

ppi 201502ZU4659

Esta publicación científica en formato digital es
continuidad de la revista impresa

ISSN 0254 -0770 / e-ISSN 2477-9377 / Depósito legal pp 197802ZU38



REVISTA TÉCNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- REDALYC
- REDIB
- SCIELO
- DRJI
- INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL
- LATINDEX
- DOAJ
- REVENCYT
- CHEMICAL ABSTRACT
- MIAR
- AEROSPACE DATABASE
- CIVIL ENGINEERING ABTRACTS
- METADEX
- COMMUNICATION ABSTRACTS
- ZENTRALBLATT MATH, ZBMATH
- ACTUALIDAD IBEROAMERICANA
- BIBLAT
- PERIODICA

UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Dr. Humberto Fernández Morán
"Mis luchas son las del Quijote,
batallas que uno pierde, pero
gana la causa!"



DInSAR para Análisis Geomecánico de Yacimientos – Aplicación al Yacimiento Lagunillas Inferior 07, Lago de Maracaibo, Venezuela

Darío Antonio González Freitas¹  Orlando Zambrano Mendoza² 
Jorge Luis Barrios³ 

¹ Occidental Petroleum Corporation, Oxy Tower Woodlands, 1201 Lake Robbins Dr, The Woodlands, TX 77380,
Estados Unidos de América
Correo electrónico: dgonzalez10j@gmail.com

² Programa de Ingeniería de Petróleo, Escuela de Petróleo. Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Sector
Grano de Oro, Apartado postal 4011-A-526. Maracaibo, Zulia, Venezuela.
Correo Electrónico: ozambrano@fing.luz.edu.ve

³ Battelle memorial Institute, Ohio Columbus, 505 king Av, Columbus Ohio, 43201. / Ohio State University,
Columbus Ohio.
Correo Electrónico: Barrios.23@osu.edu

Autor de correspondencia: dgonzalez10j@gmail.com

<https://doi.org/10.22209/rt.v47a08>

Recepción: 31 mayo 2024 | Aceptación: 07 noviembre 2024 | Publicación: 20 diciembre 2024.

Resumen

Este estudio aborda el problema de la subsidencia en el yacimiento Lagunillas Inferior 07 (LGINF-07) en la Cuenca del Lago de Maracaibo, Venezuela, una preocupación clave para la industria petrolera, dado que desde 1926 se han registrado movimientos del terreno que afectan a las plataformas petroleras. El objetivo fue aplicar la técnica de Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) para monitorear la subsidencia, proporcionando datos precisos sin la necesidad de presencia física en el campo. Se utilizaron imágenes satelitales TerraSAR-X obtenidas entre 2011 y 2015, procesadas mediante interferometría diferencial para detectar deformaciones del terreno. Los resultados indicaron una tasa promedio de subsidencia de -0.035 metros/año, lo que permitió actualizar los modelos geomecánicos y mejorar la comprensión de los movimientos del suelo en la región, contribuyendo a la planificación y seguridad de las operaciones petroleras. Este análisis comparativo con datos históricos reveló la efectividad de DInSAR para anticipar futuros movimientos del terreno y mejorar la gestión de la infraestructura en zonas críticas de la industria petrolera. En conclusión, la técnica DInSAR es una herramienta valiosa para el monitoreo geomecánico, lo que optimiza el manejo de las infraestructuras y garantiza la seguridad en operaciones estratégicas.

Palabras clave: Compactación DInSAR; InSAR; geomecánica; subsidencia.

DInSAR for Geomechanical Reservoir Analysis – Application to Reservoir Lagunillas Lower 07, Lake Maracaibo, Venezuela

Abstract

This study addresses the issue of subsidence in the Lagunillas Inferior 07 (LGINF-07) field in the Lake Maracaibo Basin, Venezuela, a major concern for the oil industry due to ground movements recorded since 1926 that have impacted oil platforms. The objective was to apply the Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) technique to monitor subsidence and provide accurate data without the need for physical presence in the field. TerraSAR-X satellite images, obtained between 2011 and 2015, were processed using differential interferometry to detect ground deformations. The results showed an average subsidence rate of -0.035 meters per year, allowing for the update of geomechanical models and improving the understanding of soil movements in the region, contributing to the planning and safety of oil operations. This analysis, compared with historical data, revealed the effectiveness of DInSAR in predicting future ground movements and optimizing infrastructure management in critical areas of the oil industry. In conclusion, the DInSAR technique is a valuable tool for geomechanical monitoring, improving the safety and efficiency of strategic operations.

Keywords: Compaction; DInSAR; geomechanics; InSAR; subsidence.

DInSAR para Análise Geomecânica de Yacimientos – Aplicação no Yacimiento Lagunillas Inferior 07, Lago de Maracaibo, Venezuela

Resumo

Neste estudo foi aplicada a técnica diferencial de interferometria radar de abertura sintética (DInSAR) para monitorar a subsidência no yacimiento Lagunillas Inferior 07 (LGINF-07) dentro do Campo Lagunillas Lago, cuenca del Lago de Maracaibo, Venezuela. Considerando que desde 1926 as medições geodésicas registraram os movimentos do terreno nesta região crítica para a indústria petrolífera venezolana, o DInSAR permitiu obter dados precisos sem exigir presença física no campo, o que resultou em ahorros sofrimentos de custos e tempo. Os resultados revelaram um progresso progressivo sobre as plataformas petrolíferas pertinentes à unidade de produção Lagunillas Lago, com uma velocidade média anual de -0,035 m/ano. Esses dados permitiram atualizar um modelo geomecânico existente, melhorando a compreensão da subsidência e antecipando movimientos futuros das plataformas. Este avanço é crucial para o planejamento de infraestruturas e a segurança das operações petrolíferas na zona de interesse petrolero occidental. O estudo destaca a eficácia do DINSAR na gestão ambiental e no monitoramento geológico, com implicações significativas para a indústria petrolífera nacional.

Palavras-chave: DINSAR; InSAR; subsidência; compactação; geomecânica.

Introducción

El fenómeno de la subsidencia, caracterizado por el hundimiento gradual de la superficie terrestre, representa desafíos significativos para diversas industrias, especialmente en regiones con actividad humana intensiva como la extracción de petróleo (Leal, 1989). En este sentido, el yacimiento Lagunillas Inferior 07 (LGINF-07), localizado en el campo petrolero Lagunillas Lago, cuenca oriental del Lago de Maracaibo, se erige como un ejemplo primordial de tal región, donde el fenómeno de la subsidencia ha sido una preocupación de larga data para la industria petrolera nacional (Briceño et al., 2009).

Desde 1926, se llevan a cabo mediciones geodésicas de nivelación de precisión cada 2 años en la cuenca del Lago de Maracaibo, proporcionando información crucial sobre los movimientos verticales del terreno en la región. En 1952, esta red de monitoreo se expandió hacia las plataformas petroleras ubicadas en el Lago de Maracaibo, cercanas a la costa oriental, marcando un hito significativo en el estudio y comprensión de la subsidencia en la región. Estas mediciones geodésicas de nivelación de precisión, tanto en tierra como sobre las plataformas en el lago, han sido fundamentales para comprender la dinámica de la subsidencia en la cuenca del Lago de Maracaibo (Murria, 1991).

Por otra parte, para finales de los años ochenta, se iniciaron las primeras campañas de medición Global Positioning System (GPS) en combinación con las técnicas de nivelación de precisión, lo que marcó otro hito en el monitoreo y comprensión de la subsidencia en la zona de interés petrolero. Cabe resaltar que todas las mediciones GPS que se han ejecutado hasta la fecha solo se han logrado sobre un grupo de puntos de control terrestre (Benchmark), pertenecientes a la red de control geodésico (Aguilar et al., 2005). Sin embargo, los métodos tradicionales de medición geodésica (Nivelación de precisión y Global Navigation Satellite System (GNSS) a menudo presentan desafíos, como el acceso limitado a los puntos de control, cobertura espacial limitada, altos costos y complejidades logísticas asociadas con el trabajo de campo (Leal, 1989).

Para abordar estos desafíos y mejorar las capacidades de monitoreo del fenómeno de la subsidencia sobre las plataformas petroleras ubicadas en el Lago de Maracaibo, este estudio se propone evaluar la aplicación del diferencial de interferometría radar de apertura sintética (DInSAR) en el yacimiento Lagunillas Inferior 07 (LGINF-07), dentro del campo Lagunillas Lago. DInSAR ofrece una técnica de teledetección que permite una cobertura de área amplia y mediciones precisas de deformaciones del terreno sin necesidad de un trabajo de campo extenso.

Cabe mencionar que estudios recientes de DInSAR en la región se han concentrado en las deformaciones focalizadas en tierra firme a lo largo de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo (Arenas I. 2018 y Quintana G. 2021), sin evidenciar los movimientos verticales en las facilidades operacionales de superficie ubicadas en el Lago. Una de las aplicaciones más relevantes es el uso la técnica DInSAR, para el monitoreo de yacimientos petroleros. Esta técnica ofrece datos extremadamente precisos sobre la deformación superficial, lo que permite determinar el comportamiento geodinámico del yacimiento. Además, facilita la validación de los cambios modelados en el volumen del yacimiento a causa de la extracción o inyección de fluidos.

Asimismo, estos datos constituyen una fuente adicional de información para los modelos geomecánicos, que son esenciales en el análisis de la dirección del drenaje de fluidos (Bevc et al., 2022). Para correlacionar la deformación superficial con los parámetros del yacimiento, es crucial emplear la geomecánica y métodos de inversión geofísica. La calibración de modelos geomecánicos representa una de las aplicaciones más significativas del DInSAR en la industria petrolera.

Los cambios en la tensión, la presión de poros y la sobrecarga se producen cada vez que se inyectan o extraen fluidos de un yacimiento. Es importante destacar, además, las variaciones de temperatura inducidas, como las que resultan de la inyección de vapor (Alhogaraty et al., 2022). En este contexto, el objetivo principal de este estudio es evaluar la utilidad de DInSAR como técnica alternativa para monitorear el fenómeno de la subsidencia en la cuenca del Lago de Maracaibo, con especial enfoque en las instalaciones petroleras de la unidad de explotación del campo Lagunillas Lago.

El trabajo se basa en imágenes de radar obtenidas de la plataforma satelital TerraSAR-X. Además, el estudio tiene la intención de aprovechar los datos de DInSAR para refinar los modelos geomecánicos existentes, mejorando así nuestra comprensión de los factores subyacentes que impulsan el fenómeno de la subsidencia en el campo Lagunillas Lago. Estas ideas son cruciales para informar prácticas de desarrollo sostenible y garantizar la seguridad y resiliencia de la infraestructura y operaciones en regiones propensas al fenómeno de la subsidencia.

Materiales y Métodos

Datos SAR

La empresa AIRBUS Defense and Space desempeñó un papel fundamental en esta investigación al encargarse de las operaciones de adquisición y procesamiento de las imágenes Synthetic Aperture Radar (SAR), utilizando la técnica de interferometría DInSAR. Durante la fase de adquisición, AIRBUS empleó la plataforma satelital TerraSAR-X, especializada en la captura de escenas SAR en la banda X, caracterizada también por tomar imágenes SAR de alta resolución espacial y radiométrica, así como su capacidad de penetración atmosférica. A lo largo de un período de 44 meses, TerraSAR-X logró capturar un total de 69 escenas. Esta secuencia de imágenes fue obtenida con una frecuencia de visitas de 11 días, lo que permitió un monitoreo constante y detallado del área de estudio. En la Tabla 1 se detallan los parámetros utilizados en la adquisición de las escenas.

Tabla 1. Parámetros establecidos en el satélite para la adquisición de imágenes SAR sobre el yacimiento LGINF-07, Oeste del Lago de Maracaibo, Venezuela.

Área de estudio	Lagunillas Lago
Periodo de observación	29-07-2011 hasta 21-03-2015
Cantidad de escenas SAR	69
Tipo de órbita / Enumeración	Ascendente / 150
Rayo	Strip 009
Ángulo de incidencia	35°
Polarización	H/H
Resolución en range (m)	1,2
Resolución en azimut (m)	3,3
Tamaño de cada imagen	30.000 x 50.000 m
Nivel de procesamiento	SSC
Rango de líneas bases	< 1.000 m
Área cubierta aproximada (km²)	2.500

SAR= Syntetic Aperture Radar, HH: Horizontal / Horizontal, SSC= Single Look Slant Range Complex.

En la Figura 1 se muestra el área (línea amarilla) de la huella de las imágenes SAR capturadas, mientras que la línea roja detalla la unidad de producción (UP) Lagunillas Lago. En la Figura 2 se aprecia la línea temporal de captura de las escenas SAR para el período de estudio 2011-2015.

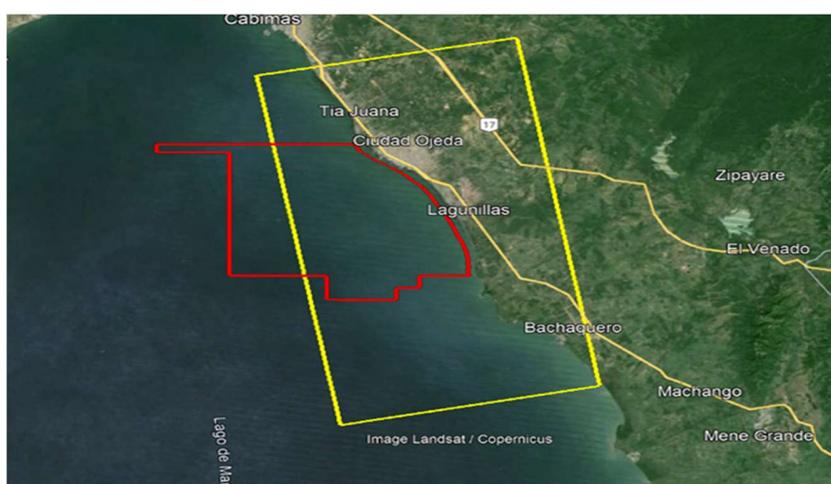


Figura 1. Huella de las escenas Syntetic Aperture Radar (SAR) capturadas por la plataforma satelital Terrasar-X sobre la zona de estudio (línea amarilla) y área perteneciente a la unidad de producción Lagunillas Lago (línea roja).

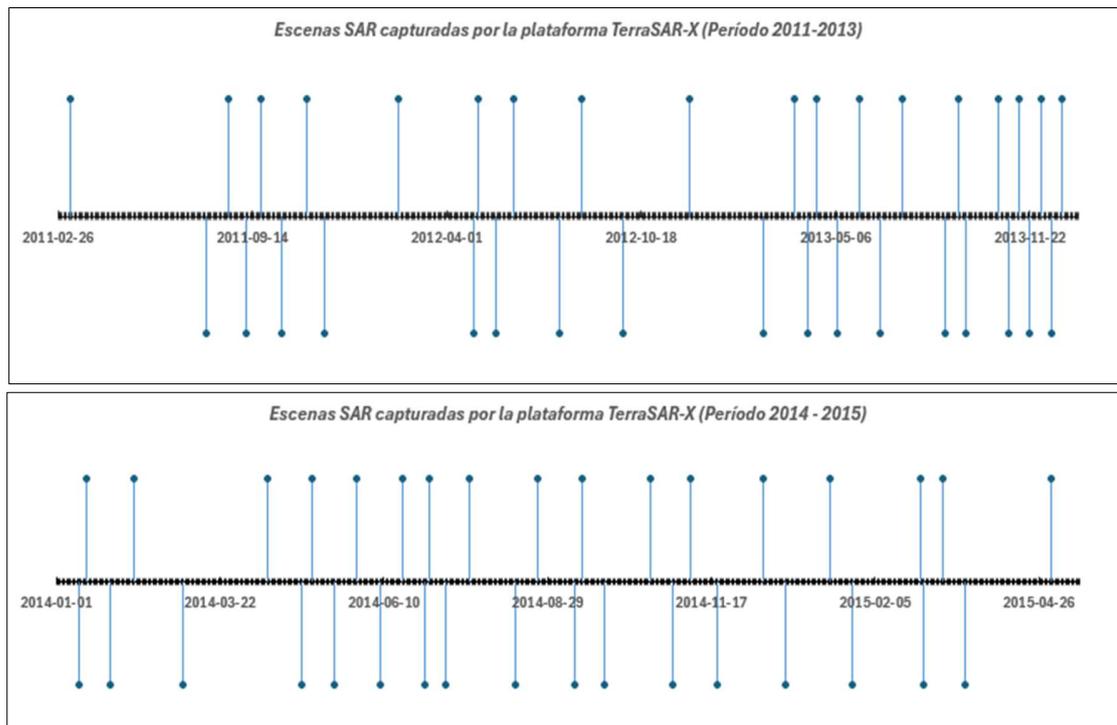


Figura 2. Línea temporal de las escenas Syntetic Aperture Aradar (SAR) capturadas por TerraSAR-X sobre toda la zona de estudio en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo, Venezuela.

Procesamiento de las imágenes SAR

Para esta fase de la investigación, los técnicos de AIRBUS utilizaron el programa SARscape, versión 5.1 de Sarmap S. A. Se aplicaron dos métodos de procesamiento: diferencial de interferometría de radar (DInSAR) y línea de base corta o SBAS (Small BAseLine Subset), de acuerdo con lo sugerido por Angarita et al. (2023), con una ventana multilooking de 4x4 y los resultados finales se geocodificaron en una resolución topográfica de 10 m. La técnica SBAS se empleó como un paso esencial para el refinamiento de los resultados obtenidos a través de DInSAR.

Este proceso permitió incrementar la confiabilidad de los datos relacionados con la deformación temporal en la zona de interés. En la Figura 3 se incluye un diagrama general del procesamiento interferométrico. De acuerdo con las escenas SAR, en la Figura 4 se detalla el resultado de las conexiones de red SBAS (líneas azules). Cada conexión entre dos puntos representa un interferograma. La línea tiempo-posición muestra un gráfico de conexión de distribución normal y de alta redundancia.

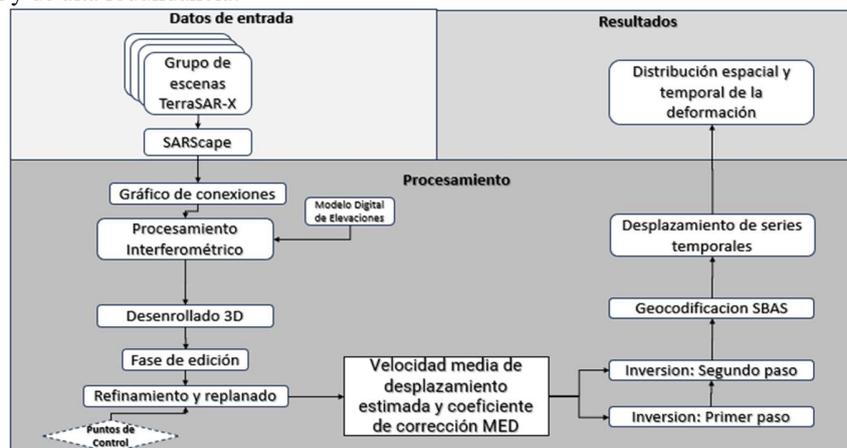


Figura 3. Flujoograma de procesamiento interferométrico, DInSAR= Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar, SBAS= Short BAseLine Subsets, MED= Modelo de Elevación Digital.

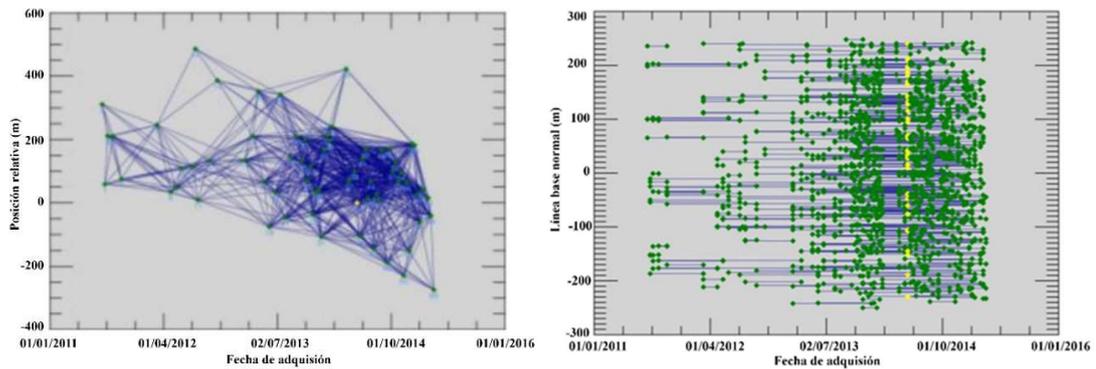


Figura 4. Gráficas de conexión para el procesamiento SBAS: línea tiempo versus posición (a) y línea tiempo versus-línea de base (b). SBAS= Short BAseLine Subsets.

Por otro lado, basándose en estudios previos de nivelación de precisión realizados en la zona, así como en la evidencia histórica que reporta velocidades de hundimiento anual moderadas de hasta $-0,050$ m/año (Leal, 1989), se observaron que las condiciones atmosféricas al momento de la captura de las escenas SAR, así como la abundante presencia de cúmulos de lluvia, generaron sombras en las imágenes de amplitud SAR (Figura 5). Estas sombras dificultaron el proceso de distinguir entre el hundimiento del terreno y las condiciones atmosféricas, por lo que se decidió recortar dichas escenas debido a que generarían ruido en los resultados del procesamiento interferométrico.

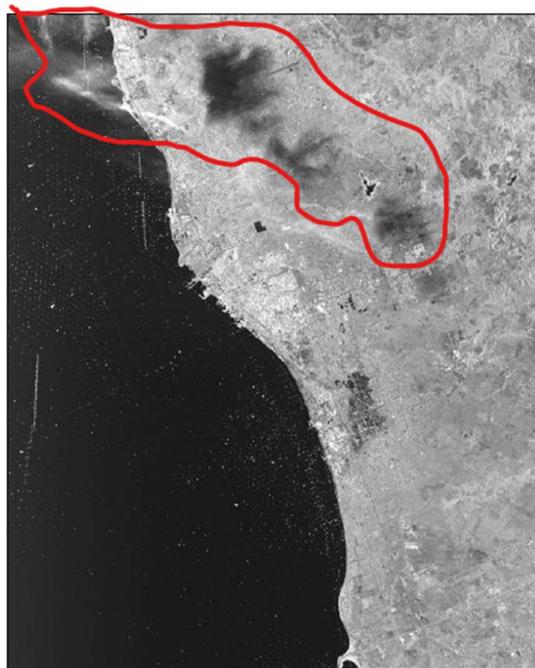


Figura 5. Imagen de amplitud sobre la zona de estudio mostrando grupos densos de lluvias (línea roja) y sus sombras correspondientes (en negro) reflejadas en el terreno.

En la Tabla 2 se presenta un resumen de los datos introducidos para la fase de procesamiento interferométrico. Es importante mencionar que la fase de procesamiento de datos se ejecutó en aproximadamente 4 meses.

Tabla 2. Resumen de los datos introducidos para el procesamiento DInSAR sobre el yacimiento LGINF-07, Oeste del Lago de Maracaibo, Venezuela.

Número de imágenes	Número de interferogramas	Máxima línea de base absoluta (m)	Mínima línea de base absoluta (m)	Separación temporal máxima (días)	Separación temporal mínima (días)
69	876	250	1	363	11

Datos de nivelación geodésica de precisión

Debido a la extracción de petróleo y gas iniciada desde el año 1926 a lo largo de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo (COLM), una superficie de aproximadamente 2.500.000 m² ha experimentado hundimiento superficial progresivo, con una rata de hasta -0,200 m/año en algunos sectores, como por ejemplo Lagunillas Tierra (Leal, 1989).

Para monitorear y controlar este fenómeno, la empresa petrolera Petróleos de Venezuela Sociedad Anónima (PDVSA) diseñó y construyó una red de nivelación geodésica convencional de precisión a partir de 1929 (Leal, 1989). Esta red consta de más de 1.600 puntos de control vertical conectados (Benchmark), algunos de los cuales se encuentran fuera de la zona afectada, incluyendo áreas en el Lago de Maracaibo. En total, la red de nivelación abarca 1.400.000 m de líneas de nivelación principales y secundarias.

El estudio completo de medición geodésica convencional se ejecutaba cada dos años (Leal, 1989), hasta el 2012. Estas mediciones conllevan a una serie de etapas que deben cumplirse a cabalidad, tales como: medición en campo por parte de grupos de topógrafos, control de calidad de los datos, procesamiento y resultados; todas estas etapas tienen un tiempo medio de ejecución entre 9 meses hasta un año. Cabe destacar que para esta investigación solo se utilizaron los resultados obtenidos de las mediciones convencionales.

Compactación y subsidencia en la zona de estudio

Cuando se inicia el proceso de explotación del petróleo y gas atrapados en los yacimientos, se produce un descenso progresivo en la presión de los fluidos y de los poros. Esto incrementa el esfuerzo efectivo, provocando la compactación del yacimiento y una disminución en su tamaño. Este efecto puede causar un hundimiento progresivo de la superficie, conocido como subsidencia (Leal, 1989). En la Figura 6 se ilustran estos fenómenos de manera clara.

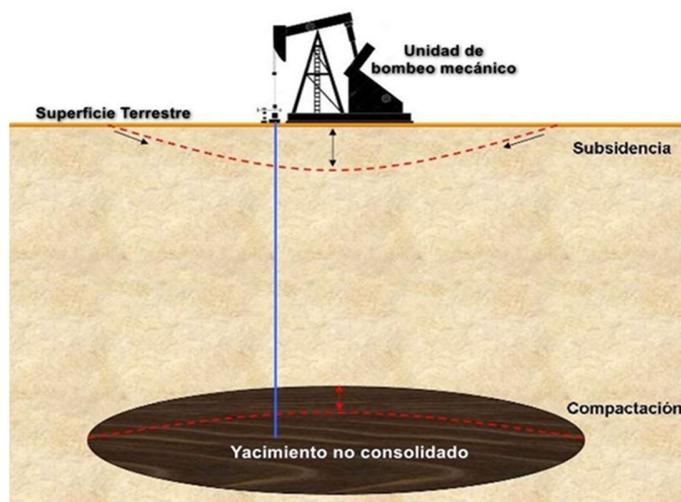


Figura 6. Comportamiento de la subsidencia a partir de la compactación de un yacimiento somero no consolidado. Línea roja segmentada cercana a la superficie terrestre indica el hundimiento progresivo del terreno (subsidencia), la línea continua azul indica la trayectoria vertical de la perforación del pozo, la línea segmentada roja dentro del yacimiento no consolidado indica la reducción del volumen producto de la extracción de fluidos y disminución de la presión (compactación).

Según Fjar et al. (2008) la mayoría de los yacimientos petroleros a nivel mundial experimentan solo un pequeño grado de compactación y los efectos sobre la superficie (subsidencia) son imperceptibles. Para poder observar un grado considerable de subsidencia es necesario que una o varias de las siguientes condiciones que se mencionan a

continuación se hagan presentes (Fjar et al., 2008):

1. La caída de presión de poros debe ser significativa. Para mantener la presión en el yacimiento se hace necesario la inyección de agua o gas con la finalidad de disminuir la compactación.
2. La roca yacimiento debe ser altamente compresible.
3. El yacimiento debe tener un espesor considerable. Sin embargo, toda la zona agotada debe ser considerada. Un acuífero adyacente contribuirá a la compactación y podría ser parte de la sobrecarga si este es drenado hacia el yacimiento.
4. Para que ocurra el efecto de subsidencia, la compactación del yacimiento debe ser significativa, adicionalmente no debe estar enmascarado por la sobrecarga. El grado de restricción depende de la profundidad, geometría del yacimiento y del contraste entre las propiedades mecánicas del yacimiento con su entorno.

Teniendo en cuenta estas condiciones, se esperaría que solo unos pocos yacimientos a nivel mundial puedan causar problemas de subsidencia graves. Uno de esos pocos yacimientos que sufren este fenómeno es el LGINF-07, ubicado en el campo petrolero Lagunillas Lago, cuenca oriental del Lago de Maracaibo, Venezuela, el cual cumple con la mayoría de las condiciones antes descritas, ya que su característica principal es que es un yacimiento somero (1.082,04 m) de rocas no consolidadas, al cual se le ha inyectado aguas efluentes desde 1984 para mantener su presión de poros; es un yacimiento agotado y sufre una compactación severa, produciendo una subsidencia acelerada (Briceño et al., 2009).

En el caso de una sobrecarga elástica y uniforme, Geertsma (1973) identificó algunas fórmulas analíticas a partir de un radio de drenaje (R) específico para un yacimiento en estudio con un espesor (H) y una profundidad (D). Las fórmulas analíticas no son la mejor herramienta para predecir de forma precisa el efecto de subsidencia sobre un yacimiento en específico; sin embargo, son muy utilizadas para destacar los parámetros más importantes que gobiernan el fenómeno (Alhogaraty et al., 2022). Para el cálculo de la estimación máxima de la subsidencia relacionada con los parámetros mecánicos del yacimiento LGING-07, se utilizó la siguiente fórmula (Geertsma, 1973), tomando en consideración los parámetros del yacimiento:

$$\Delta z_{m\acute{a}x} = 2C_m(1 - \nu)H * \beta\Delta p * \left(1 - \frac{\frac{D}{R}}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{R}\right)^2}} \right) \quad (1)$$

Donde: $\Delta z_{m\acute{a}x}$ es la máxima subsidencia estimada, C_m el coeficiente de compactación uniaxial, ν el módulo de Poisson, H el espesor o altura del intervalo productivo, β : C_r/C_b , C_r : la compresibilidad de matriz de la roca, C_b la compresibilidad del paquete de rocas, Δp la reducción de presión de poros en el yacimiento, D la profundidad de la formación y R el radio del yacimiento.

Por otro lado, es importante mencionar que la compresibilidad de la roca es una propiedad de la materia que hace que todos los cuerpos disminuyan de volumen al someterlos a una presión o compresión determinada, manteniendo constantes otros parámetros (Zoback, 2010). Esta propiedad puede medirse tanto para el volumen total de la roca como para cada uno de los volúmenes que la componen (poros y granos), e incluso para los fluidos que la saturan.

La compresibilidad total (C_b) del paquete de rocas en un intervalo dado y a una temperatura fija se define como el cambio de volumen por unidad de volumen inicial causado por una variación de presión, y puede ser calculada como la inversa del módulo volumétrico (K) (Zoback, 2010). Este tipo de compresión es característico en los yacimientos someros o con sedimentos no consolidados (Zoback, 2010). La siguiente fórmula planteada por Zoback (2010), muestra como calcular el módulo volumétrico (K) en función de los módulos elásticos de Young y Poisson:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2)$$

Donde: K es el módulo volumétrico, E el módulo de Young y ν el módulo de Poisson.

Resultados y Discusión

Después de definir los parámetros satelitales iniciales y desarrollar los modelos de procesamiento para obtener el mejor resultado interferométrico, se inició el procesamiento digital y la generación de interferogramas, seguido de la aplicación de la técnica de Interferometría de Radar Diferencial (DInSAR). La tabla 3 muestra se incluyen los resultados interferométricos obtenidos.

De acuerdo con los reportes de mediciones geodésicas convencionales hasta el año 2012, la zona más afectada por el fenómeno de subsidencia se encuentra en la región centro-oriental del yacimiento, con una tasa anual de hundimiento de hasta $-0,06$ m/año y un acumulado de $-5,500$ m (Leal, 1989). Al cotejar las curvas de velocidades anuales entre la nivelación 2012 y las generadas por el resultado interferométrico DinSAR-SBAS, se obtuvieron resultados de comportamientos similares, con rangos máximos de diferencias de hasta $0,060$ m. En la Figura 7 se presentan las velocidades de hundimiento para ambos enfoques.

Tabla 3. Resumen de los datos generados a partir de los resultados del procesamiento DInSAR sobre el yacimiento LGINF-07, Oeste del Lago de Maracaibo, Venezuela.	
Período de seguimiento	29/07/2011 - 21/03/2015
Velocidad media anual (m/año)	-0,035
Precisión media (m)	+/- 0,0004
Subsidencia máxima detectada (m)	-1,650
Densidad de píxeles (pixel/m²)	0,000355

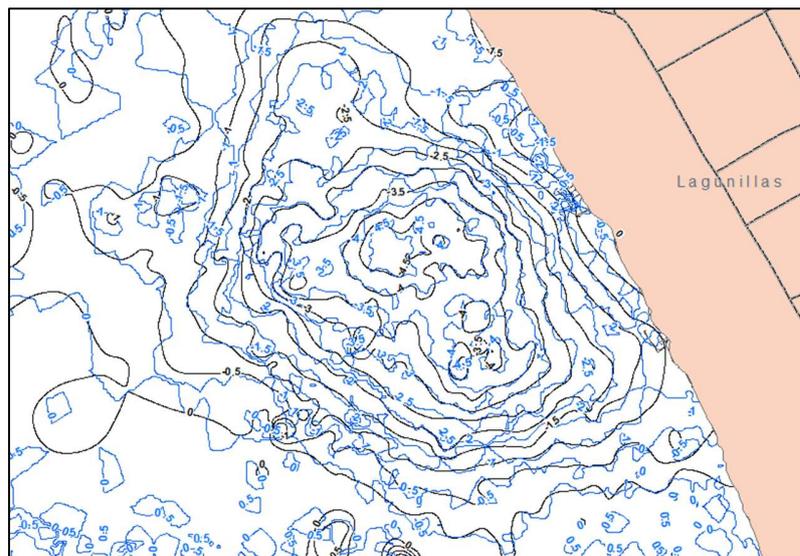


Figura 7. Curvas de velocidades de hundimiento, en centímetros, generadas por los resultados de nivelación geodésica de precisión: año 2012 (líneas azules) y DinSAR (líneas negras) sobre el yacimiento LGINF-07, Oeste del Lago de Maracaibo, Venezuela, DInSAR= Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar.

De acuerdo con los resultados, el valor mínimo de velocidad de hundimiento considerado para la UP Lagunillas Lago como alerta ante una posible afectación en la integridad de las plataformas petroleras a causa del hundimiento, es de a partir de $-0,040$ m/año. Tomando en consideración este parámetro y luego de visualizar los mapas de velocidades de hundimiento anual y acumulada entre el período 2011-2015, se lograron detectar tres regiones o parcelas ubicadas en la zona nororiental, confirmando así los reportes generados por las mediciones convencionales. Dichas parcelas son AGUA-230, AGUA -241 y AGUA-242, las cuales se muestran en la Figura 8.

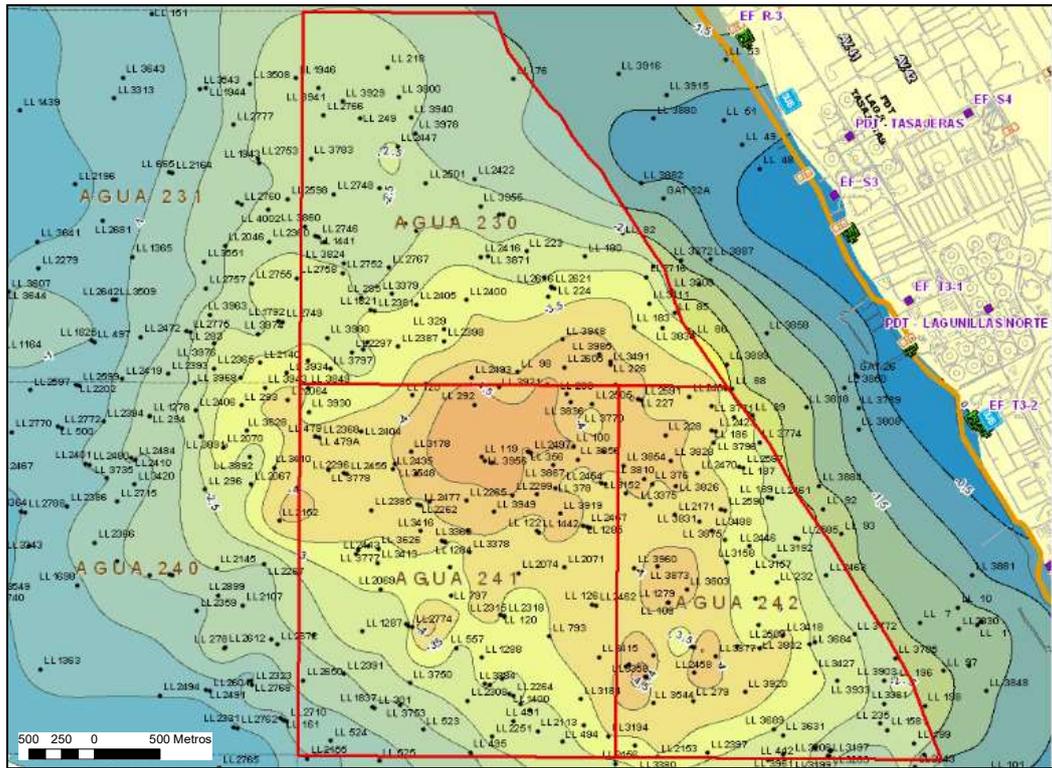


Figura 8. Identificación de las parcelas de producción (AGUA) 230, 241 y 242 con mayor hundimiento anual (línea roja) sobre el yacimiento LGINF-07, Oeste del Lago de Maracaibo, Venezuela (PDVSA).

Esta observación superficial también contrasta con la zona de menor presión del yacimiento, que presenta un rango de presión de 2.757,904 a 7.584,236 pascales. Esta área corresponde además a la zona de mayor actividad petrolera, representando el 79 % de la producción total del campo. Los pozos y las instalaciones que presentaron velocidades de hundimiento superiores a -0,040 m/año, localizados dentro de las tres parcelas mencionadas, se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4. Instalaciones afectadas por la subsidencia sobre el yacimiento LGINF-07, Oeste del Lago de Maracaibo, Venezuela.

Parcela	Instalaciones afectadas
AGUA 230	22 pozos
AGUA 241	98 pozos, 1 estación de flujo, 4 estaciones múltiples de gas, 3 estaciones múltiples de producción, 1 estación múltiple de alta presión
AGUA 242	73 pozos, 1 estación múltiple de gas

Con la finalidad de determinar una relación subsidencia-compactación, se calculó el volumen de hundimiento determinando el área de cada parcela con el descenso parcial de los pozos afectados por épocas o cada mes que se capturó la imagen con su correspondiente reporte mensual de producción. En total se obtuvieron 45 épocas. Con respecto a los datos de producción (petróleo y gas) de las zonas afectadas, se generaron los reportes mensuales para cada parcela (AGUA-230, AGUA 241 y AGUA-242), de tal forma que coincidieran con la captura mensual del interferograma procesado.

El comportamiento temporal de la subsidencia en la parcela AGUA-230 comenzó en agosto de 2011, observándose pequeños focos distribuidos en casi toda el área. Para marzo de 2012, se identificaron dos pequeños focos más, localizados en las zonas centro y sur. Es notable que las áreas con mayor subsidencia coinciden con la ubicación de

los pozos menos productivos. La subsidencia acumulada registrada en esta área alcanza los $-0,178$ m, tal como se ilustra en la Figura 9.

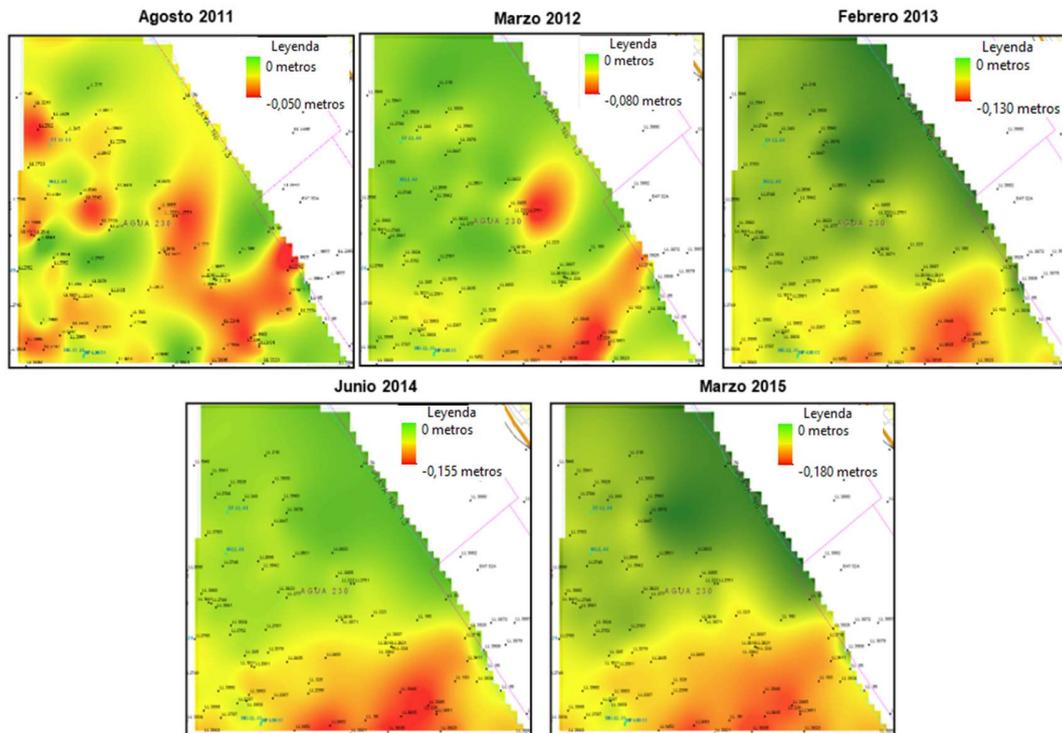


Figura 9. Evolución de la subsidencia en la parcela AGUA-230 para el periodo julio-2011 y marzo-2015, sobre el yacimiento LGINF-07, Oeste del Lago de Maracaibo, Venezuela.

Posteriormente, se generaron superficies parciales de subsidencia en función del tiempo para el AGUA-241. En la figura 10 se observan pequeños focos ubicados en la zona central y oriental de la parcela al inicio de las mediciones de subsidencia. En marzo de 2012 el foco se centra hacia la zona noreste. Luego entre los años 2013 y 2015, el foco se fue expandiendo hacia la zona sur occidental abarcando el 60 % de la parcela, con una subsidencia acumulada de $-0,179$ m.

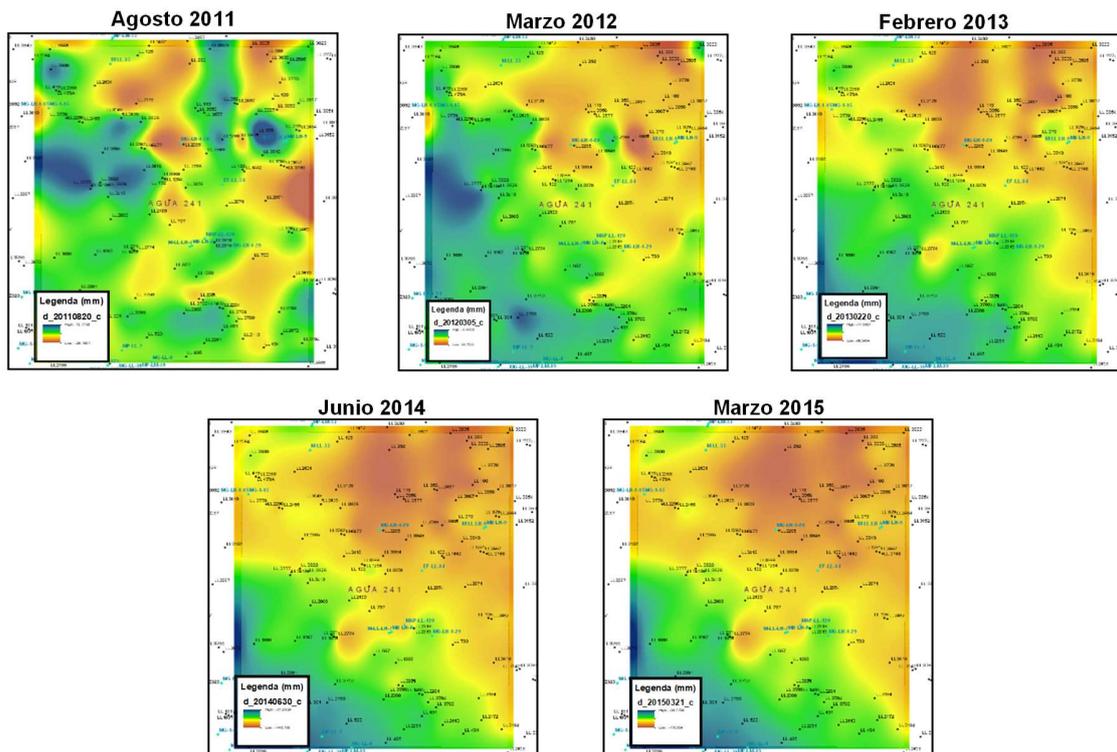


Figura 10. Evolución temporal de la subsidencia en la parcela AGUA-241 para el período julio-2011 y marzo-2015, sobre el yacimiento LGINF-07, Oeste del Lago de Maracaibo, Venezuela.

Para el caso de AGUA-242, ubicada muy cercana a la costa, el comportamiento de la subsidencia en función del tiempo mostró la misma tendencia que la parcela anterior, pero en la zona occidental. Inicialmente, se observan pequeños focos ubicados en la zona central y occidental de la parcela, tal y como se aprecia en la Figura 11. Desde el año 2012 hasta 2015 existe una tendencia a expandirse la subsidencia desde la zona centrooccidental hacia la centrooriental, con valores de subsidencia acumulada de -17,1 cm. La zona de subsidencia abarca casi el 70 % de la totalidad de la parcela (Barrios *et al.*, 2016).

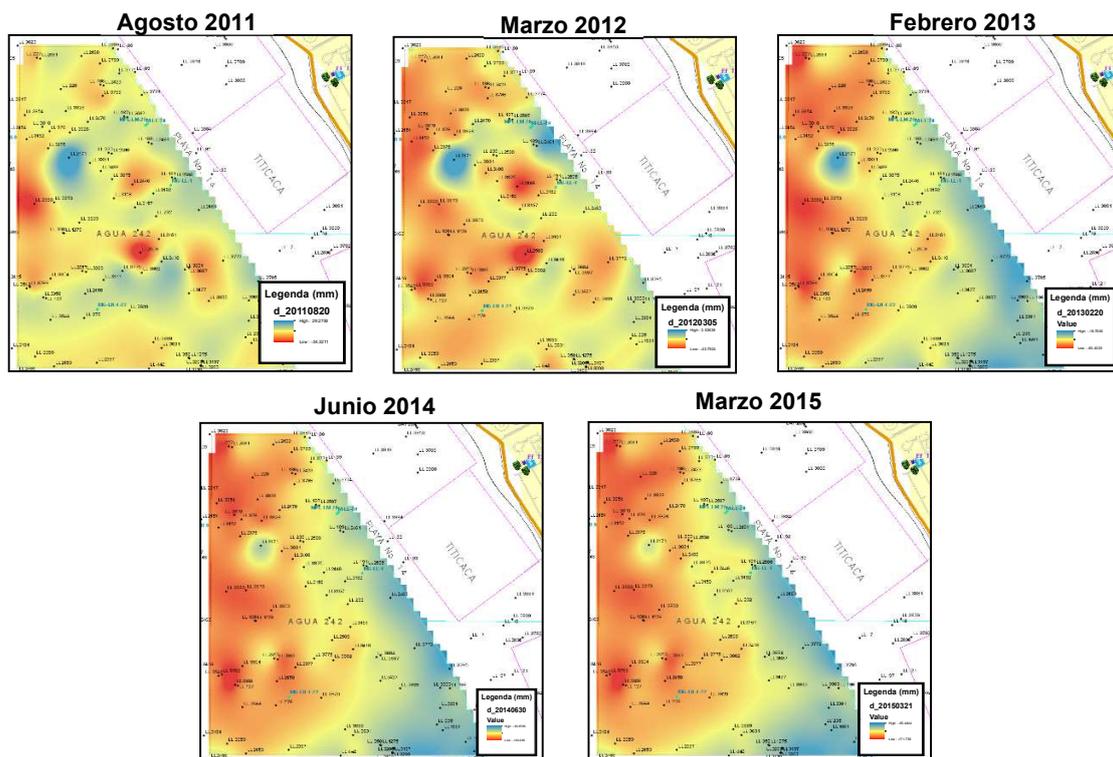


Figura 11. Evolución temporal de la subsidencia en la parcela AGUA-242 para el período julio-2011 y marzo-2015, sobre el yacimiento LGINF-07, Oeste del Lago de Maracaibo, Venezuela.

Con la integración de los resultados obtenidos para las tres parcelas involucradas (AGUA-230, AGUA-241 y AGUA-242), referidos a los volúmenes de subsidencia por DInSAR; producción y extracción de fluidos (petróleo y agua), se construyó una gráfica (Figura 12) que muestra que entre julio de 2011 y marzo de 2015 la parcela AGUA-242 no solo fue la que presentó la mayor producción con un volumen de 8.354.361 barriles, sino también la que experimentó la menor subsidencia, registrando 3.429,338 barriles.

Le sigue la parcela AGUA-230, con 7.087,271 barriles extraídos y una subsidencia calculada de 3.749,036 barriles. Finalmente, la parcela AGUA-241 registró una producción de 6.846.010 barriles y un hundimiento acumulado de 4.055.239 barriles. Según Angarita *et al.* (2023), en este caso, el fenómeno de subsidencia es inversamente proporcional a la producción y extracción de fluidos.

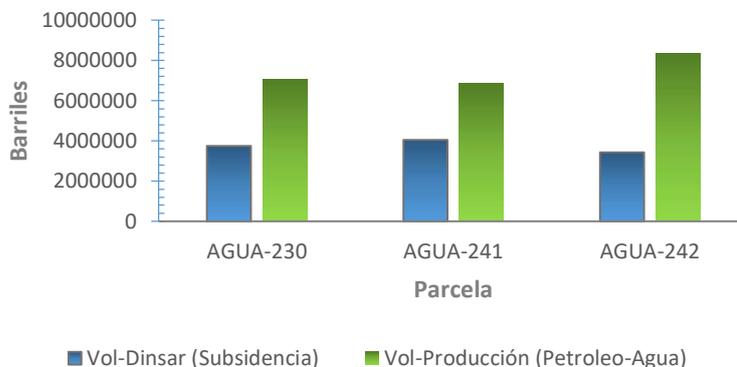


Figura 12. Comparación de los volúmenes (vol) entre la subsidencia DInSAR y la producción de fluidos de las parcelas AGUA-230, AGUA-241 y AGUA-242 para el período julio-2011 y marzo-2015 sobre el yacimiento LGINF-07, Oeste del Lago de Maracaibo, Venezuela.

Al aplicar la Ecuación 1, desarrollada por Geertsma (1973), utilizando los parámetros mostrados en la Tabla 5, la estimación máxima de subsidencia calculada fue de -2.898,343 m. Al comparar este valor con la subsidencia acumulada desde 1929 hasta 2015, determinada tanto mediante métodos convencionales (nivelación de precisión) como con la técnica DInSAR, que presentó un total de -3,248 m, se observa una diferencia de 0,4986 m.

Esta discrepancia sugiere la posibilidad de cambios en las propiedades mecánicas del subsuelo desde el último estudio geomecánico, lo que indica la necesidad de realizar nuevas muestras de núcleos para el yacimiento en estudio. En este sentido, se consideraron los resultados obtenidos a partir del análisis de las propiedades mecánicas elásticas del procesamiento del registro sísmico bipolar para el pozo LL-4034, localizado en la zona de interés.

Utilizando la Ecuación 2, en función de los módulos elásticos de Young y Poisson (Zoback, 2010), se obtuvo la gráfica presentada en la Figura 13. Es claramente observable que la compresibilidad en el miembro Laguna se mantiene entre un rango muy bajo de $5,21 \times 10^{-7}$ y $8,40 \times 10^{-7}$ pascales. Por su parte, el miembro Lagunillas Inferior presenta un comportamiento anormal con tendencia hacia el aumento en los primeros 36,576 m, con un valor máximo de $1,78 \times 10^{-6}$ pascales. Más allá de la profundidad de 1.085,088 m, las magnitudes de compresibilidad retoman nuevamente el rango detectado en el miembro Laguna. En la Tabla 6 se muestra el resultado de la compresibilidad para ambos miembros.

Tabla 5. Datos utilizados para el cálculo de la estimación máxima de subsidencia sobre el yacimiento LGINF-07, Oeste del Lago de Maracaibo, Venezuela.

Parámetro	Valores	Unidad
Cm	0,35193	Pascal
ν	0,299	-
H	121,92	Metro
β	0,9969	-
Δp	19.995,000	Pascal
D	1.142,390	Metro
R	600,591	Metro
E	14590	-
AZ_{max}	2.898,343	Metro

Cm= Coeficiente de compactación uniaxial, ν = Módulo de Poisson, H= Espesor o altura del intervalo productivo, β = compresibilidad de matriz de la roca, Δp = Reducción de presión de poros en el yacimiento, D= Profundidad de la formación, R=Radio del yacimiento, E= Módulo de Young, AZ_{max} = Máxima subsidencia estimada.

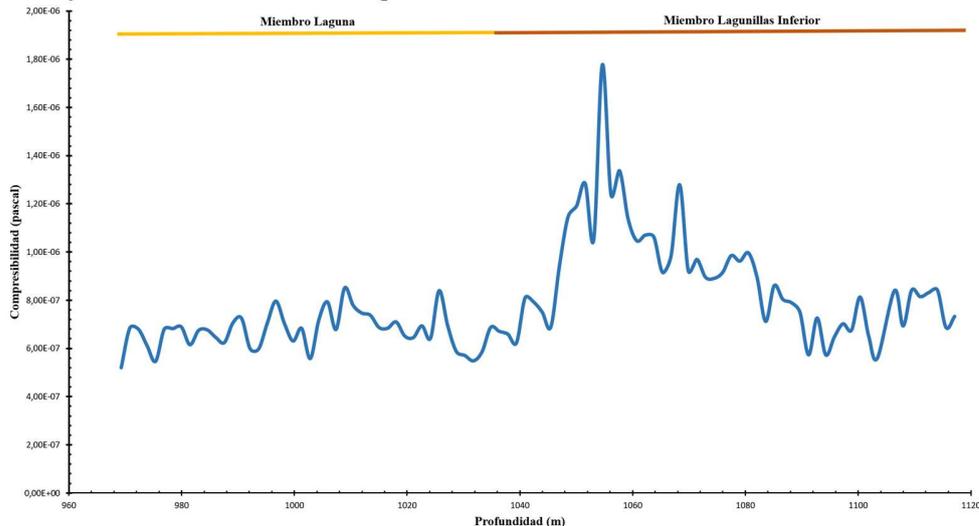
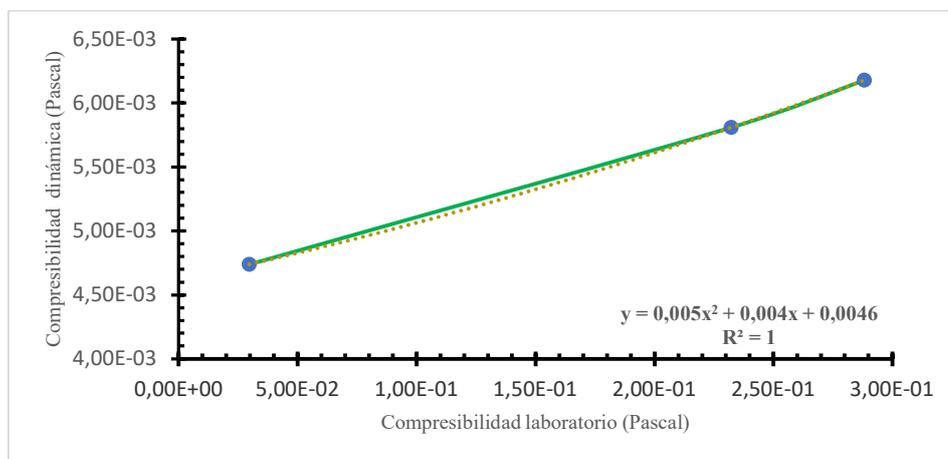


Figura 13. Comportamiento de la compresibilidad a lo largo del yacimiento LGINF-07 Oeste del Lago de Maracaibo, Venezuela.

Tabla 6. Valores de compresibilidad para ambos miembros Laguna y Lagunillas Inferior del yacimiento LGINF-07, Oeste del Lago de Maracaibo, Venezuela

Miembro	Rango de profundidad (m)	Máximo (pascal)	Mínimo (pascal)	Media (pascal)
Laguna	969,264 - 1.035,320	$8,21 \times 10^{-07}$	$5,21 \times 10^{-07}$	$6,73 \times 10^{-07}$
Lagunillas Inferior	1.037,844 - 1.117,092	$1,78 \times 10^{-06}$	$5,60 \times 10^{-07}$	$8,92 \times 10^{-07}$

Adicionalmente, los resultados de la compresibilidad fueron cotejados con la compresibilidad determinada en el laboratorio a las muestras de núcleo obtenidas en el pozo LL-3548, resultando la gráfica que se presenta en la Figura 14, y su respectiva ecuación ajustada. Cabe destacar que los resultados de las pruebas en laboratorio arrojaron como conclusión que la compresibilidad total de la roca (C_b) y su deformación volumétrica presentan variaciones en función de la presión efectiva aplicada para los diferentes niveles de presión de yacimiento. Además, los rangos medios de los valores de la compresibilidad varían entre 0,9368 y 0,196 pascales para un rango de presión efectiva de 34.473.800 a 3.447.380 Pascal.

**Figura 14.** Comportamiento de la compresibilidad calculada versus la compresibilidad medida en laboratorio sobre el yacimiento LGINF-07, Oeste del Lago de Maracaibo, Venezuela.

Conclusiones

La técnica DInSAR ha demostrado ser una herramienta viable y efectiva para el monitoreo de la subsidencia en la cuenca del Lago de Maracaibo, específicamente en las plataformas petroleras de la unidad de explotación Lagunillas Lago. Su integración con modelos geomecánicos mejora la comprensión del comportamiento del subsuelo y la superficie, facilitando una planificación más precisa y segura de las operaciones de extracción. Además, el empleo de esta técnica satelital no solo optimiza el monitoreo del fenómeno de subsidencia en la zona del Lago de Maracaibo, sino que también promueve prácticas más seguras y sostenibles en la gestión de yacimientos petroleros, contribuyendo a la preservación de la infraestructura y el entorno en el Lago de Maracaibo.

Referencias Bibliográficas

Aguilar, J., Bacaicoa, L., Camarillo, D., Chille, J., DeBourg, S., Díaz, J., Elneser, L., Pachano, S., Portillo, W., Pozo, L., Rodríguez, D., Silva, C. (2006). *Mediciones geodésicas en la red de subsidencia de PDVSA en la COLM 2005*. Trabajo Práctico Profesional. Universidad del Zulia, Venezuela.

Alhogbani, E., Gaber, S., Hagag, A. (2022). *Surface deformation reveals dynamic reservoir behaviors*. Oil & Gas Journal, 120(8), 35-40.

Angarita, M., Graves, E., Grapenthin R., Grigg, J., Rinehart, A. (2023). *InSAR-observed surface deformation in New Mexico's Permian Basin shows threats and opportunities presented by leaky injection Wells*. Scientist report of Nature, 17308.

- Barrios, J., González, D., Zambrano, O. (2016). *Comparación del modelo geomecánico del yacimiento Lagunillas Inferior 07 con el modelo petrofísico para explicar el fenómeno de subsidencia* Tesis de Grado. Universidad del Zulia. Facultad de Ingeniería. División de Postgrado. Maracaibo, Venezuela, 112-127.
- Barrios, J., Sanchez, E. (2013). *Manual de Geomecánica aplicada a la Industria Petrolera*. PDVSA-Intevep, Venezuela. Sección 3, 1-34.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., 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, 2375-2383.
- Bevc, D., Mali, G., Milliken, W., Nihei, K., Shabelansky, A., Zhang, Z. (2022). *Geomechanical Interferometry: Theory and Application to Time-Lapse Interferometric Synthetic Aperture Radar Data for Separating Displacement Signal Between Overburden and Reservoir Sources*. Journal of SPE-OnePetro. SPE J. 27 (06): 3773–3782.
- Briceño, L. (2009). *Modelo estructural y estratigráfico basado en la interpretación sísmica 3D del yacimiento Lagunillas inferior LL07*. Tesis de Grado. Universidad del Zulia. Facultad de Ingeniería. División de Postgrado. Maracaibo, Venezuela, 31-60.
- Casu, F., Manzo, M., Lanari, R. (2006). *A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data*. Remote Sensing of Environment, 102(1-2), pp.195-210.
- Chrzanowski, A. and Chen, Y. Q. (1991). *Use of the Global Positioning System (GPS) for Ground Subsidence Measurements in Western Venezuela Oil Fields*, Proceedings of the Fourth International Symposium on Land Subsidence, No. 200, 419- 431.
- Donati, D., Falorni, G., Jones, G., Muhammad, M., Stead, D. (2022). *Applications of Image-Based Computer Vision for Remote Surveillance of Slope Instability*. Journal of Frontiers in Earth Sciences. 10.3389/feart.2022.909078.
- Ferretti, A.; Prati, C., Rocca, F. (2001). “*Permanent Scatterers in SAR Interferometry*”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39, 8-20.
- Fjær, E., Holt, R.M., Horsrud, P., Raaen, A.M. (2008). *Petroleum Related Rock Mechanics*, 2nd Edition. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands, 391-426.
- Gabriel, A.K., Goldstein, R.M., Zebker, H.A. (1989). *Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 94(B7), 9183-9191.
- Geertsma, J. (1973). *Land Subsidence above compacting oil and gas reservoirs*. Journal of Petroleum Technology. No. 03730, 734-744.
- Goldstein, R.M., Zebker, H.A., Werner, C.L. (1988). *Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping*. Radio Science, 23(4), 713-720.
- Lanari, R., Casu, F., Manzo, M., Zeni, G., Berardino, P., Manunta, M., Pepe, A. (2007). *An overview of the Small Baseline Subset Algorithm: A DInSAR Technique for Surface Deformation Analysis*. Deformation and Gravity Change: Indicators of Isostasy, Tectonics, Volcanism, and Climate Change, 637-661.
- Leal, J. (1989). *Integration of GPS and Leveling for Subsidence Monitoring Studies at Costa Bolivar Oil Fields, Venezuela*. Technical Report No. 144, Canada: University of New Brunswick, 18-89.
- Liu, G., Tong, J., Wang, X., Xiang, W., Yuan H., Zhang, C., Zhang, R., Zhang, X., Zhang, Y. (2023). *Geodetic imaging of ground deformation and reservoir parameters at the Yangbajing Geothermal Field, Tibet, China*. Geophysical Journal International, 279-394.

Lundgren, P., Usai, S.; Sansosti, R., Lanari, R., Tesauro, M., Fornaro, G., Berardino, P. (2001). “*Modeling surface deformation observed with SAR Interferometry at Campeí Flegrei Caldera*”. J. Geophysical. Res., 106, 19355-19367.

Ju, X., Yang, J., Yang, Y., Xu, L. (2023) “*Influence of geological factors on surface deformation due to hydrocarbon exploitation using time-series InSAR: A case study of Karamay Oilfield, China*”, Journal of Frontiers in Earth Sciences. 10.3389/feart.2022.983155.

Murria, J. (1991). *Subsidence Due to Oil Production in Western Venezuela: Engineering Problems and Solutions*. Proceedings of the Fourth International Symposium on Land Subsidence, No. 200, 129-139.

Murria, J. (2007). *Ground Subsidence Measuring, Monitoring and Modeling in the Costa Oriental Oilfields in Western Venezuela: The Last Fifty Years, 8th International Conference “Waste Management, Environment Geotechnology and Global Sustainable Development. (ICWMEGGSD’07-GzO’07)”*, 337-372.

Pepe, A., Callo, F., (2017). *A review of interferometric synthetic aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's surface displacements*. Appl. Sci. 7 (12), 1264.

Quintana, G. (2021). *La interferometría SAR (Synthetic Aperture Radar) para el estudio de las deformaciones de la corteza, derivadas de la geodinámica. Ejemplos de aplicación: Kumamoto (Japón), Valencia y Costa Oriental del Lago de Maracaibo (Venezuela)*. Trabajo Final de Grado de Magister Scientiarum mención Ciencias Geológicas. Postgrado en Ciencias Geológicas, Universidad Central de Venezuela, 24-36.

Raspini, F. Caleca, F, Festa, D. Confuorto, P., Bianchini, F. (2022). *Review of satellite radar interferometry for subsidence análisis*. Earth Science Reviews. 10.1016/j.earscirev.2022.104239.

SARscape®. User Guide. Purasca, Switzerland: Sarmap; 2014. SBAS_Tutorial, p. 4-54.

Usai, S. (2001). *A new approach for long term monitoring of deformation by differential SAR interferometry*. Tesis Doctoral. Países Bajos: Delft University.

Walford, J. (1995). *GPS Subsidence Study of The Costa Bolivar Oil Fields, Venezuela*. Technical Report No. 174, Canada: University of New Brunswick, 1-11.

Zoback, M.D. (2010). *Reservoirs Geomechanics*. Cambridge University Press, 167-196.

Editor Asociado: Profa. MSc. Ing. Ileanis Arenas
Escuela de Ingeniería Geodésica de la
Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia
Maracaibo, 4001, Zulia, Venezuela
iarenas@fing.luz.edu.ve



REVISTA TECNICA

DE LA
FACULTAD DE
INGENIERIA
UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

Volumen 47. Año 2024, Edición continua_____

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada en diciembre 2024, por el **Fondo Editorial Serbiluz, Universidad del Zulia.** Maracaibo-Venezuela*

www.luz.edu.ve

www.serbi.luz.edu.ve

www.produccioncientificaluz.org