1A	-29.1	12	
	28/10/2019	Esclava					29665				S1A			
23	28/10/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	29665	ASC	VV+VH	C	S1A	40.3	24	
	21/11/2019	Esclava					30015				S1A			
24	21/11/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	30015	ASC	VV+VH	C	S1A	0.5	12	
	03/12/2019	Esclava					30190				S1A			
25	03/12/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	30190	ASC	VV+VH	C	S1A	-68.4	12	
	15/12/2019	Esclava					30365				S1A			
26	15/12/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	30365	ASC	VV+VH	C	S1A	-52.6	12	
	27/12/2019	Esclava					30540				S1A			
27	27/12/2019	Maestra	IW	SLC	18	1050	30540	ASC	VV+VH	C	S1A	42.1	12	
	08/01/2020	Esclava					30715				S1A			

Tabla 9.7.3. Lista de interferogramas correspondientes al año 2019 solicitados para procesamiento. Cada interferograma se generó a partir de imágenes SAR adquiridas en diferentes fechas.

Par	Imagen	Asignación	Modo de Haz	Nivel de procesamiento		Ruta	Marco	Orbita	Dirección	Polarización	Banda	Sentinel	Línea Base Espacial [m]	Línea Base Temporal [días]
1	08/01/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	30715	ASC	VV+VH	C	S1A	64.7	12	
	20/01/2020	Esclava												30890
2	20/01/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	30890	ASC	VV+VH	C	S1A	25.4	12	
	01/02/2020	Esclava												31065
3	01/02/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	31065	ASC	VV+VH	C	S1A	4.1	12	
	13/02/2020	Esclava												31240
4	13/02/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	31240	ASC	VV+VH	C	S1A	-140.8	24	
	08/03/2020	Esclava												31590
5	08/03/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	31590	ASC	VV+VH	C	S1A	57.8	12	
	20/03/2020	Esclava												31765
6	20/03/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	31765	ASC	VV+VH	C	S1A	105.6	12	
	01/04/2020	Esclava												31940
7	01/04/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	31940	ASC	VV+VH	C	S1A	13.7	12	
	13/04/2020	Esclava												32115
8	13/04/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	32115	ASC	VV+VH	C	S1A	-78.3	12	
	25/04/2020	Esclava												32290
9	25/04/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	32290	ASC	VV+VH	C	S1A	37.3	12	
	07/05/2020	Esclava												32465
10	07/05/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	32465	ASC	VV+VH	C	S1A	36.5	24	
	31/05/2020	Esclava												32815
11	31/05/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	32815	ASC	VV+VH	C	S1A	-39.3	12	
	12/06/2020	Esclava												32990
12	12/06/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	32990	ASC	VV+VH	C	S1A	-12.2	12	
	24/06/2020	Esclava												33165
13	24/06/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	33165	ASC	VV+VH	C	S1A	-41.0	24	
	18/07/2020	Esclava												33515
14	18/07/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	33515	ASC	VV+VH	C	S1A	-42.1	12	
	30/07/2020	Esclava												33690
15	30/07/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	33690	ASC	VV+VH	C	S1A	104.2	12	
	11/08/2020	Esclava												33865
16	11/08/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	33865	ASC	VV+VH	C	S1A	-13.7	12	
	23/08/2020	Esclava												34040
17	23/08/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	34040	ASC	VV+VH	C	S1A	-50.9	12	
	04/09/2020	Esclava												34215
18	04/09/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	34215	ASC	VV+VH	C	S1A	14.7	24	
	28/09/2020	Esclava												34565
19	28/09/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	34565	ASC	VV+VH	C	S1A	-8.2	12	
	10/10/2020	Esclava												34740
20	10/10/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	34740	ASC	VV+VH	C	S1A	61.2	12	
	22/10/2020	Esclava												34915
21	22/10/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	34915	ASC	VV+VH	C	S1A	-90.7	12	
	03/11/2020	Esclava												35090
22	03/11/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	35090	ASC	VV+VH	C	S1A	-8.3	12	
	15/11/2020	Esclava												35265
23	15/11/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	35265	ASC	VV+VH	C	S1A	85.7	12	
	27/11/2020	Esclava												35440
24	27/11/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	35440	ASC	VV+VH	C	S1A	-12.5	12	
	09/12/2020	Esclava												35615
25	09/12/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	35615	ASC	VV+VH	C	S1A	-1.3	12	
	21/12/2020	Esclava												35790
26	21/12/2020	Maestra	IW	SLC	18	1050	35790	ASC	VV+VH	C	S1A	-60.3	12	
	02/01/2021	Esclava												35965

**Tabla 9.7.4.** Lista de interferogramas correspondientes al año 2020 solicitados para procesamiento. Cada interferograma se generó a partir de imágenes SAR adquiridas en diferentes fechas.

Par	Imagen	Asignación	Modo de Haz	Nivel de procesamiento		Ruta	Marco	Orbita	Dirección	Polarización	Banda	Sentinel	Línea Base Espacial [m]	Línea Base Temporal [días]
1	02/01/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	35965	ASC	VV+VH	C	S1A	-28.0	12	
	14/01/2021	Esclava					36140							
2	14/01/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	36140	ASC	VV+VH	C	S1A	-6.2	12	
	26/01/2021	Esclava					36315							
3	26/01/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	36315	ASC	VV+VH	C	S1A	44.0	12	
	07/02/2021	Esclava					36490							
4	07/02/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	36490	ASC	VV+VH	C	S1A	123.0	12	
	19/02/2021	Esclava					36665							
5	19/02/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	36665	ASC	VV+VH	C	S1A	12.8	12	
	03/03/2021	Esclava					36840							
6	03/03/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	36840	ASC	VV+VH	C	S1A	-75.5	12	
	15/03/2021	Esclava					37015							
7	15/03/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	37015	ASC	VV+VH	C	S1A	-65.4	12	
	27/03/2021	Esclava					37190							
8	27/03/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	37190	ASC	VV+VH	C	S1A	45.9	12	
	08/04/2021	Esclava					37365							
9	08/04/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	37365	ASC	VV+VH	C	S1A	91.8	24	
	02/05/2021	Esclava					37715							
10	02/05/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	37715	ASC	VV+VH	C	S1A	-100.4	12	
	14/05/2021	Esclava					37890							
11	14/05/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	37890	ASC	VV+VH	C	S1A	-52.7	12	
	26/05/2021	Esclava					38065							
12	26/05/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	38065	ASC	VV+VH	C	S1A	31.5	12	
	07/06/2021	Esclava					38240							
13	07/06/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	38240	ASC	VV+VH	C	S1A	35.4	12	
	19/06/2021	Esclava					38415							
14	19/06/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	38415	ASC	VV+VH	C	S1A	20.6	12	
	01/07/2021	Esclava					38590							
15	01/07/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	38590	ASC	VV+VH	C	S1A	-22.4	12	
	13/07/2021	Esclava					38765							
16	13/07/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	38765	ASC	VV+VH	C	S1A	-47.6	24	
	06/08/2021	Esclava					39115							
17	06/08/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	39115	ASC	VV+VH	C	S1A	24.2	12	
	18/08/2021	Esclava					39290							
18	18/08/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	39290	ASC	VV+VH	C	S1A	80.0	12	
	30/08/2021	Esclava					39465							
19	30/08/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	39465	ASC	VV+VH	C	S1A	-52.7	12	
	11/09/2021	Esclava					39640							
20	11/09/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	39640	ASC	VV+VH	C	S1A	-38.3	12	
	23/09/2021	Esclava					39815							
21	23/09/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	39815	ASC	VV+VH	C	S1A	-4.1	12	
	05/10/2021	Esclava					39990							
22	05/10/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	39990	ASC	VV+VH	C	S1A	0.0	12	
	17/10/2021	Esclava					40165							
23	17/10/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	40165	ASC	VV+VH	C	S1A	29.1	12	
	29/10/2021	Esclava					40340							
24	29/10/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	40340	ASC	VV+VH	C	S1A	-99.1	24	
	22/11/2021	Esclava					40690							
25	22/11/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	40690	ASC	VV+VH	C	S1A	27.5	12	
	04/12/2021	Esclava					40865							
26	04/12/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	40865	ASC	VV+VH	C	S1A	11.4	12	
	16/12/2021	Esclava					41040							
27	16/12/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	41040	ASC	VV+VH	C	S1A	127.0	12	
	28/12/2021	Esclava					41215							
28	28/12/2021	Maestra	IW	SLC	18	1050	41215	ASC	VV+VH	C	S1A	-52.3	12	
	09/01/2022	Esclava					41390							

**Tabla 9.7.5.** Lista de interferogramas correspondientes al año 2021 solicitados para procesamiento. Cada interferograma se generó a partir de imágenes SAR adquiridas en diferentes fechas.

Par	Imagen	Asignación	Modo de Haz	Nivel de procesamiento		Ruta	Marco	Orbita	Dirección	Polarización	Banda	Sentinel	Linea Base Espacial [m]	Linea Base Temporal [días]
1	09/01/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	41390	ASC	VV+VH	C	S1A	-38.4	12	
	21/01/2022	Esclava												41565
2	21/01/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	41565	ASC	VV+VH	C	S1A	-11.9	24	
	14/02/2022	Esclava												41915
3	14/02/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	41915	ASC	VV+VH	C	S1A	22.3	12	
	26/02/2022	Esclava												42090
4	26/02/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	42090	ASC	VV+VH	C	S1A	93.4	12	
	10/03/2022	Esclava												42265
5	10/03/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	42265	ASC	VV+VH	C	S1A	-74.8	12	
	22/03/2022	Esclava												42440
6	22/03/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	42440	ASC	VV+VH	C	S1A	-16.2	24	
	15/04/2022	Esclava												42790
7	15/04/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	42790	ASC	VV+VH	C	S1A	83.5	24	
	09/05/2022	Esclava												43140
8	09/05/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	43140	ASC	VV+VH	C	S1A	43.2	12	
	21/05/2022	Esclava												43315
9	21/05/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	43315	ASC	VV+VH	C	S1A	-134.5	12	
	02/06/2022	Esclava												43490
10	02/06/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	43490	ASC	VV+VH	C	S1A	2.3	12	
	14/06/2022	Esclava												43665
11	14/06/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	43665	ASC	VV+VH	C	S1A	-6.1	24	
	08/07/2022	Esclava												44015
12	08/07/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	44015	ASC	VV+VH	C	S1A	79.2	12	
	20/07/2022	Esclava												44190
13	20/07/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	44190	ASC	VV+VH	C	S1A	-78.4	12	
	01/08/2022	Esclava												44365
14	01/08/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	44365	ASC	VV+VH	C	S1A	-12.4	12	
	13/08/2022	Esclava												44540
15	13/08/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	44540	ASC	VV+VH	C	S1A	4.2	12	
	25/08/2022	Esclava												44715
16	25/08/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	44715	ASC	VV+VH	C	S1A	-59.0	12	
	06/09/2022	Esclava												44890
17	06/09/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	44890	ASC	VV+VH	C	S1A	59.5	24	
	30/09/2022	Esclava												45240
18	30/09/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	45240	ASC	VV+VH	C	S1A	-47.5	24	
	24/10/2022	Esclava												45590
19	24/10/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	45590	ASC	VV+VH	C	S1A	128.6	12	
	05/11/2022	Esclava												45765
20	05/11/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	45765	ASC	VV+VH	C	S1A	4.0	12	
	17/11/2022	Esclava												45940
21	17/11/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	45940	ASC	VV+VH	C	S1A	-71.3	12	
	29/11/2022	Esclava												46115
22	29/11/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	46115	ASC	VV+VH	C	S1A	-89.4	12	
	11/12/2022	Esclava												46290
23	11/12/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	46290	ASC	VV+VH	C	S1A	31.4	12	
	23/12/2022	Esclava												46465
24	23/12/2022	Maestra	IW	SLC	18	1050	46465	ASC	VV+VH	C	S1A	71.2	12	
	04/01/2023	Esclava												46640

Tabla 9.7.6. Lista de interferogramas correspondientes al año 2022 solicitados para procesamiento. Cada interferograma se generó a partir de imágenes SAR adquiridas en diferentes fechas.

Par	Imagen	Asignación	Modo de Haz	Nivel de procesamiento		Ruta	Marco	Orbita	Dirección	Polarización	Banda	Sentinel	Línea Base Espacial [m]	Línea Base Temporal [días]
1	04/01/2023	Maestra	IW	SLC	18	1050	46640	ASC	VV+VH	C	S1A	-52.0	24	
	28/01/2023	Esclava												46990
2	28/01/2023	Maestra	IW	SLC	18	1050	46990	ASC	VV+VH	C	S1A	122.1	12	
	09/02/2023	Esclava												47165
3	09/02/2023	Maestra	IW	SLC	18	1050	47165	ASC	VV+VH	C	S1A	16.4	12	
	21/02/2023	Esclava												47340
4	21/02/2023	Maestra	IW	SLC	18	1050	47340	ASC	VV+VH	C	S1A	28.7	24	
	17/03/2023	Esclava												47690
5	17/03/2023	Maestra	IW	SLC	18	1050	47690	ASC	VV+VH	C	S1A	32.1	12	
	29/03/2023	Esclava												47865
6	29/03/2023	Maestra	IW	SLC	18	1050	47865	ASC	VV+VH	C	S1A	-144.7	24	
	22/04/2023	Esclava												48215
7	22/04/2023	Maestra	IW	SLC	18	1050	48215	ASC	VV+VH	C	S1A	-93.6	12	
	04/05/2023	Esclava												48390
8	04/05/2023	Maestra	IW	SLC	18	1050	48390	ASC	VV+VH	C	S1A	-17.3	12	
	16/05/2023	Esclava												48565
9	16/05/2023	Maestra	IW	SLC	18	1050	48565	ASC	VV+VH	C	S1A	35.8	12	
	28/05/2023	Esclava												48740
10	28/05/2023	Maestra	IW	SLC	18	1050	48740	ASC	VV+VH	C	S1A	19.0	36	
	03/07/2023	Esclava												49265
11	03/07/2023	Maestra	IW	SLC	18	1050	49265	ASC	VV+VH	C	S1A	-38.3	12	
	15/07/2023	Esclava												49440
12	01/09/2023	Maestra	IW	SLC	18	1050	50140	ASC	VV+VH	C	S1A	55.8	12	
	13/09/2023	Esclava												50315
13	13/09/2023	Maestra	IW	SLC	18	1050	50315	ASC	VV+VH	C	S1A	-75.7	12	
	25/09/2023	Esclava												50490
14	25/09/2023	Maestra	IW	SLC	18	1050	50490	ASC	VV+VH	C	S1A	106.4	12	
	07/10/2023	Esclava												50665
15	07/10/2023	Maestra	IW	SLC	18	1050	50665	ASC	VV+VH	C	S1A	-69.4	12	
	19/10/2023	Esclava												50840
16	19/10/2023	Maestra	IW	SLC	18	1050	50840	ASC	VV+VH	C	S1A	-24.3	24	
	12/11/2023	Esclava												51190
17	12/11/2023	Maestra	IW	SLC	18	1050	51190	ASC	VV+VH	C	S1A	117.3	24	
	06/12/2023	Esclava												51540
18	06/12/2023	Maestra	IW	SLC	18	1050	51540	ASC	VV+VH	C	S1A	-22.0	12	
	18/12/2023	Esclava												51715
19	18/12/2023	Maestra	IW	SLC	18	1050	51715	ASC	VV+VH	C	S1A	-104.3	12	
	30/12/2023	Esclava												51890
20	30/12/2023	Maestra	IW	SLC	18	1050	51890	ASC	VV+VH	C	S1A	25.4	12	
	11/01/2024	Esclava												52065

**Tabla 9.7.7.** Lista de interferogramas correspondientes al año 2023 solicitados para procesamiento. Cada interferograma se generó a partir de imágenes SAR adquiridas en diferentes fechas.

Par	Imagen	Asignación	Modo de Haz	Nivel de procesamiento		Ruta	Marco	Orbita	Dirección	Polarización	Banda	Sentinel	Línea Base Espacial [m]	Línea Base Temporal [días]
1	11/01/2024	Maestra	IW	SLC	18	1050	52065	ASC	VV+VH	C	S1A	36.0	12	
	23/01/2024	Esclava												52240
2	23/01/2024	Maestra	IW	SLC	18	1050	52240	ASC	VV+VH	C	S1A	52.5	12	
	04/02/2024	Esclava												52415
3	04/02/2024	Maestra	IW	SLC	18	1050	52415	ASC	VV+VH	C	S1A	11.4	12	
	16/02/2024	Esclava												52590
4	16/02/2024	Maestra	IW	SLC	18	1050	52590	ASC	VV+VH	C	S1A	-27.0	12	
	28/02/2024	Esclava												52765
5	28/02/2024	Maestra	IW	SLC	18	1050	52765	ASC	VV+VH	C	S1A	-21.0	12	
	11/03/2024	Esclava												52940
6	11/03/2024	Maestra	IW	SLC	18	1050	52940	ASC	VV+VH	C	S1A	3.8	12	
	23/03/2024	Esclava												53115
7	23/03/2024	Maestra	IW	SLC	18	1050	53115	ASC	VV+VH	C	S1A	-35.6	12	
	04/04/2024	Esclava												53290
8	04/04/2024	Maestra	IW	SLC	18	1050	53290	ASC	VV+VH	C	S1A	77.0	12	
	16/04/2024	Esclava												53465
9	16/04/2024	Maestra	IW	SLC	18	1050	53465	ASC	VV+VH	C	S1A	-143.7	12	
	28/04/2024	Esclava												53640
10	28/04/2024	Maestra	IW	SLC	18	1050	53640	ASC	VV+VH	C	S1A	-9.4	12	
	10/05/2024	Esclava												53815
11	10/05/2024	Maestra	IW	SLC	18	1050	53815	ASC	VV+VH	C	S1A	15.6	12	
	22/05/2024	Esclava												53990
12	22/05/2024	Maestra	IW	SLC	18	1050	53990	ASC	VV+VH	C	S1A	-104.2	12	
	03/06/2024	Esclava												54165
13	03/06/2024	Maestra	IW	SLC	18	1050	54165	ASC	VV+VH	C	S1A	95.8	36	
	09/07/2024	Esclava												54690
14	09/07/2024	Maestra	IW	SLC	18	1050	54690	ASC	VV+VH	C	S1A	-15.3	12	
	21/07/2024	Esclava												54865

**Tabla 9.7.8.** Lista de interferogramas correspondientes al año 2024 solicitados para procesamiento. Cada interferograma se generó a partir de imágenes SAR adquiridas en diferentes fechas.