



---

---

# **Análisis del potencial de tecnología satelital InSAR para el monitoreo de la infraestructura carretera**

Germán Michel Guzmán Acevedo  
Juan Antonio Quintana Rodríguez  
Héctor Miguel Gasca Zamora  
Francisco Javier Carrión Viramontes  
Luis Álvaro Martínez Trujano  
Jorge Alberto Hernández Figueroa  
Andrés Hernández Guzmán  
Jesús Iván Valenzuela Delgado  
Miguel Anaya Díaz

**Publicación Técnica No. 593  
Sanfandila, Qro, 2020**



---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**  
**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Análisis del potencial de tecnología satelital InSAR  
para el monitoreo de la infraestructura carretera**

**Publicación Técnica No. 593**  
**Sanfandila, Qro, 2019**

---



Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por M. en C. Germán Michel Guzmán Acevedo, Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez, Ing. Héctor Miguel Gasca Zamora, Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes, M. en C. Luis Álvaro Martínez Trujano, Ing. Jorge Alberto Hernández Figueroa, Ing. Andrés Hernández Guzmán, M. en C. Jesús Iván Valenzuela Delgado y M. en C. Miguel Anaya Díaz.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna EI 15/19 “Análisis del potencial de tecnología satelital InSAR para el monitoreo de la infraestructura carretera”.

Se agradece la colaboración de Dr. Martínez Madrid Miguel, Coordinador del Ingeniería Vehicular e integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte.



# Contenido

---

	Página
Índice de figuras .....	v
Índice de tablas .....	vii
Sinopsis.....	ix
Abstract .....	xi
Resumen ejecutivo.....	xiii
1 Introducción.....	1
2 Conceptos de InSAR.....	13
2.1 Radar de Apertura Real (RAR) .....	13
2.2 Radar de Apertura Sintética (SAR) .....	14
2.3 Geometría de adquisición .....	15
2.4 Distorsión .....	16
2.5 Bandas de sensores de radar .....	17
2.6 Estimación de desplazamiento en dos dimensiones .....	18
2.7 InSAR.....	18
2.8 Coherencia.....	18
2.9 DInSAR .....	19
2.10 PSI .....	19
2.11 SB .....	19
2.12 Misiones satelitales SAR.....	20
2.13 Sentinel-1 .....	20
2.14 Modo de adquisición de imágenes Sentinel-1.....	20

2.15	SNAP .....	21
2.16	SNAPHU .....	21
3	Metodología .....	23
3.1	Selección de misión satelital y descarga de imágenes SAR .....	23
3.2	Imágenes SAR .....	25
3.3	Procesamiento de imágenes SAR .....	27
3.3.1	Preprocesamiento.....	27
3.3.2	Co-registro .....	27
3.3.3	Procesamiento interferométrico .....	28
3.3.4	Desenvolvimiento de fase.....	28
3.3.5	Geo-codificación .....	28
3.3.6	Exportar en formato de Google Earth .....	28
4	Resultados .....	29
4.1	Interferograma.....	29
4.2	Costo de aplicar InSAR .....	31
5	Conclusiones.....	33
	Bibliografía .....	35
	Anexo .....	39



# Índice de figuras

---

Figura 1.1. Puente El Carrizo durante el proceso de rehabilitación.....	2
Figura 1.2. Primer satélite de percepción remota lanzado por la Agencia Espacial Europea [10].....	3
Figura 1.3. Imagen satelital del caso de estudio (Google Earth, 2019). ....	4
Figura 1.4. Puente Hintze Ribeiro [11]. ....	5
Figura 1.5. Series del tiempo de los cuatro puntos sobre el puente [11]. ....	5
Figura 1.6. Promedio de deformación lineal sobre Google Earth [11]. ....	6
Figura 1.7. Resultados del proceso InSAR [12].....	7
Figura 1.8. Ciudad de Génova y la ubicación de la construcción del tunel Fereggiano [12]. ....	8
Figura 1.9. Monitoreo al muro de contención de rocas [13]. ....	9
Figura 1.10. Monitoreo de taludes [13]. ....	10
Figura 1.11. Detección de socavación [13]. ....	10
Figura 1.12. Monitoreo de puentes [13]. ....	11
Figura 1.13. Calidad del pavimento [13]. ....	11
Figura 2.1. SAR [14]. ....	14
Figura 2.2. Órbitas de satélites SAR [15]. ....	15
Figura 2.3. Sistema de imagen SAR [16]. ....	16
Figura 2.4. Distorsión geométrica [9]. ....	16
Figura 2.5. Ejemplo de penetración de la señal emitida por un sensor SAR [18]. ..	17
Figura 2.6. Modos de adquisición de datos [23]. ....	21
Figura 3.1. Cobertura global de Sentinel-1 del 25 de Noviembre del 2019 [26]. ...	23
Figura 3.2. Cobertura en México de Sentinel-1 del 25 de Noviembre del 2019 [26] .....	24
Figura 3.3. Selección del área de interés [27]. ....	24
Figura 3.4. Características de las imágenes a seleccionar [27]. ....	25
Figura 3.5. Imágenes disponibles [27]. ....	25
Figura 3.6. Localización de la imagen SAR utilizada [27]. ....	26
Figura 3.7. Imagen SAR utilizada [27]. ....	26
Figura 4.1. Interferograma resultante. ....	29
Figura 4.2. Área de enfoque. ....	30
Figura 4.3. Resultado en taludes de la carretera. ....	30



## Índice de tablas

---

Tabla 2.1. Características de las bandas usadas por sensores de radars [17]. ....	17
Tabla 2.2. Características generales de Sentinel-1 [21]. .....	20
Tabla 4.1. Análisis económico. ....	31
Tabla A.1. Inventario de misiones satelitales SAR. ....	39
Tabla A.2. Acceso a los datos de las misiones SAR [17]. ....	40



# Sinopsis

---

Esta investigación tiene la finalidad de analizar la aplicabilidad de la metodología InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) para el monitoreo y evaluación de la infraestructura carretera de México, determinar los elementos de la infraestructura que se pueden estudiar y las plataformas que brindan información para aplicar la metodología. El estado del arte señala que InSAR es una herramienta eficiente para analizar el comportamiento de laderas y taludes inestables, monitorear puentes, hacer un estudio en retrospectiva del comportamiento de elementos de la infraestructura que sufrieron una falla estructural, monitorear consecuencias en el terreno ocasionadas por construcciones o desastres naturales, detección de subsidencia y de socavación en la carretera, entre otros estudios.

La metodología InSAR permite la inspección y evaluación de áreas de terrenos muy grandes, por lo cual las estructuras de un eje carretero pueden ser evaluadas con pocas imágenes, se puede dar seguimiento puntual en el tiempo, dado que los satélites recolectan información del mismo lugar después de unos cuantos días (el número de imágenes y la resolución temporal depende de la misión satelital empleada), y también tiene la capacidad de medir cambios (desplazamientos) de unos cuantos milímetros por año.



# Abstract

---

The current investigation has the aim of analyzing the applicability of InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) for monitoring and evaluating the Mexican road infrastructure, understanding which structural elements can be studied, and knowing the platforms that bring information to develop the methodology. According to the scientific literature, InSAR is an efficient tool for assessing the behavior of landslide and instable slopes, monitoring bridges, developing a study in retrospective of the behavior of several elements that have suffered structural failures, monitoring consequences produced by man-made constructions or natural disasters, detecting subsidence and sinkholes.

InSAR allows to inspect and evaluate huge areas of land, therefore, the structures of a complete road can be judged by few images, it is possible to study the same zone in different period of time due to satellites recollect information from the same position after some days (the number of images and the temporal resolution depend on the employed satellite mission), and also it has the capability of detecting displacements of some millimeters per year.





# Resumen ejecutivo

---

El monitoreo estructural ha sido de gran utilidad durante los últimos años para evaluar la integridad estructural y detectar daño de manera oportuna, lo cual ha permitido garantizar la seguridad de los usuarios y desarrollar programas de mantenimiento más eficientes. Sin embargo, hasta el momento, todos los estudios realizados de monitoreo estructural han sido locales, es decir, se enfocan a una sección específica de la carretera. Por consecuencia, a pesar de que el monitoreo determine que una estructura (puente, túnel, talud) se está comportando adecuadamente, no se tiene información del comportamiento y estado global de la infraestructura carretera, por lo que es importante recurrir a una metodología global de monitoreo, inspección y evaluación, que permita detectar cambios en el comportamiento de la mayoría de los elementos críticos que conforman la infraestructura carretera.

En la actualidad existe una gran variedad de misiones satelitales para estudiar el planeta Tierra, algunos satélites tienen la capacidad de medir la gravedad, el nivel del mar o incluso proporcionar información para detectar los cambios por el calentamiento global en grandes áreas de terreno. Dentro de toda esa cantidad de satélites surge la tecnología SAR (Synthetic Aperture Radar), la cual ha sido empleada en diversos estudios de placas tectónicas, sismos, volcanes, extracción de gas/petróleo, subsidencia e hidrología. Además, de acuerdo a sus características, la tecnología tiene el potencial para ser implementada en el monitoreo de estructuras. Por lo que, el objetivo de esta investigación es analizar la aplicabilidad de la metodología InSAR (Interferometric SAR) para el monitoreo y evaluación de la infraestructura carretera de México, determinar qué elementos de la infraestructura se pueden estudiar y las plataformas que brindan información para aplicar la metodología.

De acuerdo a la revisión del estado del arte que se realizó, se concluyó que InSAR es una herramienta eficiente para analizar el comportamiento de laderas y taludes inestables, monitorear puentes, hacer un estudio en retrospectiva del comportamiento de varios elementos de la infraestructura que sufrieron una falla estructural, monitorear consecuencias en el terreno ocasionados por construcciones o desastres naturales, detección de subsidencia y de socavación en la carretera, entre otros estudios.

Este trabajo se divide en cuatro capítulos, el primero hace énfasis en la motivación para desarrollar un monitoreo y evaluación global de la infraestructura carretera, así como los objetivos y principales antecedentes; el segundo capítulo define el conjunto de conceptos básicos de InSAR, además de algunas características de la misión Sentinel-1; en el tercer capítulo, se describe la metodología para desarrollar

un interferograma con imágenes de acceso libre de la misión satelital Sentinel-1; el cuarto capítulo involucra los resultados de un ejercicio práctico sobre parte de la autopista Mazatlán-Durango y una estimado del costo anual de la aplicación de la metodología InSAR con imágenes de paga o libres; y por último, se exploran las conclusiones obtenidas por la presente investigación.

# 1 Introducción

---

El monitoreo de estructuras ha tomado un gran impulso en los últimos años debido a su utilidad para la evaluación de la integridad estructural y la detección de daño de manera oportuna, lo cual logra garantizar la seguridad de los usuarios y la implementación eficiente de programas de mantenimiento. Adicionalmente al hecho de evitar pérdidas humanas, el monitoreo proporciona información que permite la optimización de recursos financieros para la conservación.

El Grupo de Monitoreo Estructural del Instituto Mexicano del Transporte realiza monitoreo y evaluación estructural en algunos puentes de México, principalmente los puentes Río Papaloapan, Mezcala y El Carrizo [1-4]. En el caso particular del puente Río Papaloapan, que ha presentado dos importantes fallas estructurales en los elementos de anclaje de dos tirantes por un mal proceso de fabricación de los mismos, está siendo monitoreado continuamente en tiempo real y con mediciones periódicas de las tensiones de todos sus tirantes [4]. El puente Mezcala que es considerado de vital importancia para el desarrollo comercial del país, se encuentra ubicado en un área sísmica tipo D de alto riesgo de acuerdo con los datos del INEGI [5] y también de inestabilidad en las laderas, por lo que, estos factores soportan la necesidad de que actualmente está siendo monitoreado en tiempo real. El puente El Carrizo, el cual sufrió daños en los elementos estructurales de la sección del doble voladizo debido a un accidente provocado por un camión de carga que transportaba diésel (figura 1.1 presenta el puente El Carrizo durante su rehabilitación), fue monitoreado durante todo el proceso de rehabilitación con una duración aproximada de ocho meses y se desarrollaron pruebas de carga con el propósito de calibrar un modelo de elemento finito y así calcular los factores de condición de carga para asegurar la integridad estructural.

En los estudios mencionados se emplean sistemas de instrumentación basados en fibra óptica, el cual se caracteriza por ser robusto, confiable, trazable, con aceptable sensibilidad y poco mantenimiento de los sensores y sistemas de adquisición de datos. Los sensores que se han empleado comúnmente en el sistema de fibra óptica son [6]:

- Sensores de temperatura. Los cuales proporcionan información de los cambios de temperatura en diferentes secciones del puente y permite compensar otros sensores por las mismas variaciones térmicas.
- Extensómetros. Permiten conocer la dinámica del puente, determinar el comportamiento de la estructura que está demandado por carga viva (tránsito vehicular, viento) y muerta (derivadas de mantenimiento) y también ayudan a

discriminar las deformaciones por la carga vehicular con respecto a las producidas por cambios de temperatura.

- **Inclinómetros.** Se utilizan para identificar cambios en la inclinación de las torres en los puentes, que podrían ser producidos debido a cambios estructural por mantenimiento, por un sismo, o cualquier otro evento imprevisto o no deseado.
- **Acelerómetros.** Permiten evaluar el desempeño estructural de elementos de la estructura tales como, tablero, cables, pilas, vigas, bajo condiciones de operación normal, evaluar la integridad estructural de las mismas posterior a sismos, ráfagas de viento o accidentes.

Con la información obtenida por los sensores, se definen y se da seguimiento a parámetros estructurales como deformación, inclinación, tensión, frecuencia natural, modos de vibrar, entre otros, a través de los cuales se establecen valores de referencia para condiciones de operación normal y, mediante análisis estadístico, se establece la correlación de sus cambios en función del mantenimiento preventivo realizado o algún tipo de daño encontrado. Las variables monitoreadas auxilian en el diagnóstico de procesos para mantenimiento y son la base para evaluar la condición estructural posterior a sismos o eventos extraordinarios y establecer protocolos de actuación ante posibles condiciones de daño [7].



**Figura 1.1. Puente El Carrizo durante el proceso de rehabilitación.**

Si bien, el monitoreo estructural de puentes ha demostrado su valor y las ventajas económicas y operativas que puede tener ante contingencias y eventos extraordinarios, todos los estudios realizados hasta el momento son locales, es decir, se enfocan a una sección específica de la carretera. Por consecuencia, a pesar de que el monitoreo determine que una estructura se está comportando adecuadamente, no se tiene información del resto de la infraestructura carretera que compone el eje carretero, por lo que es realmente importante recurrir a una

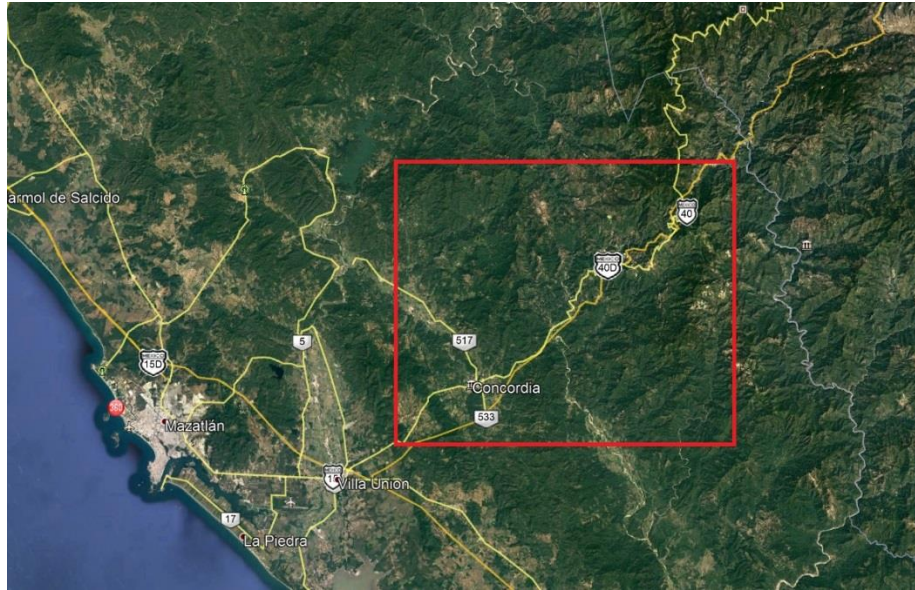
metodología global de medición que permita detectar cambios en el comportamiento de la mayoría de elementos que conforman la infraestructura carretera, especialmente aquellas secciones susceptibles a cambios por efectos ambientales.

En la actualidad existe una gran variedad de misiones satelitales para estudiar el planeta Tierra, algunos satélites tienen la capacidad de medir la gravedad, el nivel del mar o incluso proporcionar información para detectar los cambios por el calentamiento global en grandes áreas de terreno. En la figura 1.2 se puede observar el primer satélite de percepción remota ESR-1 enviado por la Agencia Espacial Europea (por sus siglas en inglés, ESA). Dentro de toda esa cantidad de satélites surge la tecnología SAR (Synthetic Aperture Radar), la cual ha sido empleada en diversos estudios de placas tectónicas, sismos, volcanes, extracción de gas/petróleo, subsidencia e hidrología [8]. Además, de acuerdo a sus características la tecnología SAR tiene el potencial para ser implementada en el monitoreo de estructuras [8,9]. Sin embargo, es necesario realizar un análisis detallado de sus capacidades para detectar sus ventajas, desventajas y desarrollar procedimientos para ser aplicados en el monitoreo de la infraestructura carretera. De este modo se puede implementar la técnica para realizar inspecciones periódicas con la finalidad de ubicar y cuantificar daño que posiblemente otros instrumentos no son capaces de detectar.



**Figura 1.2. Primer satélite de percepción remota lanzado por la Agencia Espacial Europea [10].**

El caso de estudio seleccionado para realizar pruebas de procesamiento InSAR y desarrollar un análisis de costos al aplicar la metodología, es la autopista Mazatlán-Durango (figura 1.3); se eligió dicha carretera por su gran importancia en el desarrollo turístico y económico de la región.



**Figura 1.3. Imagen satelital del caso de estudio (Google Earth, 2019).**

Es importante mencionar que el objetivo de la presente investigación es determinar a través de un análisis del estado del arte, la factibilidad de aplicar la tecnología satelital con el método InSAR en el monitoreo periódico de la infraestructura carretera, siendo la finalidad llevar a cabo una evaluación de manera global.

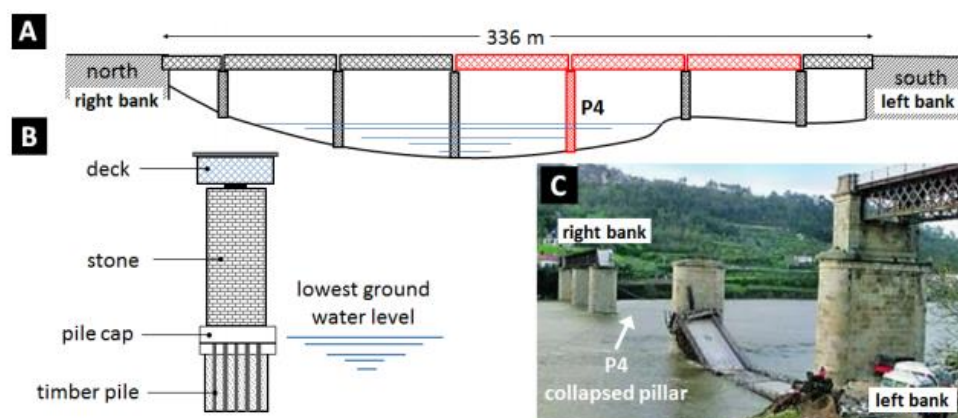
Por otro lado, los objetivos específicos que se plantearon son los siguientes:

- Revisar el estado del arte para analizar las investigaciones de monitoreo estructural y detección de subsidencia con el método InSAR.
- Realizar un inventario de las misiones satelitales disponibles con la finalidad de seleccionar las mejores para el monitoreo de la infraestructura carretera.
- Determinar que parámetros estructurales de la infraestructura carretera se pueden analizar y monitorear a través de InSAR.
- Evaluar las ventajas y desventajas de aplicar InSAR para el monitoreo de la infraestructura carretera considerando costos, precisiones, material tecnológico necesario, etcétera.

En el caso de las investigaciones más interesantes utilizando la tecnología InSAR, se presenta la realizada por Sousa y Bastos [11], la cual consiste en un análisis en retrospectiva a través de imágenes SAR del colapso sufrido por el puente Hintze Ribeiro en Portugal. La estructura tenía una longitud aproximada de 336 metros, estaba formada por siete claros, el tablero estaba apoyado en seis pilas de granito con alturas que varían de los 15 a los 30 metros (figura 1.4). El colapso del puente sucedió el 4 de marzo del 2001, este accidente es considerado el más crítico en la historia de Portugal.

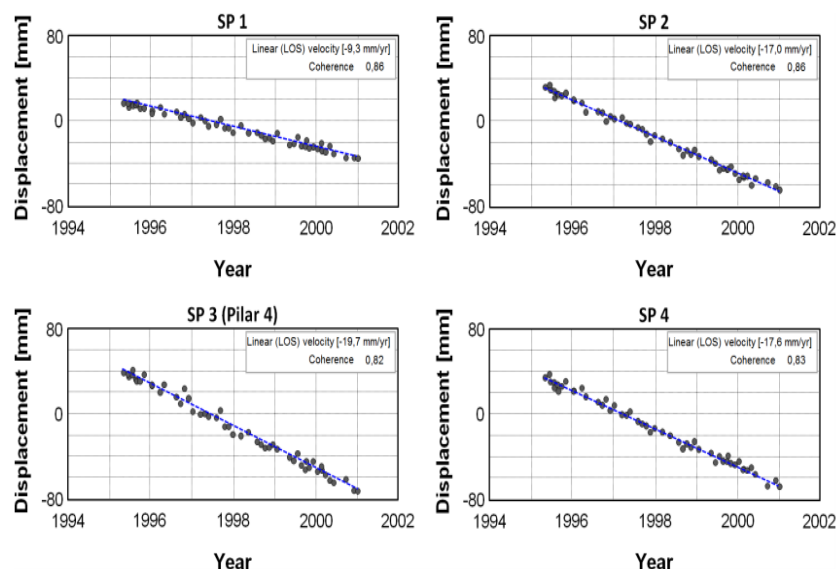


La investigación analizó cinco años con seis meses de datos SAR de resolución moderada provenientes de la misión satelital ERS-1/2 con la combinación de los métodos PSI (Persistent Scatterers) y SB (Small Baseline).



**Figura 1.4. Puente Hintze Ribeiro [11].**

El reporte oficial de los hechos tras el accidente indicó que la causa del derrumbe fue la pérdida del soporte de sedimento en el terreno de la cimentación de la pila, así como las altas corrientes de agua provocadas por el comienzo del año hidrológico.

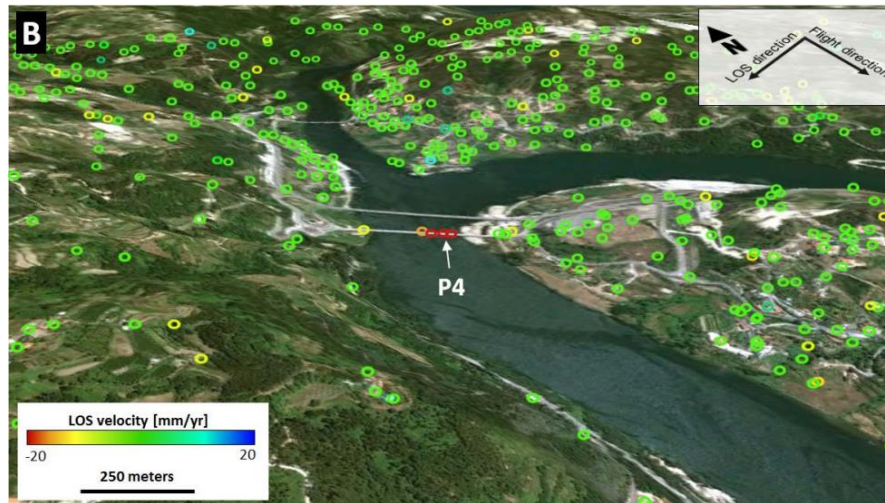


**Figura 1.5. Series del tiempo de los cuatro puntos sobre el puente [11].**

Los resultados brindados por el estudio con imágenes SAR indicaron que los rangos de deformación continuamente sobrepasaban lo esperado para el tipo del puente y las deformaciones presentaban una tendencia sistemática en la misma dirección,

por lo que, el comportamiento inestable del puente se pudo definir años antes de la catástrofe (figura 1.5 y 1.6).

La investigación concluye que InSAR tiene la capacidad de monitorear la estabilidad de puentes con el potencial de detectar desplazamiento con velocidades de unos cuantos milímetros por año, lo cual sirve para evaluar el riesgo de derrumbes y generar un sistema de alarma cuando el comportamiento esté fuera de los límites de diseño.



**Figura 1.6. Promedio de deformación lineal sobre Google Earth [11].**

Por otro lado, el trabajo presentado por Roccheggiani et al. [12] examina por medio de InSAR los desplazamientos del terreno producidos por la construcción del Tunel Fereggiano en la ciudad de Génova. Los datos SAR fueron obtenidos a través de la misión satelital Sentinel-1, el análisis fue realizado con 159 imágenes de forma ascendente y 161 de manera descendente, cubriendo un periodo desde octubre del 2008 hasta abril del 2015, cada imagen se adquirió con una resolución temporal de seis o doce días.

En los resultados del procesamiento se puede apreciar una relación entre la subsidencia encontrada con las imágenes SAR con respecto al avance que presentaba la construcción del túnel (gráficas en la derecha de la figura 1.7). Además, en las curvas de nivel de la figura 1.7 se ilustra dos zonas de subsidencia cercanos al punto de referencia 72222 y 52000, sin embargo, también se puede apreciar estabilidad en el entorno de dichas áreas. La investigación concluye que la información de Sentinel-1 puede emplearse para monitorear infraestructura durante el proceso de construcción, al ser imágenes de acceso libre con repetibilidad cada seis días, se tiene un beneficio económico. Adicionalmente, la información obtenida se puede utilizar para simular el comportamiento del terreno durante cada etapa de la construcción.



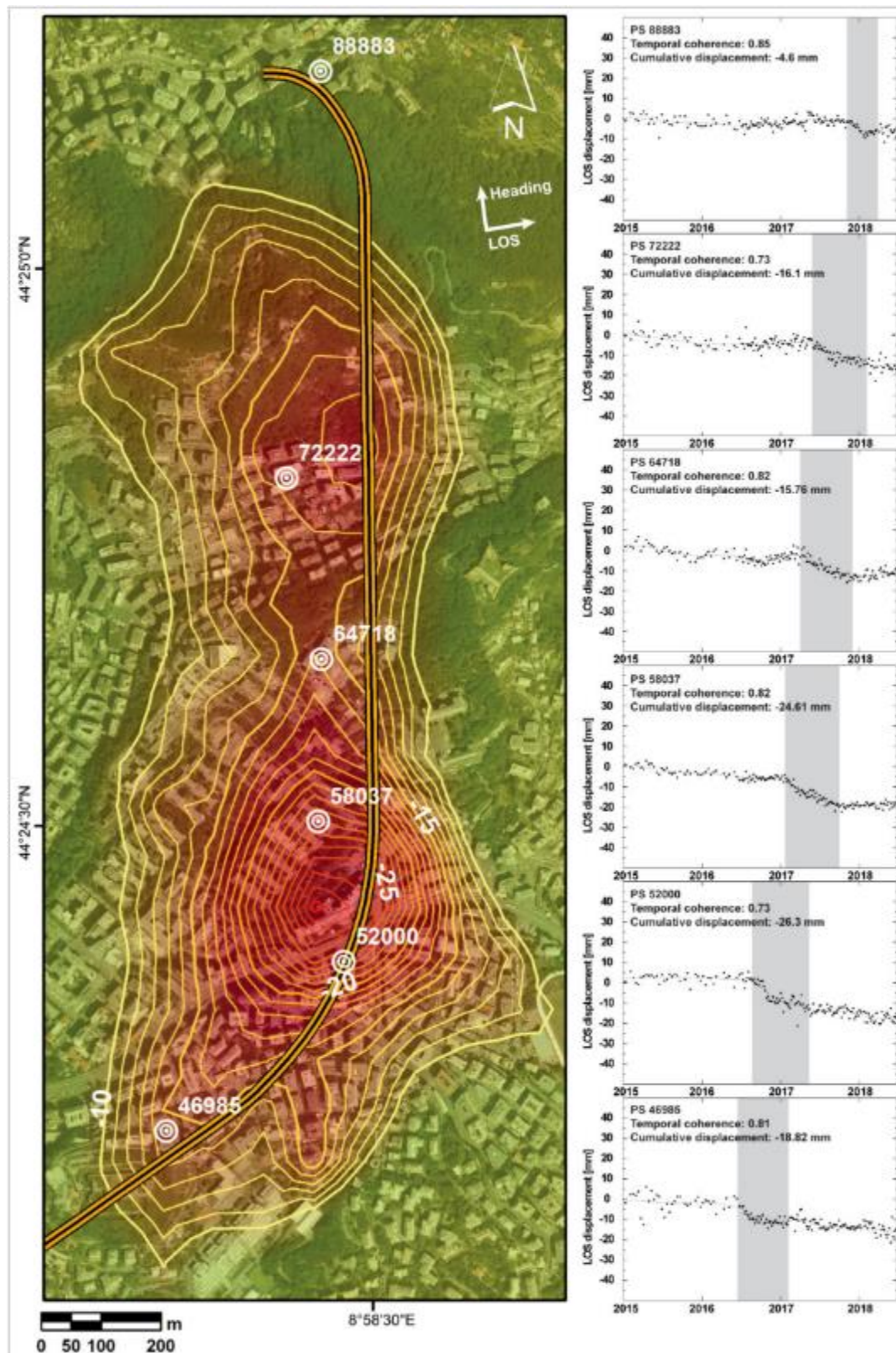
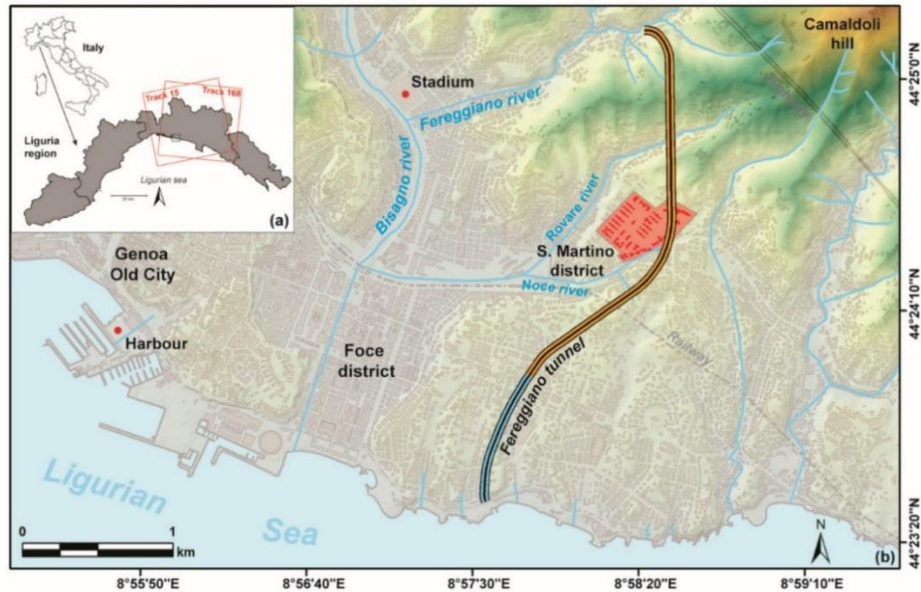


Figura 1.7. Resultados del proceso InSAR [12].



**Figura 1.8. Ciudad de Génova y la ubicación de la construcción del tunel Fereggiano [12].**

La Universidad de Virginia y el departamento de transporte de Virginia [13] desarrollaron una investigación para detectar subsidencia, laderas inestables, socavación y monitoreo de puentes con InSAR de forma automatizada. Posteriormente, validaron los resultados en campo con la implementación de otras metodologías de medición como LiDAR (Light Detection and Ranging) y fotogrametría digital. En las siguientes imágenes se puede apreciar los resultados encontrados:

- Las figuras 1.9 y 1.10 ilustran el análisis realizado en taludes, en ambas gráficas se observa una tendencia en la disminución de la altura del terreno.
- La figura 1.11 presenta un ejemplo del posible desarrollo de la socavación, su detección se basa en la idea de que un punto que alguna vez fue coherente y posteriormente ya no lo es, se debe al excesivo movimiento del terreno o posible generación de la socavación (color rojo en la imagen indica sedimentación).
- El Monitoreo de puentes en algunos casos puede ser complicado debido a la dificultad de encontrar un reflejante natural de la señal electromagnética en las estructuras, para este tipo de casos se suelen colocar reflejantes prefabricados en los lugares de interés para detectar cambios (figura 1.12).
- En el caso de daños en el pavimento se encontró una relación entre las diferentes respuestas de desplazamiento con respecto a evidencias visibles (figura 1.13).

Esta investigación concluye que InSAR tiene el potencial para el monitoreo de la infraestructura de transporte. Los posibles usos cubren el monitoreo de

sedimentación en el entorno de puentes, entradas de túneles, estructuras de drenaje, muros de contención y vías férreas. Es importante remarcar que, por su capacidad de detectar cambios al nivel de unos cuantos milímetros, se puede aplicar InSAR en la evaluación de geo-peligros en la infraestructura carretera.

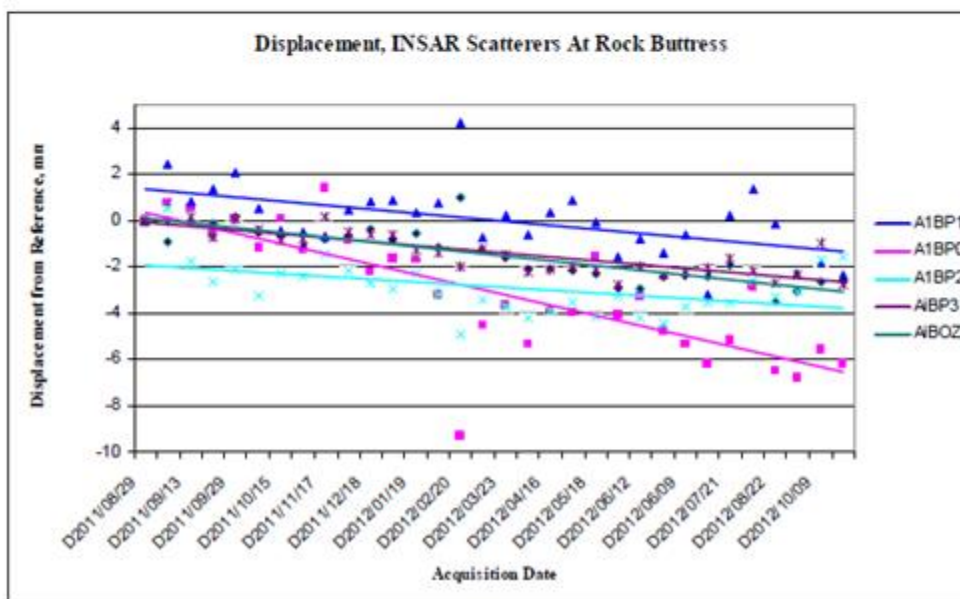
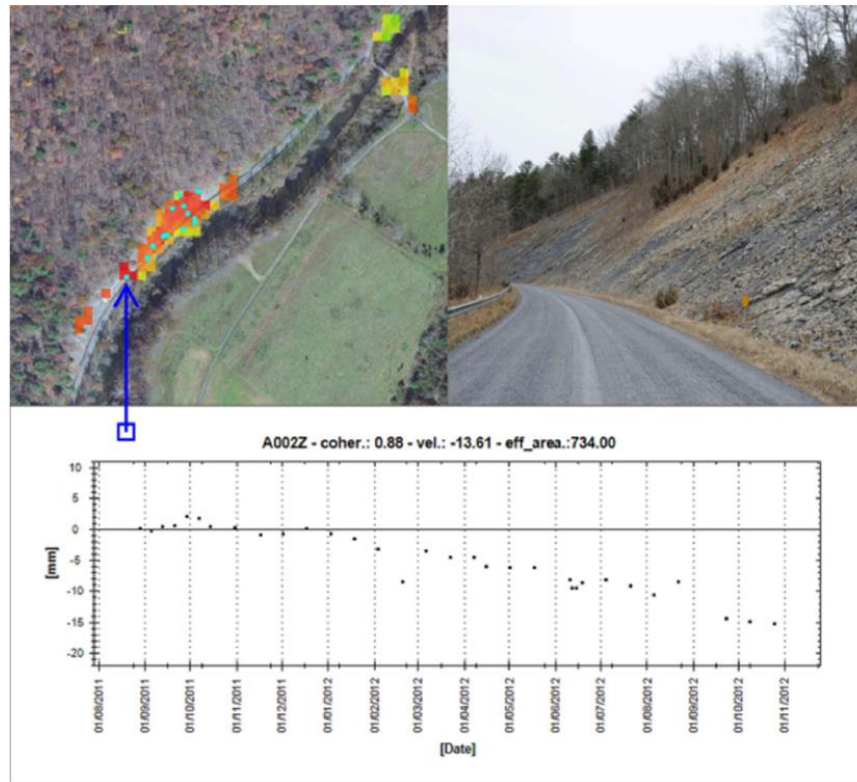
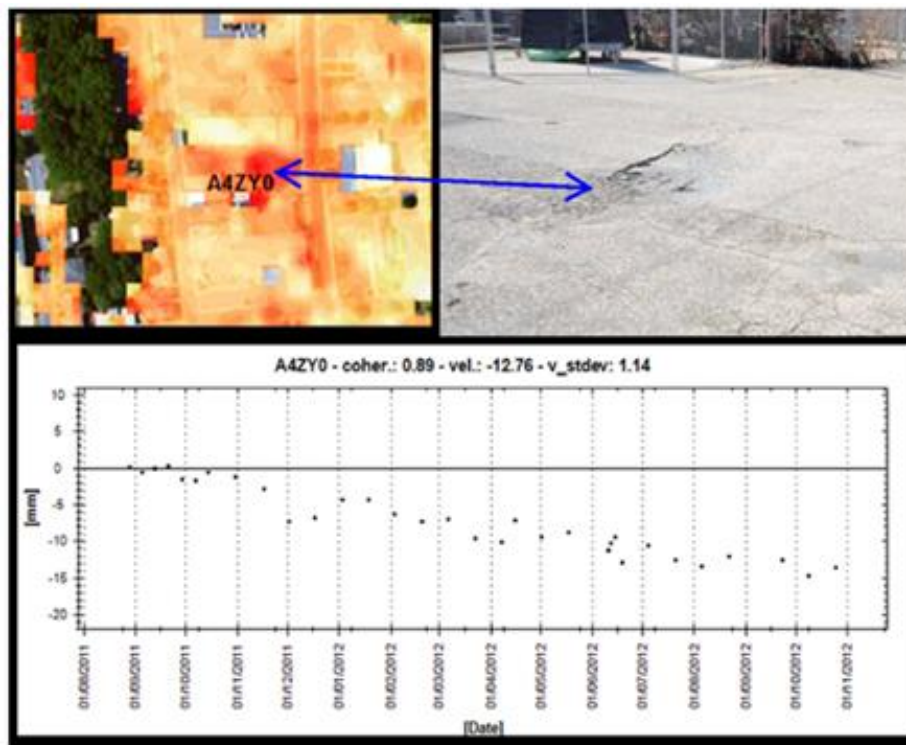


Figura 1.9. Monitoreo al muro de contención de rocas [13].





**Figura 1.10. Monitoreo de taludes [13].**



**Figura 1.11. Detección de socavación [13].**

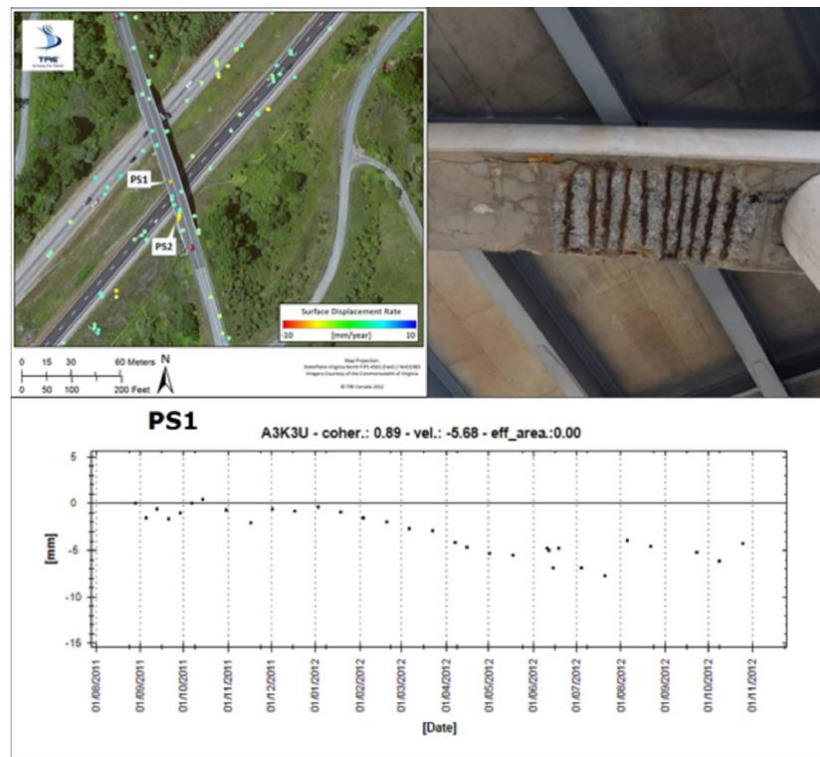


Figura 1.12. Monitoreo de puentes [13].

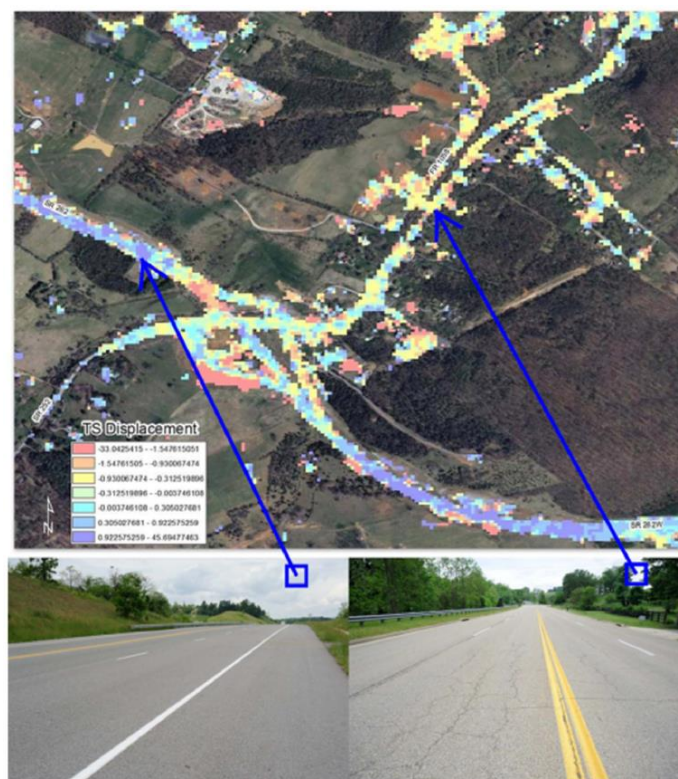


Figura 1.13. Calidad del pavimento [13].



## 2 Conceptos de InSAR

---

Percepción remota estudia el comportamiento de los objetos a través de su interacción con cierto rango específico del espectro electromagnético, actualmente, es aplicada a un gran número de campos científicos. En este trabajo de investigación se estudia la fiabilidad de aplicar InSAR en el monitoreo de infraestructura carretera, por lo que, se definirán los conceptos básicos de la metodología, así como algunos programas de cómputo para el análisis de imágenes y misiones satelitales SAR.

### 2.1 Radar de Apertura Real (RAR)

El funcionamiento del radar consiste en emitir una señal electromagnética en un tiempo inicial, la cual viajará hasta interactuar con un objeto que reflejará la señal de regreso al satélite, al recibir la antena la señal electromagnética en un tiempo final se hace un registro de su valor de fase e intensidad como un número complejo. La fase tiene información de la distancia del objeto y la intensidad de características como rugosidad, pendiente y propiedades eléctricas [14].

La resolución en la dirección del rango, es decir, la mínima distancia que deben de tener dos objetos para poder ser diferenciados entre ellos por el radar, es calculada con la siguiente ecuación ya proyectada en el terreno [14].

$$\delta_r = \frac{c}{2B_w \sin \theta} \quad (1)$$

Donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío,  $\theta$  es el ángulo de incidencia y  $B_w$  es el ancho de banda de la frecuencia modulada o pulso Chirp.

En el caso de la dirección azimutal, su resolución es más pobre debido a que todos los objetos están posicionados a la misma distancia en la dirección del rango. La ecuación 2 se emplea para el cálculo de la resolución azimutal [14].

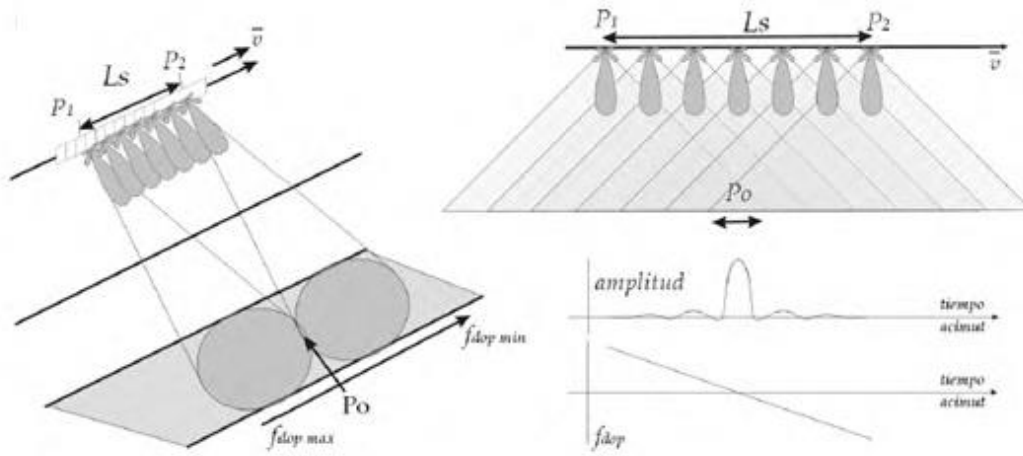
$$\delta_a = \frac{\lambda}{La} R \quad (2)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda,  $La$  es longitud de la antena y  $R$  es la distancia sensor-objeto. Es muy notorio la diferencia entre la resolución rango y la azimutal, siendo la última muy baja.

## 2.2 Radar de Apertura Sintética (SAR)

Para mejorar la resolución azimutal, la longitud de la antenna debería de incrementarse notoriamente, por tal motivo, se desarrolló SAR.

De forma general, SAR consiste en que un objeto recibe varios pulsos durante el paso de la antenna de radar, posteriormente, se utiliza la diferencia Doppler para separar los pulsos reflejados por el objeto durante todo el transcurso y por lo tanto generar una mejor resolución azimutal [14].



**Figura 2.1. SAR [14].**

La resolución azimutal está dada por la ecuación 3, que es idéntica que la ecuación 2, pero en vez de utilizar la longitud de la antenna real ( $La$ ) se aplica la longitud de la antenna sintética ( $L_s$ ) [14].

$$\delta_a = \frac{\lambda}{L_s} R \quad (3)$$

Donde la longitud de la antenna sintética se puede definir como:

$$L_s = 2\lambda R/La \quad (4)$$

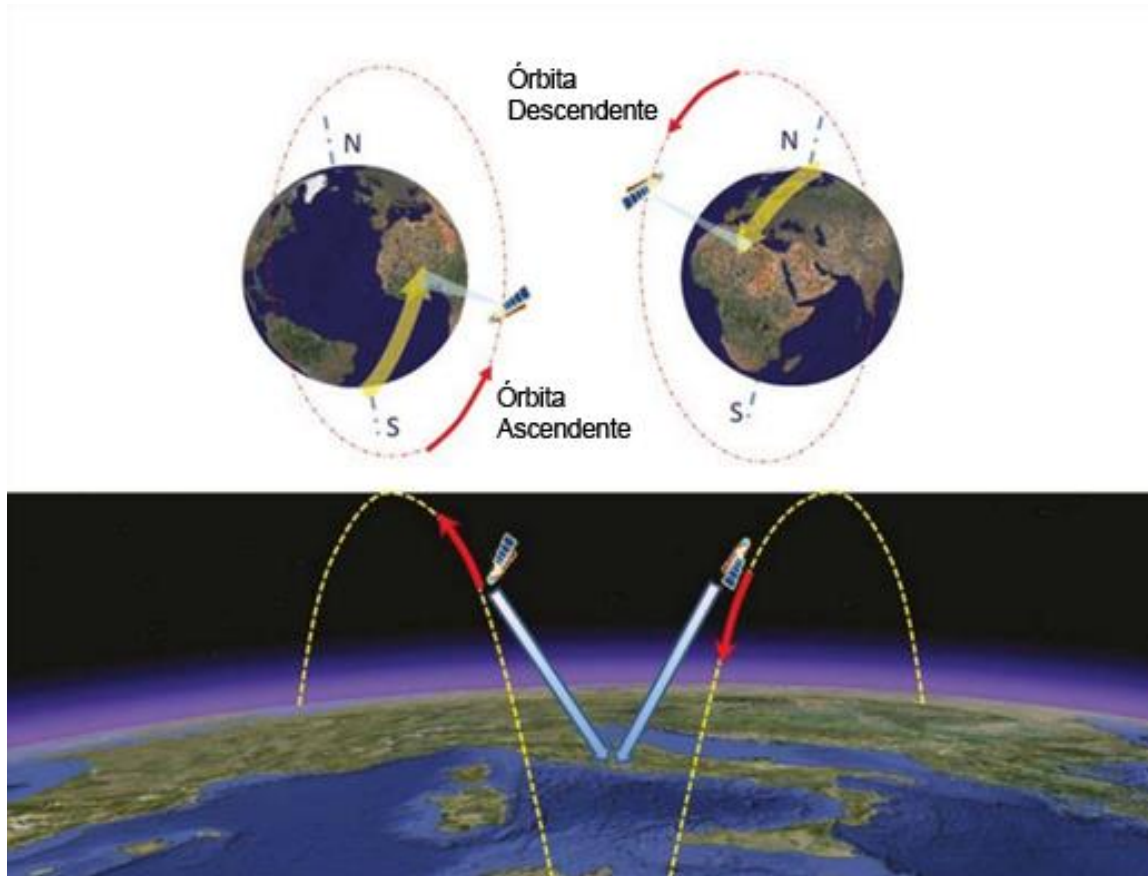
Para reducir la ecuación generada de la resolución azimutal, se combinan las ecuaciones 3 y 4, dando como resultado la ecuación 5, la cual señala que la resolución azimutal es igual a la mitad de la longitud de la antenna de radar real [14].

$$\delta_a = \frac{La}{2} \quad (5)$$



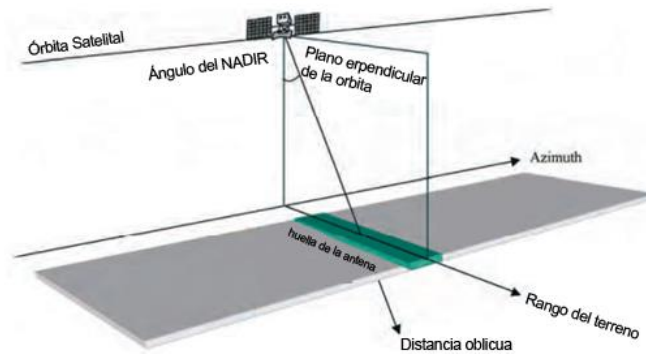
## 2.3 Geometría de adquisición

La adquisición de datos por medio de los satélites SAR puede ser desde una órbita ascendente o descendente (figura 2.2). La órbita ascendente parte del polo sur hacia el polo norte observando a la derecha, mientras la órbita descendente viaja del polo norte al polo sur observando hacia la izquierda. En la sección 2.6 se define el beneficio de emplear imágenes SAR de los dos tipos de orbitas.



**Figura 2.2. Órbitas de satélites SAR [15].**

Los satélites SAR orbitan la Tierra a una altura entre 500 a 800 km de una manera cuasi-polar. El ángulo entre el Norte-Sur verdadero y la órbita del satélite varía en un rango de  $10^\circ$  [15]. La antena radar descansa sobre el satélite y apunta a la Tierra en el plano perpendicularmente a la órbita. El ángulo que se forma entre el nadir y la antena se denomina Off-nadir y se puede encontrar en un rango de  $20^\circ$  a  $50^\circ$ , es importante mencionar que el ángulo de incidencia es diferente al off-nadir por la curvatura de la Tierra. Por otro lado, debido a que es un sistema activo, parte del terreno que en la figura 2.3 está denominado como huella de la antena (antena footprint) es iluminado en dos direcciones, azimuthal (azimuth) y en rango de terreno (Ground range); en el caso de la dirección de la línea de vista de la antena se denomina rango inclinado (slant range direction) [16].

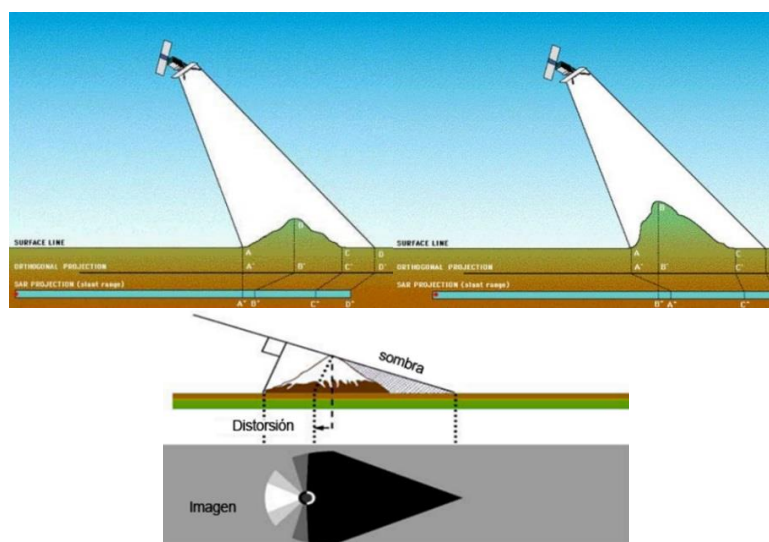


**Figura 2.3. Sistema de imagen SAR [16].**

## 2.4 Distorsión

Debido a la metodología empleada para recolectar los datos por el satélite SAR con vista lateral y midiendo el tiempo de viaje de la señal electromagnética, el terreno presenta las siguientes distorsiones geométricas [9]:

- Foreshortening: es un fenómeno presente en zonas montañosas, donde la distancias entre dos puntos es más chica que proyectándolos en un área plana, dicho efecto se reduce durante el proceso de geocodificación (figura 2.4 parte superior lado izquierdo).
- Layover: el fenómeno se presenta en pendientes muy inclinadas, el orden de los elementos de la superficie está al revés en la imagen que lo que se observa en el terreno (figura 2.4 parte superior lado derecho).
- Shadow: una pendiente con un ángulo de inclinación mayor que el ángulo de incidencia genera la presencia de sombras (figura 2.4 parte inferior).



**Figura 2.4. Distorsión geométrica [9].**

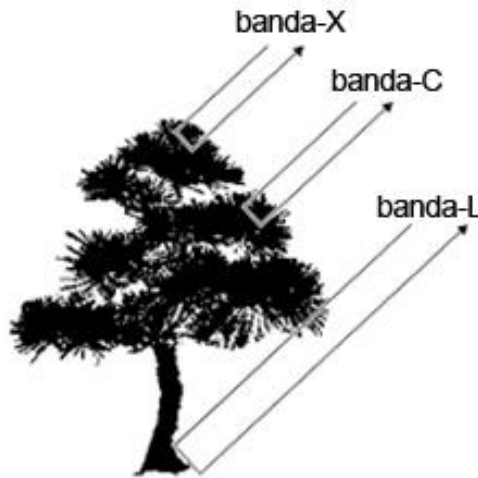
## 2.5 Bandas de sensores de radar

Algunas de las bandas usadas por los sensores de radar son “X”, “C”, “S”, “L”, y “P”, teniendo cada una diferente aplicabilidad y características como se muestra en la tabla 2.1. La banda “X” sirve para monitoreo urbano, zona con hielo y nieve, así como áreas con poca vegetación; la banda “C” se usa para mapeo global, detección de cambios, monitoreo de áreas con moderada vegetación y navegación marítima; la banda “S” se implementa en observaciones terrestres y monitoreo de agricultura; la banda “L” tiene funcionabilidad para monitoreo geofísico, de biomasa y mapeo de vegetación; y la banda “P” para estudios de biomasa [17].

**Tabla 2.1. Características de las bandas usadas por sensores de radars [17].**

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

Una de las razones de que el campo de aplicación de las bandas varía es debido a que entre más grande sea la longitud de onda, mayor es la penetración que alcanza la señal en el suelo con vegetación, nieve u otros materiales, tal como lo presenta la figura 2.5.



**Figura 2.5. Ejemplo de penetración de la señal emitida por un sensor SAR [18].**

## 2.6 Estimación de desplazamiento en dos dimensiones

La detección de desplazamientos por medio de InSAR son considerados unidimensionales, sin embargo, al emplear información de órbitas descendentes y ascendentes se puede determinar los cambios en la componente vertical y horizontal; la información de la componente horizontal es puramente este-oeste debido a que InSAR es una herramienta insensible en la dirección norte-sur por su órbita cuasi-polar [15].

$$\begin{bmatrix} d_{asce} \\ d_{desc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{asce x} & u_{asce z} \\ u_{desc x} & u_{desc z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x \\ d_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

Donde  $d$  es el vector de desplazamiento y  $u$  es el vector unitario asociado a cada dirección.

## 2.7 InSAR

InSAR es una metodología que permite calcular la diferencia de fase entre dos o más imágenes SAR de una misma zona, pero obtenidas en diferentes periodos de tiempo con el propósito de determinar la topografía y/o deformación del terreno. La deformación del terreno puede ser calculada con una precisión de milímetros a centímetros debido a que las mediciones son llevadas a cabo con una fracción de la longitud de onda de la señal. Por otro lado, la calidad con la que se determina la topografía de la superficie depende de la geometría empleada para recolectar los datos por el sensor SAR [17]. La interferometría se genera a través de la multiplicación cruzada de la imagen maestra con la conjugación compleja de las esclavas. La amplitud de ambas imágenes es multiplicada, y las fases son restadas para formar el interferograma [19]. La diferencia de fase es afectada por otras fuentes de error que se deben de eliminar como lo indica la ecuación 7 [20].

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{flat} + \Delta\varphi_{elevación} + \Delta\varphi_{desplazamiento} + \Delta\varphi_{atmósfera} + \Delta\varphi_{ruido} \quad (7)$$

Donde  $\Delta\varphi_{flat}$  es la contribución en el cambio de fase producido por la curvatura de la tierra,  $\Delta\varphi_{elevación}$  producido por la topografía,  $\Delta\varphi_{desplazamiento}$  generado por la deformación,  $\Delta\varphi_{atmósfera}$  es por la diferencia en la humedad temperatura y presión de la atmósfera en cada adquisición, y  $\Delta\varphi_{ruido}$  es el ruido ocasionado por cambio temporal, diferentes ángulos de vista y el volumen del reflejante.

## 2.8 Coherencia

Para determinara la similitud entre la imagen maestra/esclava y conocer si son buenas candidatas para establecer un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) se emplea el valor de coherencia, el cual se define en el rango de cero a uno. Las áreas

de alta coherencia aparecen brillantes en las imágenes como edificios, mientras que las zonas de baja coherencia se ilustran oscuras como áreas con vegetación [20].

La pérdida de coherencia se debe al tiempo transcurrido de una adquisición a otra (temporal), errores de órbita (geométrico), por vegetación (volumétrico) y por el procesamiento [20].

$$\gamma = \gamma_T * \gamma_G * \gamma_V * \gamma_P \quad (8)$$

Donde  $\gamma_T$  es el efecto temporal,  $\gamma_G$  efecto geométrico,  $\gamma_V$  es el efecto volumétrico y  $\gamma_P$  es la pérdida de coherencia por el procesamiento. Las consecuencias por los efectos volumétrico y temporal no pueden ser evitados, sin embargo, el efecto por procesamiento puede ser evitado y el efecto geométrico parcialmente eliminado [19].

## 2.9 DInSAR

DInSAR (Differential InSAR) es una técnica interferométrica donde se elimina la contribución de la topografía en la diferencia de fase. El efecto de la topografía se reduce aplicando un MDE y arroja la fase del interferograma igual a la ecuación 9 [13].

$$\varphi_{dist} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_{disp} \quad (9)$$

Donde  $\Delta r_{disp}$  es el desplazamiento en la línea de vista del satélite que se busca.

La desventaja de DInSAR es que se ve afectada por los efectos atmosféricos, tiene una precisión centimétrica y no diferencia entre movimientos lineales y no lineales [13].

## 2.10 PSI

Debido a que DInSAR es afectado por los efectos de la atmosfera, fue necesario el desarrollo de otras metodologías, lo cual llevo a la creación del método del dispersadores permanentes o persistentes InSAR (PSI, por sus siglas en inglés). La metodología PSI utiliza varios interferogramas basados en un conjunto de por lo menos 15 imágenes, detecta pixeles con una reflectividad estable a través de todas las imágenes, posteriormente, se efectúan correcciones sobre estos pixeles de los efectos atmosféricos para determinar el desplazamiento histórico de cada uno, permitiendo la detección de movimiento lineal y no lineal [13].

## 2.11 SB

Otro tipo de algoritmos basados en dispersadores distribuidos (distributed scatterer(s)) y no en un punto coherente como PSI, tienen su aplicabilidad en

ambiente natural, es decir, zonas con vegetación o rocosa [15]. Este método utiliza la coherencia espacial para evaluar la fase interferométrica. Zonas de gran tamaño y que no presentan cambios suelen ser más coherentes y sensibles a la línea base perpendicular, por lo tanto, la combinación de interferogramas debe realizarse considerando los límites temporales y la línea base [14].

## 2.12 Misiones satelitales SAR

Existen plataformas digitales para obtener acceso a la información de las misiones satelitales SAR, sin embargo, sus características varían de un sistema a otro, es por eso que en la tabla A.1 y A.2 (Anexos) se muestra un resumen del acceso a los datos de las misiones más relevantes y se presenta el inventario de misiones satelitales SAR pasadas, actuales y futuras.

## 2.13 Sentinel-1

De forma general Sentinel-1 es una misión desarrollada y operada por la ESA que recolecta datos en la banda “C” en cuatro diferentes modos, con una resolución menor a 5 metros y cobertura arriba de 400 km. Adicionalmente, Sentinel-1 tiene la capacidad de proporcionar polarización dual, resolución temporal alta, y una rápida entrega de datos. La misión satelital está compuesta por una constelación de dos satélites Sentinel-1A y Sentinel-1B, los cuales comparten el mismo plano orbital y buscan cubrir la masa terrestre de todo el mundo cada dos semanas, zonas de mar-hielo, costas europeas y el océano abierto. El objetivo de Sentinel-1 es proporcionar datos para el monitoreo marítimo y terrestre, respuesta de emergencias, cambio climático y seguridad [21]. Otras características de sentinel-1 se presentan en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2. Características generales de Sentinel-1 [21].**

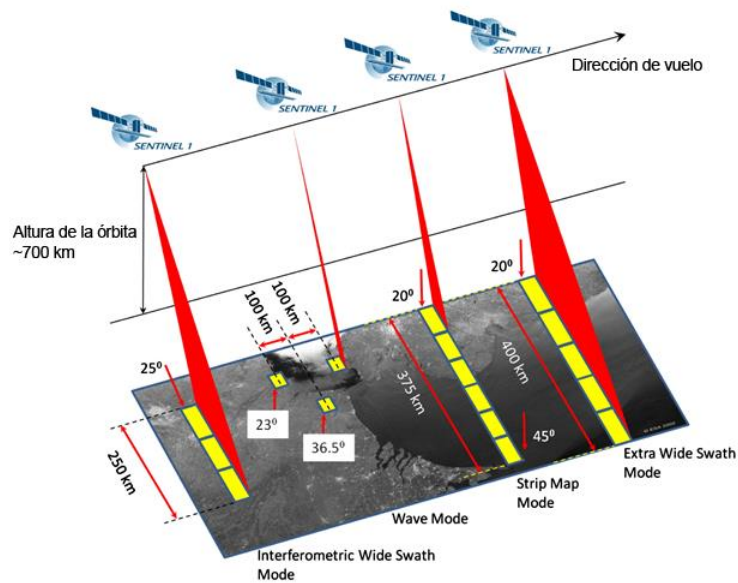
Inclinación	98.18°
Instrumento	Banda C SAR (5.4 GHz)
Ángulo de incidencia	Vista lateral, 15-45° off nadir
Polarización	VV y VH o HH y HV
Altura de la órbita	693km
Órbita	Sincronización solar, cuasi-polar
Repetición de la órbita	12 días por satélite y en constelación 6 días

## 2.14 Modo de adquisición de imágenes Sentinel-1

Sentinel-1 utiliza cuatro formas de recolectar los datos (figura 2.6) [22]:

- Extra-Wide swath (EW): funciona para el monitoreo de costas y mares, franja de cobertura de 400 km y resolución espacial de 25x100 metros.

- Stripmap (SM): franja de cobertura de 80 km, resolución espacial de 5x5 metros, su adquisición es por pedido y en circunstancias especiales.
- Interferometric wide swath (IW): observaciones rutinarias sobre tierra, franja de cobertura de 250 km y una resolución espacial de 5x20 metros.
- Wave mode (WV): funciona para observaciones rutinarias sobre el mar, franja de cobertura de 20x20 km con una resolución espacial de 5x5 metros cada 100 km a lo largo de la órbita.



**Figura 2.6. Modos de adquisición de datos [23].**

## 2.15 SNAP

El principal software empleado para procesar los datos para el caso práctico de la investigación fue SNAP (SeNtinel's Application Platform), el cual es proporcionado por la ESA de manera libre. SNAP permite elaborar los pasos del uno al tres y cinco al seis, indicados en la sección 3.4 para generar un interferograma. De acuerdo a la ESA [24] el diseño de SNAP es eficiente para el procesamiento y análisis de observaciones terrestres por su portabilidad, extensibilidad, procesamiento gráfico, entre otras cosas.

## 2.16 SNAPHU

El algoritmo de SNAPHU permite desenvolver las fases, lo que significa, la recuperación de la fase no ambigua a partir de una matriz de dos-dimensiones de los valores de fase conocidos por el módulo de  $2\pi$  Rad, además de que es de acceso libre, está escrito en código "C" y puede ejecutarse en cualquier plataforma de Linux [25].





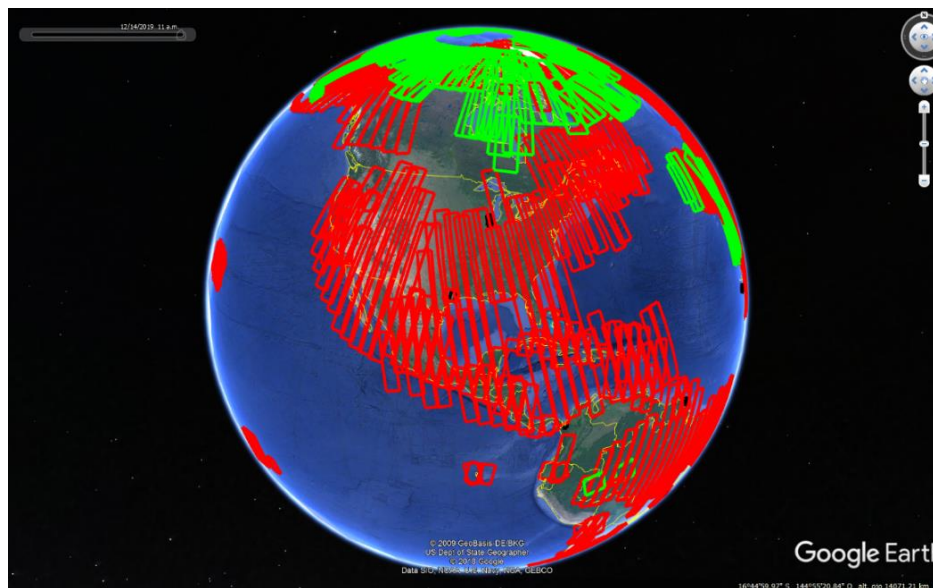
## 3 Metodología

---

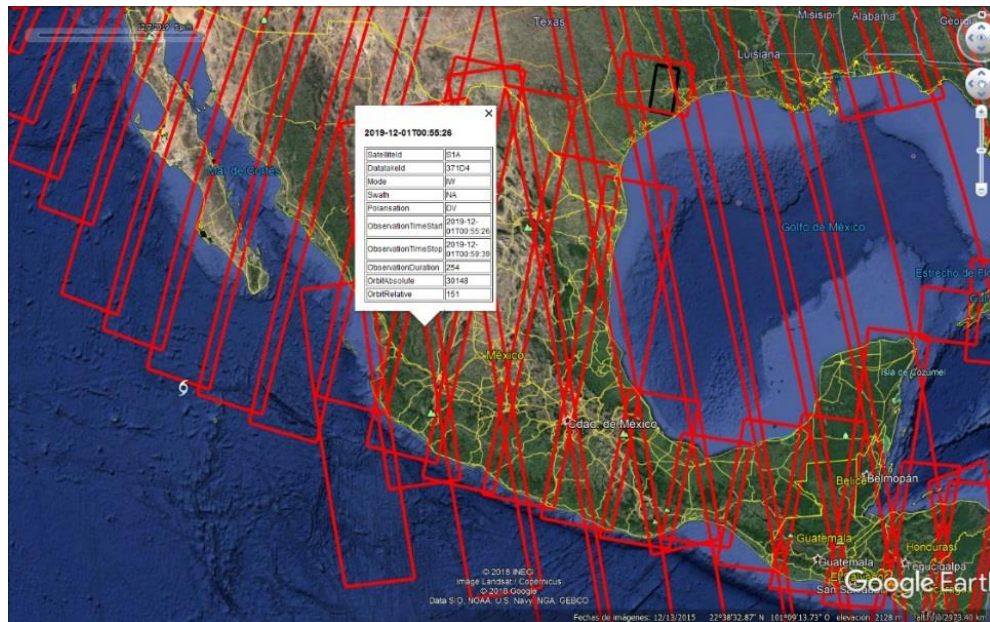
El objetivo principal de este trabajo de investigación es el análisis del estado del arte sobre el monitoreo y evaluación estructural con la metodología InSAR, sin embargo, se desarrolló un procesamiento de imágenes provenientes de la misión Sentinel-1, que involucra un segmento de la autopista Mazatlán-Durango.

### 3.1 Selección de misión satelital y descarga de imágenes SAR

Del inventario de satelitales SAR disponibles (tabla 2.2), las misiones adecuadas para el monitoreo de la infraestructura son las que emplean la banda “C” o “X”, las cuales son Radarsat-2, Cosmo-SkyMed, Sentinel-1, TerreSAR-X y Paz SAR, activos actualmente; en caso de requerir información histórica se pueden consultar la información de ERS-1, ERS-2, Radarsat-1 y ENVISAT. En este trabajo se seleccionó Sentinel-1 (descrito en la sección 2.14), ya que proporciona imágenes de manera gratuita y también existen algoritmos de libre acceso para el procesamiento de la información (SNAP y SNAPHU). La ESA proporciona información en un archivo KMZ (formato típico de Google Earth) sobre la cobertura global de Sentinel-1 de acuerdo a la fecha, donde el modo IW se marca con rojo, EW con verde y SM con negro como se aprecia en la figura 3.1 (definición de IW, EW y SM en la sección 2.15). México es solamente cubierto por el modo IW de forma ascendente y descendente (figura 3.2).

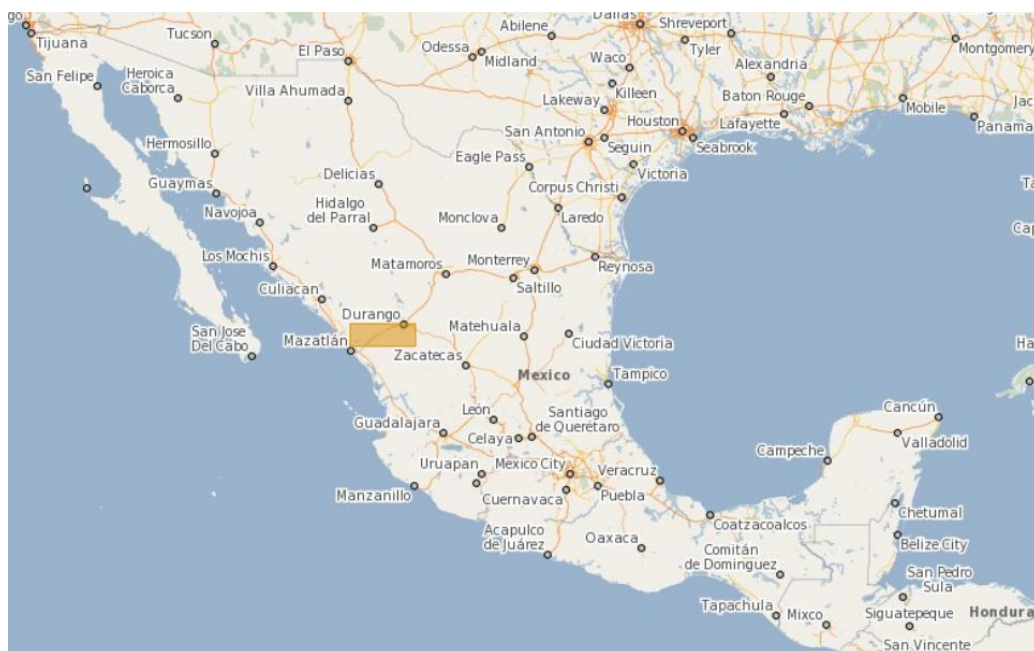


**Figura 3.1. Cobertura global de Sentinel-1 del 25 de Noviembre del 2019 [26].**



**Figura 3.2. Cobertura en México de Sentinel-1 del 25 de Noviembre del 2019**  
[26]

Las imágenes se descargan de la plataforma Copernicus Open Access Hub, donde se puede obtener información SAR simplemente con crear un usuario. Los pasos para acceder a las imágenes son muy sencillos, lo primero, es seleccionar el área de interés (figura 3.3) y después ingresar las características de la información que se busca (figura 3.4), al final, las imágenes disponibles aparecerán en una ventana auxiliar (figura 3.5).



**Figura 3.3. Selección del área de interés [27].**

Advanced Search Clear

» Sort By: Ingestion Date » Order By: Descending

» Sensing period

» Ingestion period

☒ Mission: Sentinel-1

Satellite Platform: S1A\_\* Product Type: SLC

Polarisation: Sensor Mode: IW

Relative Orbit Number (from 1 to 175) Collection:

☐ Mission: Sentinel-2

Satellite Platform: Product Type:

Relative Orbit Number (from 1 to 143) Cloud Cover % (e.g.[0 TO 9.4])

☐ Mission: Sentinel-3

Figura 3.4. Características de las imágenes a seleccionar [27].

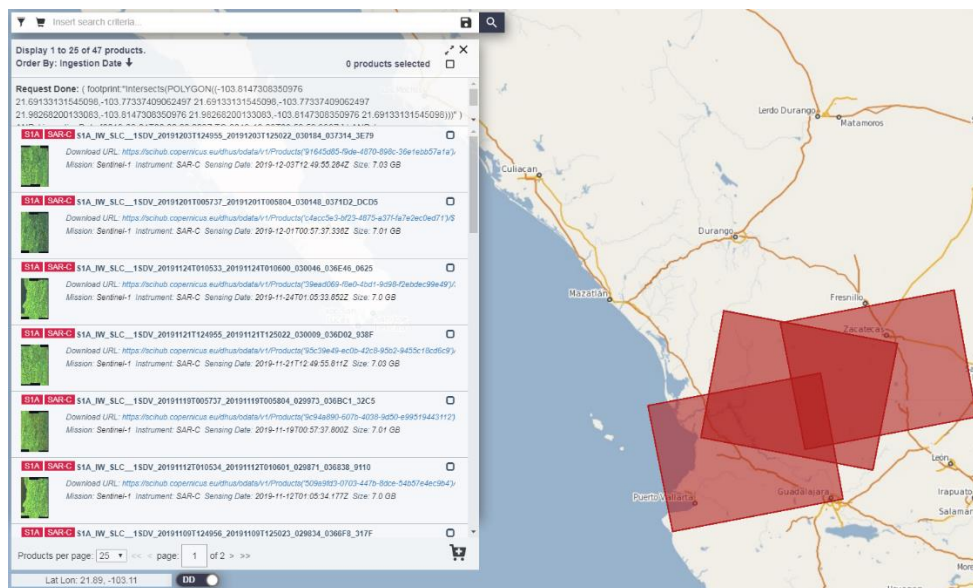


Figura 3.5. Imágenes disponibles [27].

## 3.2 Imágenes SAR

Dos imágenes SLC (Side Look Complex) fueron descargas en modalidad IW con una escena de 250 km, resolución espacial de 5x20 metros, empleando la banda



“C” (longitud de onda igual a 5.6 cm). La figura 3.6 ilustra el área que abarca la imagen SAR entre los estados de Sinaloa y Durango.



**Figura 3.6. Localización de la imagen SAR utilizada [27].**

La dirección del satélite es descendiente, número relativo de la órbita 85, satélite Sentinel-1A y las fechas de adquisición son el 5 de julio y 8 de agosto del 2019. La figura 3.7 presenta la imagen SAR adquirida.



**Figura 3.7. Imagen SAR utilizada [27].**

### 3.3 Procesamiento de imágenes SAR

Basado en tutoriales por parte de la ESA y la UAF (Universidad de Alaska Fairbanks) [19-20] el desarrollo de InSAR se efectúa principalmente con los siguientes pasos:

1. Preprocesamiento
2. Co-registro
3. Procesamiento interferométrico
4. Desenvolvimiento de fase
5. Geo-codificación
6. Exportar en formato de Google Earth

Estas etapas de procesamiento se explicarán con más detalle en las siguientes subsecciones.

#### 3.3.1 Preprocesamiento

En el primer paso del proceso se seleccionó el sub-swath (las imágenes están divididas en tres franjas o sub-swath, las cuales son denominadas como IW1, IW2 e IW3) y el número de burst (cada sub-swath es conformado por nueve bursts) que cubren el área de estudio, en este caso se eligió el sub-swath IW2 y los bursts tres al siete. La función que se empleó en SNAP fue **Radar---Sentinel-1 TOPS---S-1TOPS Split**.

#### 3.3.2 Co-registro

Las imágenes utilizadas se co-registran en un stack, donde una imagen fue seleccionada como la maestra y las otras como esclavas, de esta forma, cada objetivo en el terreno contribuyó al mismo pixel en ambas imágenes debido a que los pixeles de las imágenes esclavas fueron alineados con respecto a la imagen maestra. Para el caso práctico, la imagen del 5 de julio fue considerada como la maestra, mientras que la esclava fue la del 8 de agosto.

En SNAP primero fue necesario aplicar los archivos de órbita para determinar con precisión la posición y velocidad del satélite (**Radar---Apply-Orbit-File**); posteriormente, las dos imágenes fueron co-registradas usando datos de las orbitas y un MDE (**Radar---Coregistration---S-1 TOPS Coregistration---Back-Geocoding**). Por último, se realizaron correcciones en rango y azimut para las zonas de traslape entre los bursts previamente seleccionados (**Radar---Coregistration---S-1 TOPS Coregistration---Enhanced-Spectral-Diversity**).

### 3.3.3 Procesamiento interferométrico

Como se mencionó en el capítulo 2, la interferometría se genera a través de la multiplicación cruzada de la imagen maestra con la conjugación compleja de las esclavas. La amplitud de ambas imágenes y las fases son restadas para formar el interferograma [19]. De manera automática se remueve el efecto de la fase provocado por Tierra plana.

En SNAP el proceso fue llevado a cabo por **Radar---Interferometric---Products---Interferogram**, para después unir los bursts en una sola imagen con **Radar---Sentinel-1 TOPS---TOPSAR-Deburst**. Para destacar la fase por deformación, en el siguiente paso se removió la topografía empleando un MDE (**Radar---Interferometric---Products---Topographic Phase Removal**). Posteriormente para reducir el ruido y mejorar la visualización de los anillos que indican la deformación se aplicó la opción multilooking, la cual realiza un promedio espacial de un número de píxeles vecinos para suprimir el ruido, afectando la resolución espacial. Por último, se aplicó el filtro Goldstein Phase Filtering (**Radar---Interferometric---Filtering---Spectral Filtering**).

### 3.3.4 Desenvolvimiento de fase

Los datos obtenidos en el paso anterior fueron exportados al software SNAPHU con **Radar---Interferometric---Unwrapping---SnaphuExport**. A partir de la información generada se ejecutó el algoritmo sobre la carpeta de interés con el comando que se encuentra en la cabecera del archivo “.conf”. Después, el resultado se importó a SNAP (**Radar---Interferometric---Unwrapping---SnaphuImport**) para obtener los desplazamientos (**Radar---Interferometric---Products---PhaseToDisplacement**).

### 3.3.5 Geo-codificación

Con el propósito de proyectar los resultados en un sistema de coordenadas geográfico, se empleó la opción **Radar---Geometric---Terrain Correction---Range-Doppler Terrain Correction**, la cual utiliza un MDE.

### 3.3.6 Exportar en formato de Google Earth

Para tener una mejor visualización de los resultados, se creó un archivo KMZ con el propósito de analizarlos en la plataforma de Google Earth (**Export---Other---View as Google Earth KMZ**).

## 4 Resultados

### 4.1 Interferograma

Se generó un interferograma siguiendo el proceso mencionado en el capítulo 3, con dos imágenes, una del 5 de julio y otra del 8 de agosto del 2019; en el estudio se seleccionó el IW2 en los bursts tres al siete. El resultado presentado en la figura 4.1 muestra desplazamientos entre 0.001 y alrededor de 0.06 metros. En la misma figura se hace énfasis de la parte de la carretera Mazatlán-Durango en la zona que mostró los mayores cambios de desplazamiento (zona marcada con cuadro rojo).

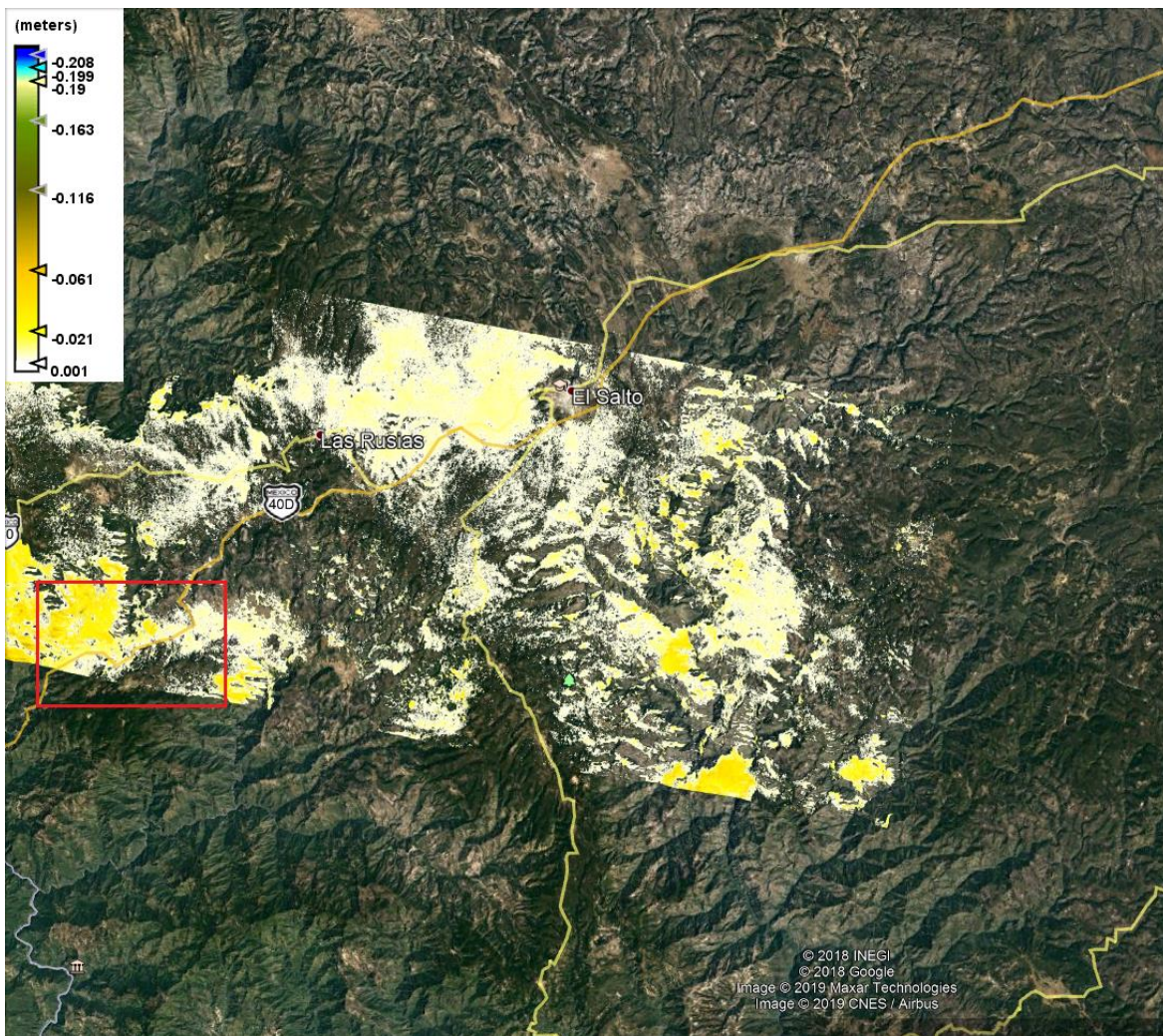


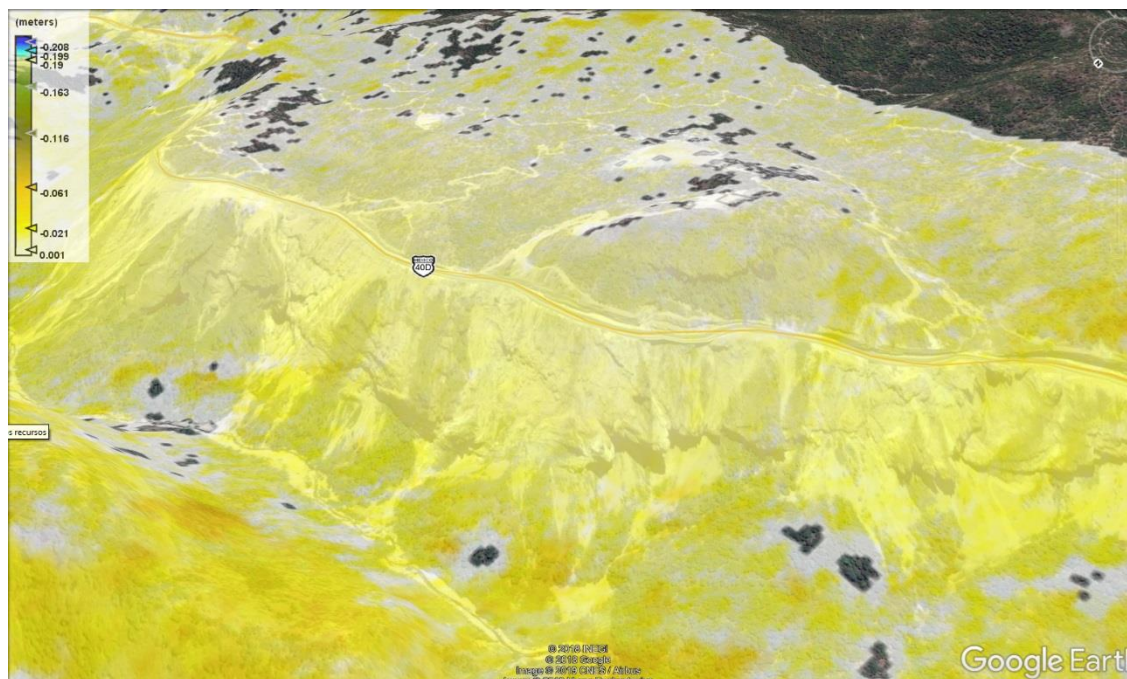
Figura 4.1. Interferograma resultante.



El área dentro del cuadro rojo en la figura 4.1 de la autopista Mazatlán-Durango es ilustrada en la figura 4.2 y los cambios que sufrió esta área de interés se muestran en la figura 4.3. Los desplazamientos que ocurrieron en la carretera y laderas fueron muy pequeños para considerarlos importantes, sin embargo, en algunas zonas montañosas el desplazamiento alcanzó aproximadamente los 6 centímetros.



**Figura 4.2. Área de enfoque.**



**Figura 4.3. Resultado en taludes de la carretera.**



## 4.2 Costo de aplicar InSAR

Se realizó un análisis del costo anual para aplicar InSAR en la autopista Mazatlán-Durango durante un año considerando imágenes de costo y de acceso libre.

Imágenes con costo: considerando información de la constelación Cosmo-SkyMed de la banda “X” con una resolución de 3x3-5x5 metros, en el formato Stripmap Himage que cubre 40X40 kilómetros, se estima que parte importante de la carretera se cubre con cinco imágenes. Para hacer un análisis anual con datos mensuales o bimestrales en un año se pueden ocupar de 30 a 60 imágenes (dependiendo del fenómeno que se esté estudiando). Es necesario tener en cuenta que cada imagen tiene un precio aproximado de \$22000 pesos, además, se debe agregar el costo de una computadora con altas especificaciones en memoria y procesamiento para analizar la información, el software y el personal capacitado, por lo que, el procedimiento tendría un costo aproximado de \$885000 pesos.

Imágenes sin costo: como se mencionó, sentinel-1 proporciona imágenes de acceso libre en la banda C con una resolución espacial de 5x20 metros, una imagen cubre la carretera por completo y se puede obtener datos cada seis días, además, existen software de acceso libre para procesar la información. El único costo del proyecto sería el personal capacitado y el equipo de cómputo especializado, por lo que se estima un costo de \$150000 pesos.

En la tabla 4.1 se muestra algunas combinaciones con los elementos que implican un gasto mayor en la aplicación de InSAR. Es importante mencionar que el pago de la computadora y software es único de forma anual.

**Tabla 4.1. Análisis económico.**

Equipo de computo	Software	Imágenes	Personal	Total
1	Libre	libre	1	\$ 150,000.00
1	Libre	costo	1	\$ 835,000.00
1	Costo	libre	1	\$ 225,000.00
1	Costo	costo	1	\$ 885,000.00



## 5 Conclusiones

---

De acuerdo a estudios desarrollados en los últimos años [15], respaldado por la revisión del estado del arte hecha en el proyecto EI 15/19 “Análisis del potencial de tecnología satelital InSAR para el monitoreo de la infraestructura carretera” [11-17, 28-37] y el caso de estudio desarrollado en esta investigación, se puede concluir que la metodología InSAR es una herramienta eficiente para ser aplicada en las siguientes áreas:

- Caracterización de áreas aledañas de derrumbes y taludes inestables: InSAR es eficiente para observar derrumbes lentos que a su vez provocan fallas súbitas en los taludes.
- Monitoreo de estructuras lineales: InSAR se puede aplicar para evaluar movimientos del terreno provocados por derrumbes, socavación y subsidencia, los cuales afectan líneas de tuberías, carreteras y vías férreas.
- Análisis de la estabilidad de estructuras: InSAR es una herramienta para monitorear desde un edificio hasta una ciudad completa, se puede obtener una identificación temprana de cambios en la altura del terreno.
- Verificación de daños causados por construcción: basado en información histórica de algunas misiones SAR se puede desarrollar un estudio de retrospectiva a partir de daños ocasionados por causas humanas o naturales.

Una desventaja de la metodología InSAR es el tamaño del archivo de cada imagen (aproximadamente 7 GB sin comprimir), por lo que se requiere de equipo de cómputo con características especiales capaz de realizar el procesamiento de las imágenes y en poco tiempo. Adicionalmente, se necesita personal capacitado para desarrollar los estudios. Sin embargo, son más las ventajas de su aplicación, por ejemplo, la gran cantidad superficie que se puede analizar, la capacidad para detectar cambios en las velocidades de desplazamiento del terreno del orden de milímetros por año, imágenes y software de acceso libre, acceso a la información sin ir a la zona de estudio y la habilidad para estudiar varios elementos al mismo tiempo de la infraestructura carretera. Por todos estos factores, se puede plantear que la metodología InSAR es una alternativa para el monitoreo de la infraestructura carretera de manera global.



## Bibliografía

---

[1] Juan Antonio Quintana Rodríguez, Francisco Javier Carrión Viramontes, Saúl Enrique Crespo Sánchez, Daniel Rodríguez Naranjo, Luis Álvaro Martínez Trujano, Héctor Miguel Gasca Zamora, Daniel Arceo Mariñelarena; Andrés Hernández Guzmán, Jorge Hernández Figueroa, "*Estrategias de evaluación y análisis del monitoreo del puente Río Papaloapan*", Publicación Técnica 441, Sanfandila, Qro., 2015.

[2] Luis Álvaro Martínez Trujano, Juan Antonio Quintana Rodríguez, Benjamín Arroyo Ramírez, Francisco Javier Carrión Viramontes, Saúl Enrique Crespo Sánchez, Jorge Alberto Hernández Figueroa, Víctor Manuel Bonilla Ureña, Héctor Miguel Gasca Zamora, Guzmán Andrés Hernández, "*Sistema inteligente y protocolos de actuación para monitoreo remoto de puentes*", Publicación Técnica 464, Sanfandila, Qro., 2016

[3] Juan Antonio Quintana Rodríguez, Francisco Javier Carrión Viramontes, Saúl Enrique Crespo Sánchez, Víctor Manuel Bonilla Ureña, Paul Garnica Anguas, José Alfonso Perez Salazar, "*SHM and evaluation of a continuous reinforced concrete pavement*", Journal of Civil Structural Health Monitoring (2016) 6:681–689.

[4] Francisco Javier Carrión Viramontes, José Ricardo Hernández Jiménez, Jorge Terán Guillén, "Estudio experimental de un puente atirantado-evaluación de cables", Publicación Técnica 265, Sanfandila, Qro., 2016.

[5] Instituto Nacional de Estadística y geografía:  
[http://cuentame.inegi.org.mx/mapas/pdf/nacional/tematicos/zonas\\_sismicas.pdf](http://cuentame.inegi.org.mx/mapas/pdf/nacional/tematicos/zonas_sismicas.pdf)

[6] Miguel Anaya Díaz, Juan Antonio Quintana Rodríguez, Francisco Javier Carrión Viramontes, Álvaro Martínez Trujano, Jorge Alberto Hernández Figueroa, Héctor Miguel Gasca Zamora, Jesús Iván Valenzuela Delgado, Mario Montes Zea, "Calibración y ajuste de los parámetros estructurales del modelo matemático del Puente Mezcala para evaluación estructural", Publicación Técnica 538, Sanfandila, Qro., 2018.

[7] Juan Antonio Quintana Rodríguez, Francisco Javier Carrión Viramontes, Álvaro Martínez Trujano, Miguel Anaya Díaz, Jorge Alberto Hernández Figueroa, Héctor Miguel Gasca Zamora, Jesús Iván Valenzuela Delgado, Andrés Hernández Guzmán, "Actualización y seguimiento de los índices de desempeño estructural del puente Río Papaloapan", Publicación Técnica 524, Sanfandila, Qro., 2018.

[8] Aeronáutica Nacional y Administración Espacial:  
<https://nisar.jpl.nasa.gov/applications/>

- [9] Agencia Espacial Europea: <http://www.esa.int>
- [10] Aeronáutica Nacional y Administración Espacial:  
<https://eospsso.nasa.gov/missions/european-remote-sensing>
- [11] Sousa, J. J., & Bastos, L. (2013). Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(3), 659-667.
- [12] Roccheggiani, M., Piacentini, D., Tirincanti, E., Perissin, D., & Menichetti, M. (2019). Detection and monitoring of tunneling induced ground movements using Sentinel-1 SAR Interferometry. *Remote Sensing*, 11(6), 639.
- [13] Acton, S. (2015). *Sinkhole detection, landslide and bridge monitoring for transportation infrastructure by automated analysis of interferometric synthetic aperture radar imagery* (No. RITARS-11-H-UVA). United States. Dept. of Transportation. Research and Innovative Technology Administration.
- [14] González Méndez, P. J. (2010). Medida y caracterización de deformaciones usando técnicas geodésicas y de teledetección. Aplicación en volcanología y sismotectónica.
- [15] Ferretti, A. (2014). *Satellite InSAR data: reservoir monitoring from space*. EAGE publications.
- [16] Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., & Massonet, D. (2007). InSAR Principles-Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation, TM-19. *The Netherlands: ESA Publications*.
- [17] Flores-Anderson, A. I., Herndon, K. E., Thapa, R. B., & Cherrington, E. (2019). The SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation.
- [18] Unavco:  
[https://www.unavco.org/education/professional-development/short-courses/2018/insar-training-gsa/04\\_insar\\_errors\\_and\\_noise.pdf](https://www.unavco.org/education/professional-development/short-courses/2018/insar-training-gsa/04_insar_errors_and_noise.pdf).
- [19] Franz J. Meyer. (2018). Sentinel-1 InSAR processing using the Sentinel-1 Toolbox. Alaska Satellite Facility.
- [20] Luis Veci. (2016). TOPS Interferometry Tutorial. <http://step.esa.int>.
- [21] Agencia Espacial Europea:  
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/overview>
- [22] Aeronáutica Nacional y Administración Espacial:

<https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/disasters/SAR-17/Session2-SAR-Spanish.pdf>.

[23] Agencia Espacial Europea:  
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/instrument-payload>.

[24] Agencia Espacial Europea:  
<https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>.

[25] Agencia Espacial Europea:  
<https://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/snaphu/>

[26] Agencia Espacial Europea:  
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/observation-scenario/acquisition-segments>

[27] Agencia Espacial Europea:  
<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

[28] Devanthery, N., Crosetto, M., Cuevas-González, M., Monserrat, O., Barra, A., & Crippa, B. (2016). Deformation monitoring using Persistent Scatterer Interferometry and Sentinel-1 SAR data. *Procedia Computer Science*, 100, 1121-1126.

[29] Bozzano, F., Cipriani, I., Mazzanti, P., & Prestininzi, A. (2011). Displacement patterns of a landslide affected by human activities: insights from ground-based InSAR monitoring. *Natural hazards*, 59(3), 1377-1396.

[30] Roccheggiani, M., Piacentini, D., Tirincanti, E., Perissin, D., & Menichetti, M. (2019). Detection and monitoring of tunneling induced ground movements using Sentinel-1 SAR Interferometry. *Remote Sensing*, 11(6), 639.

[31] Lazecky, M., Perissin, D., Bakon, M., de Sousa, J. M., Hlavacova, I., & Real, N. (2015, March). Potential of satellite InSAR techniques for monitoring of bridge deformations. In *2015 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)* (pp. 1-4). IEEE.

[32] Foroughnia, F., Nemati, S., Maghsoudi, Y., & Perissin, D. (2019). An iterative PS-InSAR method for the analysis of large spatio-temporal baseline data stacks for land subsidence estimation. *International Journal Of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74, 248-258.

[33] Ciampalini, A., Bardi, F., Bianchini, S., Frodella, W., Del Ventisette, C., Moretti, S., & Casagli, N. (2014). Analysis of building deformation in landslide area using multisensor PSInSAR™ technique. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, 166-180.

- [34] Selvakumaran, S., Webb, G. T., Bennetts, J., Middleton, C. R., & Rossi, C. (2019). Waterloo Bridge Monitoring: Comparing Measurements from Earth and Space. In *International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC) Driving data-informed decision-making* (pp. 639-648). ICE Publishing.
- [35] Milillo, P., Giardina, G., Perissin, D., Milillo, G., Coletta, A., & Terranova, C. (2019). Pre-Collapse Space Geodetic Observations of Critical Infrastructure: The Morandi Bridge, Genoa, Italy. *Remote Sensing*, 11(12), 1403.
- [36] Sousa, J. J., & Bastos, L. (2013). Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(3), 659-667.
- [37] Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., & Arıkan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514, 1-13.



# Anexo

**Tabla A.1. Inventario de misiones satelitales SAR.**

Sensor	Tiempo de vida	Longitud de onda	Resolución	Tamaño del cuadro	Ciclo de repetición	Acceso
Seasat	1978	Banda L ( $\lambda=24.6$ cm)	Az: 25 m Rg: 25 m	100km	---	Libre
ERS-1	1991-2001	Banda C ( $\lambda=5.6$ cm)	Az: 6.3 m Rg: 26 m	100km	35 días	Restringido
JERS-1	1995-1998	Banda L ( $\lambda=24.6$ cm)	Az: 18 m Rg: 18 m	75km	44 días	Restringido
ERS-2	1995-2011	Banda C ( $\lambda=5.6$ cm)	Az: 6.3 m Rg: 26 m	100km	35 días	Restringido
ENVISAT	2002-2012	Banda C ( $\lambda=5.6$ cm)	Az: 28 m Rg: 28 m	100km	35 días	Restringido
ALOS-1	2006-2011	Banda L ( $\lambda=24.6$ cm)	FBS: 10x10m FBD: 20x10m PLR: 30x10m ScanSAR: 100m	FBS: 70km FBD: 70km PLR: 30km ScanSAR: 250-350km	46 días	Libre
Radarsat-1	1995-2013	Banda C ( $\lambda=5.6$ cm)	Standard: 25x28m Fine: 9x9m Wide 1: 35x28m Wide 2: 35x28m ScanSAR: 50x50-100x100m	Standard: 100km Fine: 45km Wide 1: 165km Wide 2: 150km ScanSAR: 305-510km	24 días	1995-2008: Restringido 2008-2013. comercial
TerraSAR-X TanDEM-X	2007- 2010-	Banda X ( $\lambda=3.5$ cm)	Spotlight: 0.2x1.0-1.7x3.5m Stripmap: 3x3m ScanSAR: 18-40m	Spotlight: 3-10km Stripmap: 50x30km ScanSAR: 150x100-200x200km	11 días	Dependiente de aplicación; restringido para el uso científico, comercial
Radarsat-2	2007-	Banda C ( $\lambda=5.6$ cm)	Spotlight: ~1.5m Stripmap: ~3x3-25x25m ScanSAR: 3 5x35-100x100m	Spotlight: 18x8km Stripmap: 20-170m ScanSAR: 300x300-500x500km	24 días	Comercial
COSMO-SkyMed	2007-	Banda X ( $\lambda=3.5$ cm)	Spotlight: $\leq 1$ m Stripmap: 3-15m ScanSAR: 30-100m	Spotlight: 10x10km Stripmap: 40x40km ScanSAR: 100x100 - 200x200km	Satélite: 16 días Constelación: ~hrs	Comercial; limitado a propuestas científicas
ALOS-2 PALSAR-2	2014-	Banda L ( $\lambda=24.6$ cm)	Spotlight: 1x3m Stripmap: 3-10m ScanSAR: 25-100m	Spotlight: 25x25km Stripmap: 55x70-70x70km ScanSAR: 355x355km	14 días	Comercial; limitado a propuestas científicas
Sentinel-1	2014-	Banda C ( $\lambda=5.6$ cm)	Stripmap: 5x5m Interferometric Wide Swath (IW): 5x20m Extra Wide Swath (EW): 20-40m	Stripmap: 375km IW: 250km EW: 400km	Satélite: 12 días Constelación: 6 días	Libre
SAOCOM	2018-	Banda L ( $\lambda=24.6$ cm)	Stripmap: 10x10m TopSAR: 100x100m	Stripmap: >65km TopSAR: 320km	Satélite: 16 días Constelación: 8 días	TBD
PAZ SAR	2018-	Banda X ( $\lambda=3.5$ cm)	See TerraSAR/TanDEM-x	See TerraSAR/TanDEM-x	11 días	Comercial
RCM	2019	Banda C ( $\lambda=5.6$ cm)	Very high, high, medium, and low-res modes (3-100m)	20x20-500x500km	Satélite: 12 días Constelación: ~hrs	TBD
NISAR	2021	Banda L ( $\lambda=24.6$ cm)	3-20m (mode dependent)	250km	12 días	Libre
BIOMASS	2021	P-band $\lambda = 70.0$ cm	$\leq 60$ x50m	160km	17 días	Libre
TanDEM-L	2023	Banda L ( $\lambda=24.6$ cm)	12x12m	350km	Satélite: 16 días Constelación: 8 días	Libre

**Tabla A.2. Acceso a los datos de las misiones SAR [17].**

<b>Misión</b>	<b>Región</b>	<b>Acceso a los datos</b>	<b>Requerimientos</b>
Seasat	Global	ASF Vertex	Único registro
ERS-1 y 2, ENVISAT	Global Estaciones ASF (solamente ERS)	ESA Simple Online Catalogue ASF Vertex	Propuesta Único registro
ALOS-1 PALSAR	América/Antártica Europa/África/Groenlandia Asia Australia/Oceanía	ASF Vertex ALOS PALSAR On-The-Fly AUIG2 Desconocido	Único registro Propuesta Propuesta Desconocido
Sentinel-1	Global	ASF Vertex ESA's Copernicus Open Access Hub	Único registro
AIRSAR, UAVSAR	Limitado	ASF Vertex	Único registro
AirMOSS	Limitado	ORNL DAAC	Único registro
ALOS-2 PALSAR-2	Global	Comercial: PASCO Científico: AUIG2	Lista de precios Propuesta a JAXA
Radarsat-1&2	Global América del norte	Comercial: MDAASF Vertex Científico: ASF Vertex	MDA Lista de precios Propuesta a NASA
COSMOSkyMed	Global	Comercial: e-goes Científico: ASI	e-goes Lista de precios Propuesta a ASI
TerraSAR-X, TanDEM-X	Global	Comercial: Airbus Científico (costo reducido): TSX / TDXHub Datos archivados (free): TSX	Airbus Lista de precios Propuesta a DLR (TSX / TDX)  Propuesta a DLR



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado-Galindo”  
Parque Tecnológico San Fandila  
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México  
CP 76703  
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610  
Fax +52 (442) 216 9671

[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)

<http://www.imt.mx/>