

DetECCIÓN DE SUBSIDENCIA POR EFECTO DE EXTRACCIÓN PETROLERA APLICANDO LA TÉCNICA DInSAR EN VENEZUELA

REVISTA **MAPPING**
Vol. 28, 195, 18-26
mayo-junio 2019
ISSN: 1131-9100

DETECTION OF SUBSIDENCE BY EFFECT OF OIL EXTRACTION APPLYING THE DInSAR TECHNIQUE IN VENEZUELA

Ileanis Arenas Bermúdez¹, Beatriz Hernández Araujo², Giovanni Royero Orozco³, Víctor Cioce Pérez³, Eugen Wildermann³

Resumen

El fenómeno de subsidencia en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo, al oeste de Venezuela provocado por la explotación petrolera existente en la zona desde el siglo XX, fue monitorizado en años anteriores mediante la aplicación de nivelación geodésica y GPS, sin embargo, debido al costo de estos métodos, en este trabajo se describen las experiencias realizadas en la región, con una técnica a partir de imágenes satelitales captadas en el espectro de microondas, denominada Interferometría Diferencial con Radar de Apertura Sintética (DInSAR), que permitió la detección de pequeños cambios en la corteza terrestre de la zona. Gracias al empleo de información de libre acceso proveniente de las plataformas Sentinel-1, el software SNAP v 5.0 y la herramienta de cálculo SNAPHU v.4.1.2 se logró determinar subsidencia por primera vez en Venezuela aplicando esta tecnología. Con los productos obtenidos y los análisis realizados se determinaron movimientos verticales de $\pm 2,8$ cm en las áreas de Cabimas, Tía Juana y Ciudad Ojeda para un periodo de tres años, actualizando así de igual forma la información ya existente del área. Finalmente, se demostró la confiabilidad de DInSAR para la cuantificación de deformaciones, abriendo la posibilidad en el país de emplearla no solo en esta región sino en otras de interés.

Abstract

The phenomenon of the subsidence at maracaibo lake eastern coast caused by oil exploitation in the area since the 20s of the last century, was monitored in previous years by the application of geodetic leveling and GPS, however, due to the cost of these methods, This work describes experiences performed in the region, with a technique based on satellite images captured in the microwave spectrum, called Differential Interferometry with Synthetic Aperture Radar (DInSAR) allowing detection of small changes in the area. Thanks to the use of free access information from the Sentinel-1 platforms, the software SNAP v 5.0 and the calculation tool SNAPHU v.4.1.2, it was possible to determine subsidence for the first time in Venezuela by applying this technology. With the obtained products and the analyzes carried out, vertical movements of ± 2.8 cm were determined in the areas of Cabimas, Tía Juana and Ciudad Ojeda for a period of three years, thus updating the existing information of the area in the same way. Finally, the reliability of DInSAR for the quantification of deformations was demonstrated, opening the possibility in the country to use it not only in this region but in others of interest.

Palabras clave: DInSAR, subsidencia, imágenes de radar, Venezuela.

Keywords: DInSAR, subsidence, radar images, COLM, quantification.

¹Departamento de Geoinformática, Escuela de Ingeniería Geodésica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela
iarenas@fing.luz.edu.ve

²Derk Ingeniería y Geología Ltda. Departamento de Geomensura. Calama, Chile
xx@xx.es

³Centro de Procesamiento y Análisis GNSS SIRGAS de la Universidad del Zulia (CPAGS- LUZ) Departamento de Geodesia Superior, Escuela de Ingeniería Geodésica, Facultad de Ingeniería. Maracaibo, Venezuela
xx@xx.es

Recepción 21/02/2019
Aprobación 24/04/2019

1. INTRODUCCIÓN

En Venezuela, gran parte del proceso petrolero se concentra en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo (COLM) (Figura 1), iniciándose las actividades de perforación, explotación y extracción de crudo a partir del año 1914, originando esto, incontables beneficios económicos para la nación, sin embargo, un periodo más tarde se empezó a evidenciar hundimiento paulatino del terreno, en esas zonas petroleras. Este proceso, denominado subsidencia, es un fenómeno geológico que se manifiesta por medio de la deformación superficial del suelo y es causada por diversos factores, entre ellos, la depresión del nivel peзомétrico o la despresurización del subsuelo originado por la extracción de agua o hidrocarburos (Castillo, 2003).

Desde que tuvo lugar la subsidencia en la COLM, las labores para su detección y control se hicieron presentes, con la implementación de diversas técnicas geodésicas y topográficas que permitieron determinar la magnitud del fenómeno presentado, a través del establecimiento de una red de control en toda la zona de interés, realizándose campañas de medición en periodos bienales para una monitorización continua del área, evidenciándose zonas que descendieron hasta 6,5 metros de su cota original, sin embargo, estas tuvieron lugar desde el año 1932 hasta 2005 (Aguilar et al., 2006).

Debido a que la explotación petrolera sigue activa en la región, este fenómeno aún se presenta, poniendo en riesgo la estabilidad de las estructuras que se encuentran en la zona perjudicada, siendo un peligro para el tránsito de unidades lacustres, representando posibles derrames de crudo, escapes y pérdida de las instalaciones, sin olvidar la afectación de toda la población en las cercanías del área.

Destacando, que las mediciones geodésicas y

topográficas ameritan un mayor gasto económico, instrumental y humano, se hace necesario para la monitorización de la zona mencionada emplear otros métodos que signifiquen un costo menor, una alternativa es dada por, la técnica Interferometría Diferencial con Radar de Apertura Sintética (DInSAR, por sus siglas en inglés) que se fundamenta en la detección de pequeñas variaciones del terreno a partir del cálculo de la diferencia de fase de pares de imágenes radar sobre una misma área de estudio, utilizándose con éxito en distintas partes del mundo para la determinación de deformaciones de la corteza terrestre, ofreciendo posterior a un procesamiento riguroso resultados de muy alta calidad (como ejemplo de esto ver Solano et al., 2015, Fourladi et al., 2013, Fernández, 2009 Tomás et al., 2006). Por tal razón resulta lógica la idea de estudiar el fenómeno de subsidencia ocurrido en la COLM a través de ella.

De igual forma, motivados por la falta de información reciente debido a que el proceso de subsidencia mencionado no se ha monitorizado desde hace más de una década, el conocimiento que se logre adquirir de este fenómeno a través del procesamiento interferométrico diferencial, aportará información de interés sobre un área de suma importancia para la Nación cuyo valor comercial es incalculable, debido a las altas concentraciones de crudo que se encuentran en ella. Siendo también, esta investigación, en conjunto con la presentada por Arenas, 2018, el inicio del uso de esta tecnología en el país para aprovechar las bondades ofrecidas por estos productos en el estudio de la geología superficial o en áreas que representen riesgos, como lo son, por ejemplo, las propensas a hundimientos y terremotos. Por tanto, este trabajo describe entonces, el alcance de las estrategias utilizadas para la estimación del fenómeno ya mencionado, a través de esta técnica.



Figura 1. Delimitación de la zona de estudio

2. ESTIMANDO DEFORMACIONES DE CORTEZA TERRESTRE CON DInSAR

La interferometría es una técnica que estudia la interferencia de ondas electromagnéticas generadas por un Radar de Apertura Sintética (SAR, por sus siglas en inglés), utilizando para esto dos imágenes de la misma área y sensor, pero desde puntos de vista ligeramente distintos tanto espacial como temporalmente y en diferentes órbitas, para obtener informa-

ción de la topografía y de la deformación que pueda existir en la superficie, siendo su producto básico el interferograma.

Un interferograma es una imagen compleja que resulta de multiplicar una imagen SAR principal denominada *master* por la compleja conjugada de otra secundaria llamada *slave*, y permite extraer luego de un procesamiento riguroso, tanto topografía como patrones de deformación terrestre superficial (Lu y Dzurisin, 2014; Ferreti *et al*, 2007).

La representación de la información deseada, se visualiza a través de un mapa con franjas semejantes a curvas de nivel donde cualquier variación en el paralelismo puede interpretarse como un cambio en el área estudiada. No obstante, no todos los interferogramas generados presentarán franjas perfectamente definidas, ya que estos se ven afectados por parámetros que condicionan la estabilidad de un píxel en dos imágenes SAR tomadas en diferentes fechas, como es el caso de la presencia de vegetación, la geometría de adquisición, entre otros (Klees y Masonnet, 1999).

En esencia un interferograma, es un patrón de franjas de diversos colores que comienzan desde el azul, pasando por el violeta, rojo, amarillo, verde, cian y terminando nuevamente en azul; representando un periodo de oscilación de la onda, expresado en radianes; es decir 2π y que puede variar entre $(0; 2\pi)$ o de $(-\pi; \pi)$, que contiene toda la información relativa de la geometría de la superficie, los colores representan los ciclos de la fase interferométrica debido a las ligeras diferencias entre las imágenes y en la posición de la antena, sobre toda la escena (SARMAP, 2009).

Las variaciones de distancia, a través de interferometría, se determinan al calcular en un píxel y su píxel base la diferencia de fase relativa (Fase interferométrica ψ) en dos imágenes SAR, mediante el producto píxel a píxel de la fase de la imagen *master* por el complejo conjugado de la imagen *slave*.

Para evaluar la calidad de los interferogramas se genera un mapa adicional conocido como mapa de coherencia interferométrica, este mide la estabilidad de la fase entre las adquisiciones, a través de la determinación del grado de correlación entre los píxeles de dos imágenes SAR, es un término estrechamente conectado con la relación señal-ruido, cuyos valores extremos van de 0 (decorrelación o falta de coherencia, manifestado por un color negro en la imagen, el cual indica que la información del interferograma no es utilizable) a 1 (alta correlación, manifestado por un color blanco, que indica que no hay ruido en el interferograma y este es perfectamente utilizable) (García, 2011).

3. ESTUDIO DE LA SUBSIDENCIA EN LA COSTA ORIENTAL DEL LAGO CON DInSAR

El presente trabajo se realizó tomando como insumos imágenes satelitales de radar de libre acceso provenientes de las plataformas satelitales Sentinel-1 de la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés), para un período de tres años (2014-2017), enmarcadas en el área de interés correspondiente a la Costa Oriental de Lago de Maracaibo, Estado Zulia, en la región occidental de Venezuela, con límite al Oeste con el Lago de Maracaibo, al Este con los Estados Falcón y Lara, al Norte con el Golfo de Venezuela y al Sur con el Estado Trujillo (Figura 1), en consecuencia, las estimaciones y análisis pertinentes sobre la magnitud de deformaciones corticales asociadas a fenómenos de subsidencias quedaron circunscritas a dicha locación.

En este caso, se consideró pertinente evaluar la subsidencia que se presenta en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo, Estado Zulia, ya que esta históricamente documentada y fue observada en años anteriores por diversas técnicas geodésicas (ver Lameda *et al.*, 2015; Aguilar *et al.*, 2006; Atencio *et al.*, 2004; Leal (1992); Henneberg, *et al.* (1980); Benítez y Bravo (1978)), lo que permitió afirmar la presencia del fenómeno de deformación en la zona de estudio, provocado por intensas y prolongadas actividades petroleras.

Se utilizaron las misiones Sentinel-1A y 1B como plataformas satelitales para la obtención de los datos ya que ofrecen imágenes de radar con el formato necesario para la generación de interferogramas (formato *Single Look Complex*, SLC), además, son productos de libre acceso que pueden ser descargados del sitio oficial del programa Copernicus (www.scihub.copernicus.eu) posterior al proceso de registro.

Debido a la fecha de lanzamiento de estas misiones, el periodo de estudio en esta investigación estuvo definido a partir de diciembre 2014 para imágenes S1A y octubre 2016 para S1B, puesto que para la fecha de esta investigación son todos los productos Sentinel-1 existentes en catálogo de la zona de interés, encontrándose un total de 22 imágenes adecuadas para este proyecto correspondientes a la misión Sentinel-1A y 14 para 1B, limitando de esta forma abordar el fenómeno en etapas más prolongadas.

Con la finalidad de minimizar los efectos de decorrelación inducidos por factores climáticos como pri-



Figura 2. Ejemplo de imágenes utilizadas, misión S1A (izq.), S1B en polarización simple (PS) (cen.) y S1B en polarización dual (PD) (der.)

mera medida, se eligieron imágenes del mismo mes del año, para garantizar que en estas existieran las mismas características atmosféricas por tratarse con productos de la misma época, de esta forma, al generarse la fase interferométrica mediante la diferencia entre los complejos conjugados de las observaciones *master* y *slave* estos quedarían removidos del interferograma final.

Un total de 36 imágenes radar fueron descargadas, con las que se generaron 13 interferogramas del área de estudio, sin embargo, una vez analizadas sus características, como correlación, ruido y corrección de imágenes *master* y *slave* se evidenció que algunos tenían presencia de ruido significativamente elevada, evidenciándose esto en resultados que no representaban la zona de interés, eliminando la capacidad de análisis de los mismos. Por esta razón, con ayuda de las investigaciones de Guerrero y Hernández (2017) y Angarita (2016) se infirió sobre una serie de factores que limitaron el uso de imágenes Sentinel-1 en la estimación del proceso de deformación estudiado, pudiendo estos extrapolarse a investigaciones futuras:

- Las imágenes Sentinel-1 empleadas en la construcción de interferogramas deben provenir de ambas plataformas satelitales (S1A y S1B), para garantizar tener una alta correlación temporal y espacial. Por este motivo para este estudio se utilizaron solo los interferogramas generados con productos de ambas misiones, en los periodos a disposición en la web de descarga para la zona de interés.
- Los interferogramas de la COLM calculados con Sentinel-1 deben generarse con una separación temporal mayor o igual a dos años ya que en intervalos menores el fenómeno de estudio es indescifrable para la sensibilidad del radar empleado en las plataformas, significando que la magnitud de la deformación en ese periodo de tiempo es menor a la mitad de su longitud de onda, es decir, $\pm 2,8\text{cm}$. Esto se infiere debido a que no se observa un patrón de deformación definido como fue el caso en aquellos generados con separaciones temporales más amplias.

Tomando en cuenta estos factores, en esta investigación, se emplearon un total de 10 imágenes de radar de ambas plataformas en formato SLC,

modo IW, adquiridas bajo la modalidad TopSAR en órbita descendente. Como es sabido en el ámbito de la teledetección las imágenes provenientes de la misma plataforma satelital tienen el mismo *path* y *row*, por tanto, todas cubren la misma porción del terreno, cambiando la fecha de adquisición, por este motivo en la Figura 2 se observan solo tres ejemplos de las imágenes empleadas en este estudio, la misión S1A (izq.), S1B en polarización simple (PS) (cen.) y S1B en polarización dual (PD) (der.).

Estas permitieron realizar un estudio multitemporal de la zona de interés, a través de la generación de 5 interferogramas correspondientes a los periodos diciembre 2014/2017-2014/2016-2015/2017; noviembre 2015/2017 y octubre 2015/2017 para la evaluación del comportamiento del fenómeno anteriormente descrito. Y se emplearon los programas SNAP v.5.0 y SNAPHU v.1.4.2 (ESA, 2015b) en el procesamiento de los mismos.

3.1. Procesamiento interferométrico realizado

Inicialmente, para la generación de interferogramas, se corrigieron las imágenes SAR empleadas, donde las *slave* (2016/2017) se adaptan a la geometría de las *master* (2014/2015), (Figura 3), evidenciándose el cambio en la superficie de acuerdo a los colores observados que se tornan entre amarillo y verde con ciertos tonos rojos.



Figura 3. Imágenes corregidas COLM

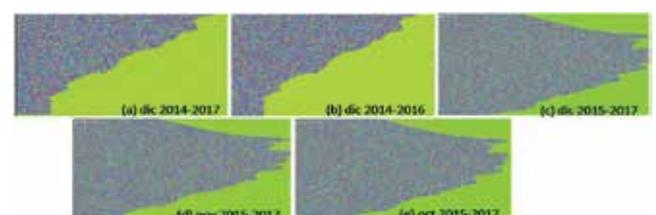


Figura 4. Interferogramas diferenciales generados

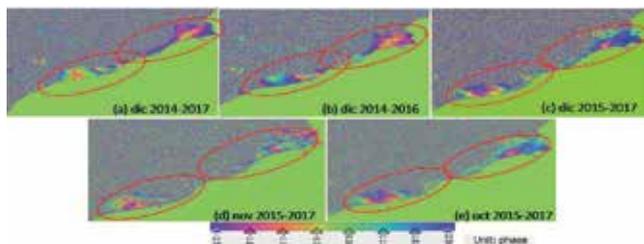


Figura 5. Interferogramas aplanados y filtrados

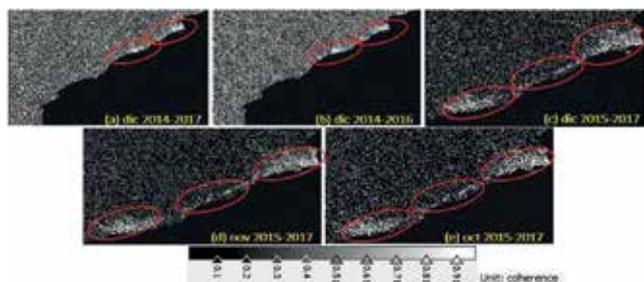


Figura 6. Mapa de coherencia generado

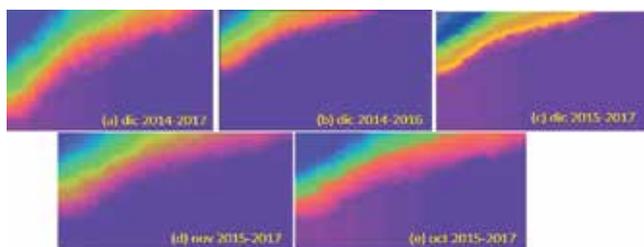


Figura 7. Interferogramas desenvueltos

El segundo paso fue el cálculo de los interferogramas diferenciales (Figura 4), este requiere la realización de un interferograma sintético a partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés), utilizándose en este caso el *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) con resolución espacial de 90x90m.

Posteriormente, se aplicó la remoción de la fase topográfica (fase presente en la señal interferométrica debido a la curvatura de la superficie de referencia) y una herramienta de filtraje con el auxilio del filtro *Goldstein* que permitió discernir anillos interferométricos correspondientes con la zona de estudio (encerrados en círculos rojos) con la finalidad de obtener las diferencias entre las escenas y poder determinar los cambios asociados al fenómeno estudiado, los resultados obtenidos se observan en la Figura 5.

Se generó de igual forma, un mapa de coherencia para cada periodo estudiado (Figura 6) donde se pudo observar la viabilidad del procesamiento interferométrico, así como estimar la calidad del mismo, siendo el factor indicativo de una alta correlación un color claro en las zonas donde se observa la deformación (encerradas en círculos rojos), de igual forma se observa

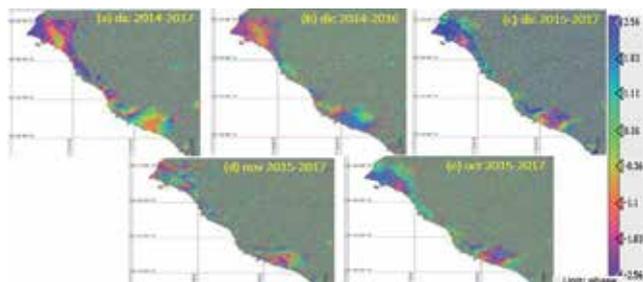


Figura 8. Interferogramas georreferenciados

un color oscuro en las zonas donde la deformación es insignificante para la longitud de onda del radar.

Cabe destacar que, hasta este momento solo se ha trabajado con medidas ambiguas de longitud de onda dentro de las fases interferométricas generadas, por tanto, se aplicó el desenrollado de fase que es la conversión de datos cíclicos, de $(-\pi, \pi)$ a datos sin acotar, que permitan generar productos que puedan tomar valores entre $(-\infty, \infty)$ y progresen de forma lineal, lo que podría permitir generar otros productos además del interferograma ya obtenido, a saber, mapas de desplazamiento, DEM, mapas de velocidades, entre otros, para realizar la cuantificación de la magnitud del fenómeno de interés con más severidad, en la Figura 7 se observan los interferogramas desenrollados para cada periodo de estudio.

Como último paso, se corrigieron geoméricamente los productos obtenidos transformando las coordenadas de la geometría SAR al Datum GRS-80 ubicándolas geoespacialmente en su posición verdadera corrigiendo la visualización invertida de estas, como se observa en la Figura 8 y siendo estos los principales productos de esta investigación.

4. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

En primer lugar, se visualizó que en todos los productos generados ocurrió un fenómeno de deformación en la misma zona, simbolizada por la concentración de colores que representan anillos in-

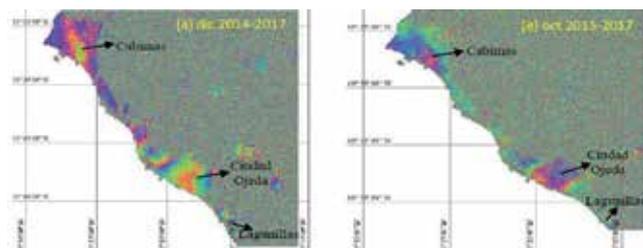


Figura 9. Ejemplos de zonas de deformación en los interferogramas

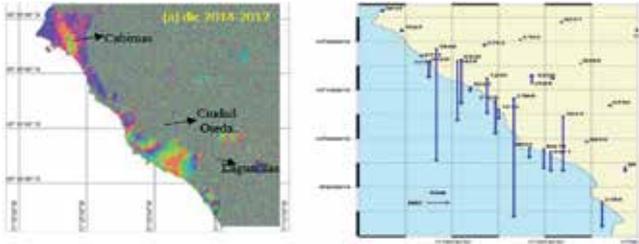


Figura 10. Ejemplo de zonas de mayor deformación en los interferogramas izq. Vectores de deformación en la COLM generados a través de GPS der

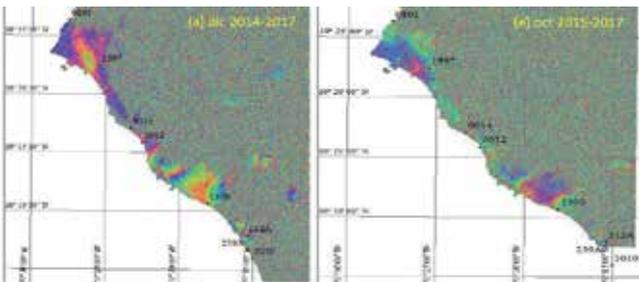


Figura 11. Contraste entre algunos interferogramas y los BM cercanos a la zona

terferométricos, en los 5 interferogramas se observan los mismos cambios ocurridos, estando estos en las proximidades de la línea costera, específicamente en las áreas comprendidas entre el Municipio Cabimas y Ciudad Ojeda y en menor magnitud en el Municipio Lagunillas, esto garantiza en primera instancia la fiabilidad del estudio, ya que se trabajó con imágenes satelitales como datos de entrada diferentes, en periodos distintos, pero se obtuvieron interferogramas cuyos resultados son similares (ver Figura 9 un ejemplo de esto).

De la misma forma, en la Figura 10 der. se muestran

los vectores de desplazamiento generados con las observaciones GPS más recientes realizadas (ver Aguilar et al., 2006) y se observa que efectivamente los Puntos de Control Terrestre (PCT) que mayor magnitud de deformación presentaron en ese periodo de tiempo (visualizados en la imagen como líneas azules) fueron los encontrados en las proximidades de la costa, demostrando así la correlación existente entre el área donde históricamente se determinó subsidencia y donde se encuentran los anillos interferométricos que representan los cambios en la superficie estudiada.

De esta manera, se demuestra que en la COLM a pesar de los años aún sigue existiendo un fenómeno de deformación, sin embargo, para corroborar que la información ofrecida por los interferogramas sea sin lugar a dudas el fenómeno de subsidencia y levantamiento observado y documentado, fue necesario el uso de los datos obtenidos en las campañas de observaciones geodésicas que se realizaron en años anteriores, donde los puntos de control de altura o *Bench Mark* (BM) cercanos a la zona (representados como puntos negros) fueron contrastados con los interferogramas obtenidos (Figura 11).

Sin embargo, los resultados de las últimas observaciones geodésicas realizadas datan del año 2005 (ver Lameda et al., 2015; Aguilar et al., 2006) y al tratarse de más de una década atrás no garantizan que en la actualidad aún se sigan manteniendo esos valores (de hundimiento o levantamiento) o por el contrario que se hayan detenido, así como tampoco ofrecen una magnitud comparable que se pueda utilizar para las fechas de la realización de esta investigación, quedando el uso de estos BM como puntos de referencia

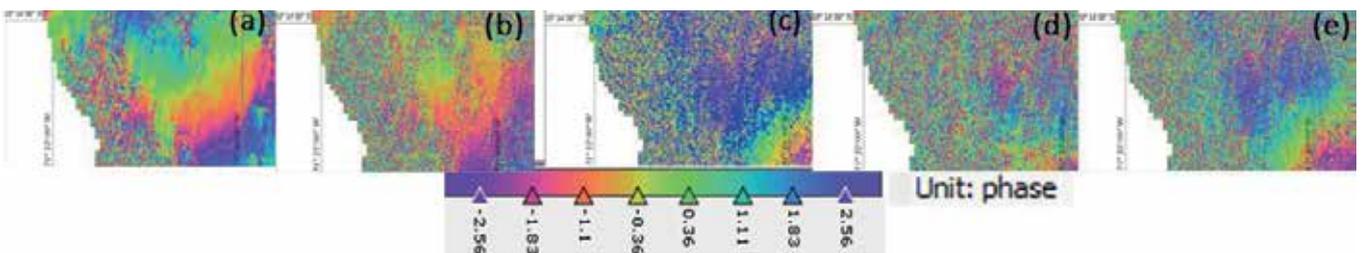


Figura 12a. Parte del Municipio Cabimas donde ocurrió subsidencia

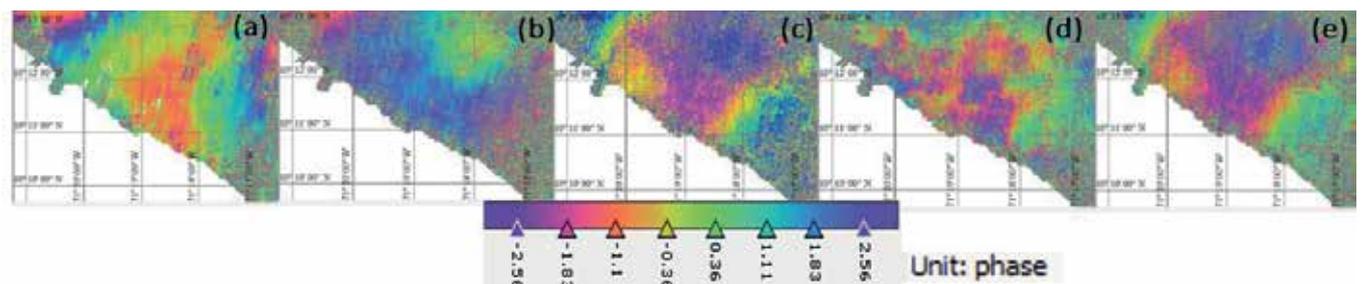


Figura 12b. Zonas entre el sector Tía Juana y Ciudad Ojeda donde ocurrió subsidencia

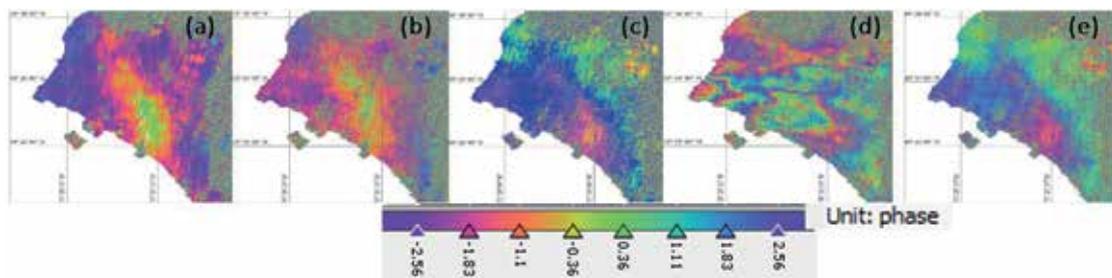


Figura 13. Zonas donde ocurrió levantamiento

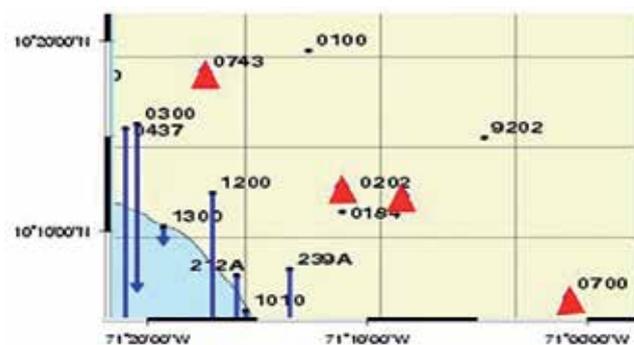


Figura 14. PCT con levantamiento en zonas aledañas a Ciudad Ojeda

para corroborar que la zona que históricamente ha sido afectada por movimientos verticales aún lo sigue estando, por esta razón su valor numérico no fue considerado en el presente análisis.

5. CUANTIFICACIÓN DE LA SUBSIDENCIA DE LA COSTA ORIENTAL DEL LAGO DE MARACAIBO A TRAVÉS DE DInSAR

Analizando detenidamente los interferogramas en las zonas correspondientes al Municipio Cabimas (Figura 12a) y en menor medida la comprendida entre el sector Tía Juana y Ciudad Ojeda (Figura 12b) se observa que el valor de fase, representado por la secuencia de colores se dirige desde los negativos a los positivos

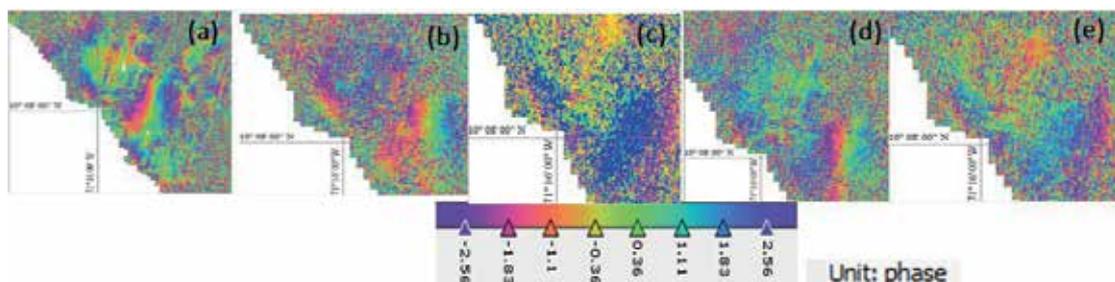


Figura 15. Zonas donde no se puede determinar movimiento

(-2,56 a 2,56), es decir, la superficie se aleja del sensor demostrando que en ellas ocurrió un alejamiento relativo de la superficie al sensor, y por lo tanto un

movimiento de subsidencia o hundimiento.

La segunda zona que más deformación presentó fue la correspondiente a Ciudad Ojeda (Figura 13), según los análisis generados a través de esta técnica, ocurrió un fenómeno de deformación totalmente contrario al anterior, es de notar que los valores de fase se dirigen desde los positivos a los negativos (2,56 a -2,56) o sea, la superficie se acerca al sensor, revelando un posible levantamiento de la zona.

Como puede notarse el proceso de deformación en esta área es totalmente opuesto al históricamente medido en la región, sin embargo, en las observaciones geodésicas más recientes, se evidenciaron algunos PCT con una tasa de levantamiento promedio de $\pm 5\text{cm}$ en las zonas aledañas a Ciudad Ojeda (Figura 14) por tal motivo resultaría útil ampliar el estudio en esta área para comprobar si efectivamente en esa ubicación está ocurriendo el fenómeno descrito, debido posiblemente a compactación del suelo originada por el descenso de la extracción petrolera o por el contrario estos resultados son originados por algún error inducido durante el procesamiento de los datos, como por ejemplo, imprecisiones del DEM-SRTM o presencia de características atmosféricas y factores de decorrelación elevados en la zona.

Es de interés, resaltar que, en el área perteneciente al Municipio Lagunillas, no se observa un patrón de deformación que pueda ser analizado con estos interferogramas, ya que no se evidencian anillos completos ni colores definidos (Figura 15), por lo tanto, no se puede aseverar que tipo de fenómeno haya ocurrido en esa zona para las épocas de adquisición de las imágenes utilizadas en el presente estudio.

Finalmente, para poder cuantificar el fenómeno estudiado en esta de investigación, es necesario observar el

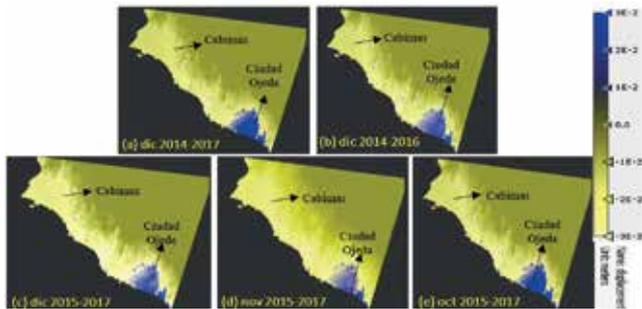


Figura 16. Mapas de desplazamiento generados

número de anillos interferométricos formados en la zona analizada y multiplicar ese valor por la mitad de la longitud de onda con la que trabajan las plataformas satelitales Sentinel-1.

Considerando que por cada ciclo completado se tiene la mitad de la longitud de onda con que trabaja el satélite radar, es decir, $\pm 2,8\text{cm}$ para Sentinel-1, y que en ningún interferograma se observan anillos concéntricos repetidos, es decir, no se poseen los mismos colores dentro de las áreas de deformación, y que este factor es idéntico tanto en áreas con subsidencia como aquellas con levantamiento, resulta correcto estimar que en el periodo de la investigación, el terreno se hundió aproximadamente $-2,8\text{cm}$ en el área del Municipio Cabimas y el sector Tía Juana y se levantó $2,8\text{cm}$ en Ciudad Ojeda, ya que la cantidad de anillos observados en el interferograma es solo 1.

Como producto extra en la realización de esta investigación y en pro de seguir demostrando el patrón de deformación observado y de obtener magnitudes en unidades métricas que permitan corroborar la información ya presentada, se generaron mapas de desplazamiento vertical de la zona de estudio, a través de la conversión de observaciones de fase suministrada por los interferogramas desenrollados a datos de valor numérico, mediante modelos matemáticos específicos y con el auxilio nuevamente del programa SNAP v 5.0, en donde se observa que las diferencias de elevación se corresponden con los anillos interferométricos visualizados, demostrando los patrones de subsidencia y levantamiento antes analizados (Figura 16).

Se observa un valor máximo de hundimiento de -3cm en las áreas de Cabimas y Tía Juana y un valor máximo de levantamiento de $+3\text{cm}$ en Ciudad Ojeda, mostrándose estos resultados congruentes con los analizados a través del cambio del análisis de la comparación de fase presente en los interferogramas.

La comparación de fase y los mapas de desplazamiento generados demuestran que, en el tiempo de observación de esta investigación, la COLM aún en la

actualidad se sigue viendo afectada por movimientos en la superficie donde se ubican los campos petroleros y los BM que conforman la red geodésica de monitorización de subsidencia, ya que el análisis de los resultados obtenidos con DInSAR, en la escala temporal de observación entre las imágenes así lo refiere. Sin embargo, la deformación cuantificada a través de esta técnica se observa sobre un área general, que abarca gran parte de los sectores antes mencionados, por tanto, su análisis no puede ser referido a un punto en particular.

De igual forma no se puede garantizar que la magnitud del valor determinado sea constante en el tiempo ya que el periodo de análisis es muy corto, necesitando para esto, ampliar el número de interferogramas y utilizar separaciones temporales más largas, ya que debido a la limitación de imágenes Sentinel-1 sobre el área, es necesario el auxilio de otras plataformas satelitales de sensoramiento remoto activo, con más tiempo en órbita y que trabajen con otras longitudes de onda, como RADARSAT-2 o ALOS.

6. COMENTARIOS FINALES

El procesamiento realizado en esta investigación validó una metodología que permite generar interferogramas de un área de interés para su posterior análisis en busca de deformaciones o para la representación de la topografía superficial del terreno.

Se demostró que los interferogramas calculados con productos Sentinel-1 deben generarse con imágenes provenientes de ambas plataformas satelitales (S1A y S1B) para garantizar una calidad adecuada en el análisis de los mismos.

Para el estudio de la subsidencia en la COLM a través de interferometría diferencial deben emplearse imágenes que posean una separación temporal mayor a dos años, ya que en periodos de tiempo menor no se evidencia ninguna deformación en la zona, infiriendo esto que la magnitud del fenómeno escapa de la sensibilidad de la longitud de onda del radar presente en las plataformas Sentinel-1, concluyendo, que el valor de subsidencia en la zona de estudio no aumentó su magnitud con respecto a las observaciones GPS realizadas en el año 2005 ($\pm 3\text{cm}$ anuales).

De todos los interferogramas generados resultaron útiles siguiendo los parámetros necesarios para la identificación de deformaciones, un total de 5, conformados por imágenes de ambas plataformas con una separación temporal de 2 y 3 años comprendida entre diciembre 2014-2017, 2014-2016, 2015-2017; noviem-

bre 2015-2017 y octubre 2015-2017, que permitieron realizar un estudio multitemporal de la zona.

A través del análisis de la comparación de fase fue posible cuantificar un movimiento de subsidencia de -2,8cm para el área correspondiente del Municipio Cabimas y Tía Juana y un levantamiento de igual magnitud, 2,8cm para Ciudad Ojeda, magnitud obtenida por la progresión de colores y la cantidad de anillos interferométricos observados. Para el caso del Municipio Lagunillas no se detectó mayor deformación entre las fechas de las adquisiciones debido a la ausencia de anillos interferométricos y ciclos completos de la fase del radar.

Se generaron a su vez, mapas de desplazamiento que permitieron convertir los valores de fase a unidades métricas, revelando magnitudes máximas de ± 3 cm para ambos movimientos verticales, siendo congruentes las zonas donde fueron observados con los interferogramas generados, corroborando así los resultados presentados.

Este trabajo en conjunto con sus productos generados, ofrecen así, la confiabilidad necesaria para emplear DInSAR en la determinación de fenómenos de deformaciones, de la misma forma, de acuerdo a los resultados presentados, es posible ampliar esta investigación a fin de optimizar el uso de esta técnica como una herramienta para la generación de productos topográficos y cartográficos en zonas de interés afectadas por cambios en la superficie terrestre, donde no se puedan obtener datos por otros medios.

A través de los productos generados se contribuye con el crecimiento investigativo del país demostrando la factibilidad de DInSAR en la cuantificación de la subsidencia en la COLM y en general, en el estudio de deformaciones de la corteza terrestre, pudiendo incluirla en los estudios de monitorización futuros.

En el caso venezolano, empleando la metodología ya descrita y utilizando la información suministrada por las imágenes Sentinel-1 aquí descrita, se logró por primera vez y en la medida de los recursos disponibles, utilizar una tecnología de vanguardia mundial, abriendo así la posibilidad de ampliar los resultados presentados y generar otros productos como, por ejemplo, DEM y mapas de velocidades, en esta y otras regiones del país.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Escuela de Ingeniería Geodésica de la Universidad del Zulia, en especial al Departamento de Geodesia Superior, por la información suministrada, a la Agencia Espacial Europea (ESA) por

el suministro del *software* e imágenes utilizadas en la investigación y a la empresa Derk Ingeniería y Geología Ltda por su ayuda y colaboración durante el desarrollo de este proyecto.

REFERENCIAS

- 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. Escuela de Ingeniería Geodésica, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.
- Angarita M. (2016). Procesos de deformación en la región de los volcanes Chiles-Cerro Negro por medio de imágenes InSAR. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geociencias. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia
- Arenas I. (2018). Cuantificación De la subsidencia en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo a través de Interferometría Diferencial con Radar de Apertura Sintética. Trabajo de Grado. Programa de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.
- Atencio L., Camacho C., Castillo J., Fernández O., García H., González M., Ortega F., Parra Y., Rodríguez E., Rodríguez F., Rojas M., Sierra C. (2004). Mediciones geodésicas en la red de subsidencia de PDVSA en la COLM. Trabajo Práctico Profesional. Escuela de Ingeniería Geodésica. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.
- Benítez R., Bravo D. (1978). Estudio geofísico de la subsidencia de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo. Vol 1. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Geodésica. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.
- Castillo M. (2003). Estudio de las condiciones de subsidencia de las instalaciones de producción petrolera de la unidad de explotación Lagunillas Lago. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad Rafael Urdaneta. Maracaibo, Venezuela.
- ESA - European Space Agency-. (2015). EO SCIENCE 2.0. Workshop 2015, 12-14 octubre. Frascati, Italy. Disponible en: www.esa.int
- Fernández M. (2009). Determinación de movimientos verticales del terreno mediante técnicas de interferometría radar DInSAR. Editorial de la Universidad de Granada. ISBN: 9788469258620
- Ferreti A., Monti-Guarnieri A., Prati C., Rocca F., Massonet D. (2007). InSAR Principles: Guidelines for SAR

- Interferometry procesing and interpretation. ESA TM. Volumen 19. ISBN: 9290922338.
- Fourladi N., Sahebi M., Matkan A., Rootaei M. (2013). Subsidence rate monitoring of Aghajari oil field based on Differential SAR Interferometry. *Advances in Sapace Reasearch*. 2285-2296p. DOI: 101128/CV7634IV89p87
- García A. (2011). Procesado DInSAR a alta resolución con imágenes con diferencias de Doppler grandes. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Teoría de Senyal i Comunicacions (TSC). Universidad Politecnica de Catalunya. Catalunya, España
- Guerrero C., Hernández P. (2017). Determinación de un modelo digital de elevación a partir de imágenes de radar Sentinel-1 usando Interferometría SAR. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Catastral y Geodesia. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.
- Henneberg H.; Badell C.; Drewes H. (1980). Investigaciones recientes sobre la subsidencia de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería*. Vol 3, 2-17p. ISSN: 0254-0770
- Klees R., Masonnet D. (1999). Deformation measurements using SAR interferometry: potential and limitations. *Geologie*. Vol 77, 161-176p. DOI: 10.1023/A:1003594502801
- Lameda P., Gallardo Y., Matínez R. (2015). Plan de reemplazo por subsidencia de instalaciones del Campo Lagunillas Lago. *Impacto Científico*. Volumen 10, 116-137pp. ISSN:1836-5042
- Leal J. (1992) Integration of GPS and levelling in subsidence studies. Trabajo Especial de Grado. Programa Doctoral. Departamento de Geodesia y Geomatica. Universidad New Brunswick. Fredericton, Canadá.
- Lu Z., Dzurisin D. (2014). InSAR imaging of Aleutian volcanoes from space. Springer. DOI: 10.1007/978-3-642-00348-6_6
- SARMAP. (2009). Synthetic Aperture Radar and SARscape. Disponible en: www.sarmap.ch/pdf/SAR-Guidebook.pdf.
- Solano D., Cabral E., Hernández A., Wdowinski C., Salazar L., Falorni G., Bohane A. (2015). La relación de subsidencia del terreno InSAR-GPS y el abatimiento del nivel estático en pozos de la zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Boletín de la Soiedad Geológica Mexicana*. Volumen 67, 273-283. ISSN: 0024-6655Trew1256-654.
- Tomás R., Marquez Y., López J., Delgado J., Blanco P., Mallorqui J., Martinez M., Herrera G., Mulas J. (2006). Monitorización de la subsidencia del terreno en la Vega Media del río Segura mediante Interferometría SAR diferencial (DInSAR). *Geogaceta*. Volumen 39, 107-110p. ISSN: 0213683X.

Sobre los autores

Ileanis Arenas Bermúdez

Ingeniera Geodesta, Magíster Scientiarum en Geología Petrolera, egresada de la Universidad del Zulia (LUZ), Maracaibo, Venezuela. Personal Docente y de Investigación en Formación adscrita a la cátedra Sensores Remotos del Departamento de Geoinformática en la Escuela de Ingeniería Geodésica (EIG) de LUZ.

Beatriz Hernández Araujo

Ingeniera Geodesta (LUZ). Geomensora B en la empresa Derk Ingeniería y geología Ltda. Calama, Chile.

Giovanni Royero Orozco

Ingeniero Geodesta (LUZ), Magíster Scientiarum en Ingeniería Geodésica (LUZ), Doctor en Ciencias Gerenciales (URBE), Postdoctor en Gerencia en las Organizaciones (URBE). Docente Investigador Titular a dedicación exclusiva en la Universidad del Zulia-LUZ, Maracaibo, Venezuela. Miembro de la Sociedad Civil de Especialistas Latinoamericanos en Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial (SELPER) Capítulo Venezuela y Coordinador de la Región Zulia. Miembro del Grupo de Investigación del Laboratorio de Geodesia Física y Satelital (LGFS) y del Centro de Procesamiento y Análisis GNSS SIRGAS de LUZ (CPAGS-LUZ). Director de la División de Investigación Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Miembro de la Comisión Científica del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad del Zulia (CONDES-LUZ). Maracaibo, Venezuela.

Víctor Cioce Pérez

Ingeniero Geodesta, Magíster Scientiarum en Ingeniería Ambiental egresado de LUZ, Maracaibo, Venezuela. Profesor Asociado adscrito al Departamento de Geodesia Superior de la EIG-LUZ, responsable de la Unidad Curricular Geodesia Satelital. Coordinador del Centro de Procesamiento y Análisis GNSS SIRGAS de LUZ (CPAGS-LUZ) y Presidente del Grupo I (Sistema de Referencia) de SIRGAS. Investigador en áreas relacionadas con los sistemas y marcos de referencia geodésicos, fundamentos y aplicaciones del GNSS, estudios atmosféricos basados en técnicas geodésicas.

Eugen Wildermann

Ingeniero Geodesta, Doctor en Ingeniería egresado de la Universidad de Hannover, Alemania. Profesor Emérito del Departamento de Geodesia Superior de la EIG-LUZ. Investigador en áreas relacionadas con los fundamentos y aplicaciones de observaciones gravimétricas, determinación del geoide y geodinámica.