



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

PRUEBAS CONTROLADAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA METODOLOGÍA PSInSAR

Germán Michel Guzmán Acevedo
Juan Antonio Quintana Rodríguez
Héctor Miguel Gasca Zamora
Francisco Javier Carrión Viramontes
Mario Alberto Montes Zea
Luis Álvaro Martínez Trujano
Jorge Alberto Hernández Figueroa
José Manuel Machorro López
Miguel Anaya Díaz
Andrés Hernández Guzmán

Publicación Técnica No. 666
Sanfandila, Qro.
2021

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por Germán Michel Guzmán Acevedo, Juan Antonio Quintana Rodríguez, Héctor Miguel Gasca Zamora, Francisco Javier Carrión Viramontes, Mario Alberto Montes Zea, Luis Álvaro Martínez Trujano, Jorge Alberto Hernández Figueroa, Miguel Anaya Díaz y José Manuel Machorro López, Andrés Hernández Guzmán.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna EI 07/21 "Pruebas controladas para la evaluación de la metodología PSInSAR".

Se agradece el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) para hacer posible esta investigación a través del Programa "Cátedras CONACYT" Proyecto No. 34/2018, y la colaboración de Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes, Jefe de la División de Laboratorios de Desempeño Vehicular y de Materiales del Instituto Mexicano del Transporte.

Contenido

	Página
Índice de figuras	iii
Índice de tablas	v
Sinopsis.....	vii
Abstract	ix
Resumen ejecutivo.....	xi
1. Introducción.....	1
2. Conceptos de PSInSAR	5
2.1 InSAR.....	5
2.2 Coherencia.....	5
2.3 DInSAR	6
2.4 PSInSAR.....	6
2.4.1 Preparación de los datos	6
2.4.2 Análisis preliminar.....	6
2.4.3 Estimación de APS	7
2.4.4 Procesamiento PS de múltiples imágenes	7
3. Metodología	9
3.1 Recolección de imágenes SAR.....	9
3.2 Obtención de software	9
3.3 Creación de las esquinas reflejantes.....	9
3.4 Instalación y orientación de la antena reflejante	11
3.5 Determinar la antena reflejante como un punto persistente	12
3.6 Cambios de posición vertical de la antena reflejante	19

3.7	Cambios de posición horizontal de la antena reflejante	19
3.8	Condiciones que presenta el puente Mezcala.....	20
4.	Resultados	21
4.1	Procesamiento con datos del puente Mezcala.....	21
4.2	Estabilidad de la antena reflejante	24
4.3	Validación de PSInSAR con antena reflejante	25
5.	Conclusiones.....	27
6.	Trabajo futuro.....	29
	Bibliografía	31

Índice de figuras

	Página
Figura 1.1 Resultado del estudio en WestPoint Bridges, Virginia [3].....	1
Figura 1.2 Diseño de esquina reflejante empleada por la empresa Tre Altamira [5].	2
Figura 3.1 Antena reflejante previamente a ser instalada.	11
Figura 3.2 Imagen 12/06/2021.	13
Figura 3.3 Imagen 18/06/2021.	13
Figura 3.4 Imagen 24/06/2021.	13
Figura 3.5 Imagen 30/06/2021.	14
Figura 3.6 Imagen 06/07/2021.	14
Figura 3.7 Imagen 12/07/2021.	14
Figura 3.8 Imagen 18/07/2021.	15
Figura 3.9 Imagen 24/07/2021.	15
Figura 3.10 Imagen 30/07/2021.	15
Figura 3.11 Imagen 05/08/2021.	16
Figura 3.12 Imagen 17/08/2021.	16
Figura 3.13 Imagen 23/08/2021.	16
Figura 3.14 Imagen 29/08/2021.	17
Figura 3.15 Imagen 04/09/2021.	17
Figura 3.16 Imagen 10/09/2021.	17

Figura 3.17 Imagen 16/09/2021.	18
Figura 3.18 Imagen 22/09/2021	18
Figura 3.19 Imagen 28/09/2021.	18
Figura 4.1 Histograma de amplitud del punto de referencia.	21
Figura 4.2 Ubicación, línea base, línea base temporal del punto de referencia. ...	22
Figura 4.3 Puntos reflejantes del puente Mezcala.....	22
Figura 4.4 RCS de puntos reflejantes del puente Mezcala.	23
Figura 4.5 Ejemplo de desplazamiento no lineal de unos de los puntos reflejantes.	23
Figura 4.6 Estabilidad de antena reflejantes.	24
Figura 4.7 Comportamiento de la antena reflejante durante su estabilización.	24
Figura 4.8 Comparación desplazamiento real y el medido por PSInSAR (1).	25
Figura 4.9 Error de las mediciones PSInSAR primer procesamiento.	25
Figura 4.10 Comparación desplazamiento real y el medido por PSInSAR (2).	26
Figura 4.11 Error de las mediciones PSInSAR segundo procesamiento.	26

Índice de tablas

	Página
Tabla 3.1 Características de la imagen IWS de Sentinel-1.	10
Tabla 3.2 Imágenes utilizadas en la primera etapa de la metodología.....	12
Tabla 3.3 Cronología de desplazamientos verticales en la antena.	19

Sinopsis

Esta investigación propone aplicar la metodología PS (*Permanent scatterer*) InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) en un experimento controlado, utilizando una antena reflejante, con el objetivo de evaluar la sensibilidad de la metodología PSInSAR y determinar la factibilidad de su implementación en el monitoreo del desplazamiento que puede presentarse en los elementos estructurales de los puentes, posteriores a accidentes o eventos naturales tales como; sismos, lluvias torrenciales o fuertes ráfagas de viento. Las imágenes SAR (*Synthetic Aperture Radar*) empleadas provienen de la misión libre Sentinel-1 propiedad de la agencia espacial europea, mientras que el software usado es el denominado SARPROZ (*SAR PROcessing tool by perIZ*) (versión de prueba). Adicional a la prueba experimental, se determinaron las características reflejantes del puente Mezcala Solidaridad a partir del mismo procesamiento (PSInSAR). Para este caso, se realizó el análisis de 43 imágenes en dirección ascendente, con lo cual, se cubrió el periodo desde el primero de enero de 2021 hasta el dieciséis de septiembre del mismo año. Los resultados en ambos procesamientos son favorables, sin embargo, para aplicar la metodología InSAR en el monitoreo estructural de la infraestructura carretera de México es necesario el desarrollo de un programa para el análisis de las imágenes.

Abstract

This research proposes the application of PS (Permanent scatterer) InSAR (Interferometric SAR) in a trial using an artificial corner reflector to evaluate its capabilities for monitoring different kinds of bridge displacements produced by earthquakes, torrential rains, or strong gusts of wind. The employed SAR (Synthetic Aperture Radar) images are provided by the Sentinel-1 satellite mission, which is the propriety of the European Space Agency; while, the used software is the denominated SARPROZ (SAR PROcessing tool by periZ) (free trial). Additionally, another objective is to determine the reflectivity abilities of Mezcala Bridge; in this case, the analysis employed 43 SAR images (ascending direction), covering the period, from January 1, 2021, to September 16, 2021. The results in both cases are favorable; hence, it is worthy to develop an InSAR software or test a free access one to apply it for bridge monitoring in the Mexican highway infrastructure.

Resumen ejecutivo

InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) es una metodología que permite calcular la diferencia de fase entre dos o más imágenes SAR (*Synthetic Aperture Radar*) de una misma zona, pero obtenidas en diferentes periodos de tiempo con el propósito de determinar la topografía y/o deformación del terreno u otros elementos de interés. En los últimos años la tecnología SAR ha tenido un gran crecimiento en el procesamiento de señales para determinar desplazamientos en superficies. Sin embargo, uno de los logros más notorios fue realizado en la universidad politécnica de Milán, ya que se generó la técnica PS (*Permanent scatterer*) InSAR.

La metodología PSInSAR es capaz de reducir los efectos que minimizan la precisión de InSAR (topografía, curvatura de la tierra, retraso atmosférico y ruido) y proporcionar series de tiempo confiables a partir de imágenes SAR. La metodología requiere que los objetos a estudiar no presentan cambios en su firma espectral en todos los interferogramas empleados, por lo que, las construcciones son capaces de cumplir esta exigencia, lo cual la hace idónea para el monitoreo de estructuras.

El presente estudio tiene como objetivo desarrollar pruebas controladas de validación a la metodología PSInSAR dentro del instituto Mexicano del Transporte en el estado de Querétaro, con la finalidad de aplicar en un futuro cercano los resultados de la investigación para la evaluación de la integridad de estructuras pertenecientes a la infraestructura carretera del país. Por otro lado, los objetivos particulares son:

- Efectuar el procesamiento PSInSAR para establecer si existen puntos persistentes en el puente Mezcala o se necesita de antenas reflejantes para tener información de su comportamiento.
- Crear una antena reflejante con las dimensiones y geometría adecuada para ser apreciada en una imagen de la misión Sentinel-1.
- Instalar y orientar la antena para reflejar la señal electromagnética emitida por los satélites de la misión Sentinel-1.
- Procesar un conjunto mínimo de 15 imágenes donde se ubique la antena reflejante para determinar si es considerado como un punto persistente.
- Cambiar la posición de la antena al nivel de centímetro o milímetro.
- Comparar los resultados arrojados por el procesamiento PSInSAR de los cambios producidos en la antena y los reales.

Los resultados indican que PSInSAR es una herramienta adecuada para analizar el comportamiento de algunas zonas de interés en los puentes que conforman la infraestructura carretera de México. En el caso del puente Mezcala se encontraron 9 puntos reflejantes naturales, lo cual permite evaluar el comportamiento histórico

de la estructura y analizar su tendencia continuamente.

Este trabajo se divide en cinco capítulos, el primero hace énfasis en la motivación para desarrollar la investigación, así como los objetivos del trabajo; el segundo capítulo define algunos conceptos de PSInSAR; en el tercer capítulo, se describe la metodología que se siguió para diseñar la antena reflejante, su instalación y los experimentos; en el cuarto capítulo, se analizan los resultados de los interferogramas obtenidos para estudiar los cambios del puente Mezcala y la antena reflejante; finalmente se presentan las conclusiones obtenidas de la investigación.

1. Introducción

InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) es una metodología que permite calcular la diferencia de fase entre dos o más imágenes SAR (*Synthetic Aperture Radar*) de una misma zona, pero obtenidas en diferentes periodos de tiempo con el propósito de determinar la topografía y/o deformación del terreno u de otros elementos de interés [1]. En los últimos años la tecnología SAR ha tenido un gran crecimiento en el procesamiento de señales para determinar desplazamientos en superficies; sin embargo, uno de los logros más notorios fue realizado en la universidad politécnica de Milán, ya que se generó la técnica PS (*Permanent scatterer*) InSAR [2]. Esta técnica consiste en analizar varias imágenes SAR para identificar posibles objetivos a seguir que no cambien su firma electromagnética en todo el conjunto de datos. La obtención de desplazamiento a lo largo del tiempo es llevada a cabo con el análisis de un arreglo de puntos PS [3]. La figura 1.1 muestra el resultado de aplicar la técnica PSInSAR a dos puentes con imágenes obtenidas de la misión TerraSAR-X y usando el software SqueeSAR [3].

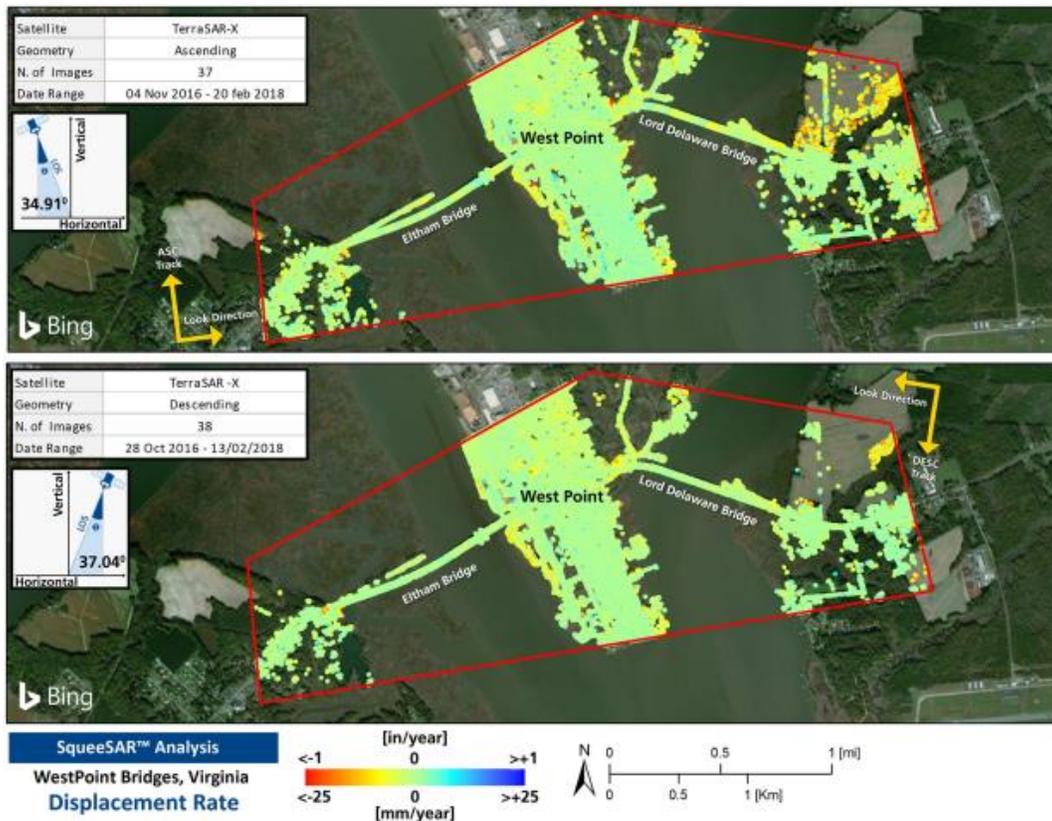


Figura 1.1 Resultado del estudio en WestPoint Bridges, Virginia [3]

PSInSAR es capaz de reducir los efectos que minimizan la precisión de InSAR (topografía, curvatura de la tierra, retraso atmosférico y ruido) y proporcionar series en el tiempo confiables a partir de imágenes SAR. La metodología requiere que los objetos a estudiar no presenten cambios en su firma espectral en todos los interferogramas empleados [4], por lo que, principalmente los elementos construidos por el hombre satisfacen la exigencia, lo cual la hace idónea para monitorear estructuras. En el caso de que un elemento específico se quiera estudiar y no cumpla con el principio de PSInSAR, se puede analizar implementando antenas reflejantes. La figura 1.2 presenta un diseño de antena reflejante empleada por la empresa Tre Altamira [5].

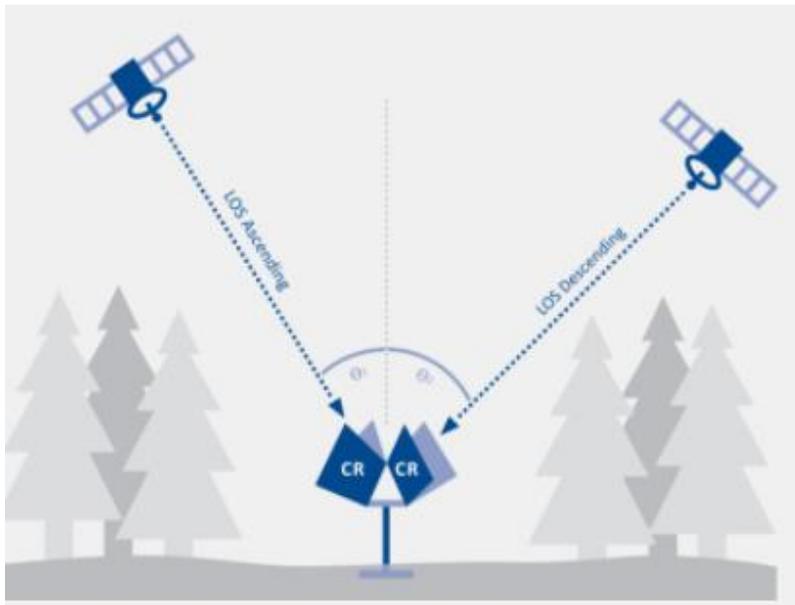


Figura 1.2 Diseño de esquina reflejante empleada por la empresa Tre Altamira [5]

PSInSAR ha sido validada en algunos experimentos de campo con antenas reflejantes para el monitoreo de deformaciones en la superficie terrestre alcanzando una precisión incluso sub-milimétrica [3]. De igual manera, el presente estudio propone como objetivo desarrollar pruebas controladas de validación a la metodología PSInSAR dentro del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), pero con la diferencia de aplicar en un futuro cercano los resultados de la investigación sobre el estudio de algunas componentes estructurales de interés en puentes de la infraestructura carretera del país. Los beneficios de InSAR se deben principalmente a que es un sistema activo, por lo cual se puede obtener información de día o noche y en cualquier parte de la superficie terrestre, además, de acuerdo con la literatura científica, se puede precisar que la metodología InSAR es una herramienta eficiente en las siguientes áreas [6-19]:

- Caracterización de áreas aledañas de derrumbes y taludes inestables.
- Monitoreo de estructuras lineales.
- Análisis de la estabilidad de estructuras.

- Verificación de daños causados a construcciones por causas humanas o naturales.

Por otro lado, a continuación, se resumen los objetivos planteados para desarrollar en la presente investigación, esta información es importante ya que a partir de ella se definirán los conceptos teóricos necesarios para aplicar la metodología en infraestructura carretera, se explicarán los requisitos técnicos que se deben cumplir, el procesamiento de datos y los resultados finales:

- Efectuar el procesamiento PSInSAR para establecer si existen puntos persistentes en el puente Mezcala o se requiere de antenas reflejantes para tener información de su comportamiento.
- Crear una antena reflejante con las dimensiones y geometría adecuada para ser apreciada en una imagen de la misión Sentinel-1.
- Instalar y orientar la antena para reflejar la señal electromagnética emitida por los satélites de la misión Sentinel-1.
- Procesar un conjunto mínimo de 15 imágenes donde se presenta la antena reflejante para determinar si es considerado como un punto persistente.
- Cambiar la posición de la antena al nivel de centímetro o milímetro.
- Comparar los resultados arrojados por el procesamiento PSInSAR de los cambios producidos en la antena y los reales.

2. Conceptos de PSInSAR

En el caso de requerir más información o de profundizar en un tema en particular, todos los conceptos descritos en este capítulo provienen de los artículos donde se definen las bases teóricas de InSAR [20-26].

2.1 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. El interferograma 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 un interferograma [20]. La diferencia de fase es afectada por otras fuentes de error que se deben de eliminar como lo indica la ecuación 2.1 [21].

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{flat} + \Delta\varphi_{elevación} + \Delta\varphi_{desplazamiento} + \Delta\varphi_{atmósfera} + \Delta\varphi_{ruido} \quad (2.1)$$

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. En cuestiones de desplazamiento, la fase del interferograma es altamente sensible a estos cambios, por ejemplo, un movimiento con magnitud igual a la mitad de la longitud de onda se representa con una rotación de 2π en la fase [4].

2.2 Coherencia

Para cuantificar el impacto que tienen las fuentes que producen pérdida de correlación entre las imágenes utilizadas en el procesamiento, se emplea el termino de coherencia, el cual se define en el rango de cero a uno [4]. 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 [21].

$$\gamma = \gamma_T * \gamma_G * \gamma_V * \gamma_P \quad (2.2)$$

Donde γ_T es el efecto temporal, γ_G efecto geométrico, γ_V es el efecto volumétrico y γ_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 eludido y el efecto geométrico parcialmente eliminado [20].

2.3 DInSAR

DInSAR (*Differential InSAR*) es una técnica interferométrica donde se busca eliminar los efectos causados a la diferencia de fase por la curvatura de la tierra ($\Delta\phi_{flat}$) y topografía ($\Delta\phi_{elevación}$); el objetivo es aislar la contribución de la fase por desplazamientos de objetos y/o terreno natural ($\Delta\phi_{desplazamiento}$). Sin embargo, los términos agregados a la diferencia de fase por la atmósfera y ruido se tienen que resolver con una técnica más robusta como PSInSAR [22]. La secuencia de instrucciones necesarias para desarrollar la técnica DInSAR para un par de imágenes SAR se describen detalladamente en la publicación técnica del IMT No. 593 [23].

2.4 PSInSAR

Debido a que DInSAR es afectado por los efectos de la atmósfera, fue necesario el desarrollo de otras metodologías, lo cual llevó a la creación del método de dispersadores permanentes o persistentes InSAR (PSInSAR, por sus siglas en inglés). La metodología PSInSAR utiliza varios interferogramas basados en un conjunto de por lo menos 15 imágenes, detecta píxeles con una reflectividad estable a través de todas las imágenes [3], posteriormente, se efectúan correcciones sobre estos píxeles de los efectos atmosféricos para determinar el desplazamiento histórico de cada uno, permitiendo la detección de movimiento lineal y no lineal [24].

Los pasos necesarios para llevar a cabo el proceso PSInSAR son [22]: 1) preparación de los datos; 2) análisis preliminar; 3) estimación de APS (*Atmospheric Phase Screen*); 4) procesamiento PS de múltiples-imágenes.

2.4.1 Preparación de los datos

La preparación de los datos varía de acuerdo con el software implementado, en el caso de la presente investigación se utiliza el denominado SARPROZ (*SAR PROcessing tool by perIZ*) [4]; por lo que, las imágenes tienen que ser importadas, se debe definir el tipo de conectividad entre las imágenes a partir de una gráfica, delimitar la zona de interés con coordenadas geodésicas, seleccionar la imagen maestra y co-registrar cada una de las imágenes esclavas con respecto a ella.

2.4.2 Análisis preliminar

La segunda etapa del procesamiento consiste en seleccionar los candidatos PS a través de la metodología de dispersión de amplitud, la cual consiste en evaluar la amplitud de los elementos reflejantes a través del tiempo. La razón entre la desviación estándar y el valor medio es definida como la dispersión de amplitud (ecuación 2.4) [25].

$$DA = \sigma A / \mu A \quad (2.4)$$

Donde DA es el valor de dispersión de amplitud, σA es la desviación estándar y μ su valor medio. Posteriormente, considerando los candidatos PS seleccionados, se calculan los valores del Modelo Digital de Elevaciones y las velocidades de deformación a través de cálculos iterativos [25].

2.4.3 Estimación de APS

Debido a que el conjunto de interferogramas es generado a partir de una misma imagen maestra, todos son afectados por la misma contribución atmosférica ocasionado por la imagen maestra, la cual puede ser estimada por el promedio de los residuos. Los residuos son calculados para cada pixel a partir de una red espacial de dos dimensiones formada por los puntos PS y después de que los efectos ocasionados en la fase por la topografía y deformación son removidos. Una vez que el efecto atmosférico en la fase ocasionada en cada punto PS por la imagen maestra es conocido, se aplica un filtro pasa bajas y el operador Kriging con el objetivo de calcular el valor de APS de la adquisición maestra. El valor de APS para las demás imágenes se puede calcular de la misma manera, permitiendo calcular la contribución atmosférica de la fase en todos los interferogramas [25].

2.4.4 Procesamiento PS de múltiples imágenes

Después de la estimación de APS, se efectúa una segunda selección menos estricta de puntos PS para llevar a cabo otro proceso con los mismos parámetros, punto de referencia, pero con el valor de APS removido. Para finalizar, el conjunto de PS se geo-codifica y exporta para tener una mejor visualización en alguna plataforma o software, como Google Earth y ArcGis [22].

3. Metodología

Los objetivos principales de este trabajo de investigación son desarrollar un experimento controlado utilizando una antena reflejante, y la determinación de las condiciones del puente Mezcala para ser analizados por medio de PSInSAR. Los pasos necesarios para desarrollar el estudio se presentan en las siguientes secciones desde la descarga de las imágenes hasta el diseño experimental para desplazar la antena.

3.1 Recolección de imágenes SAR

Las imágenes satelitales utilizadas en la presente investigación provienen de la misión Sentinel-1, la cual es propiedad de la Agencia Espacial Europea, se compone de dos satélites, denominados A y B, ambos elementos viajan por el mismo plano orbital con 6 días de diferencia en la misma dirección (ascendente o descendente), y la información que proporciona es gratuita. Las imágenes de interés son las que cubren el área del IMT/Puente Mezcala y que sean de tipo SLC (*Single Look Complex*), IW (*Interferometric Wide beam mode*), VV+VH *polarization*. Las imágenes SAR son obtenidas en la plataforma Vertex (<https://search.asf.alaska.edu/>) de la *Alaska Satellite Facility* (Universidad de Alaska Fairbanks) creando una cuenta sin costo en Earthdata Login (<https://urs.earthdata.nasa.gov/users/new>). El análisis de la información consideró trabajar con imágenes capturas en una sola dirección para tener mayor control en el desarrollo de la experimentación, reducir a la mitad la cantidad de imágenes SAR y tener un diseño de la antena reflejante que se pueda aplicar fácilmente en cualquier otro estudio.

3.2 Obtención de software

Para llevar a cabo el procesamiento de imágenes SAR con la metodología PSInSAR se utilizó una versión de prueba de SARPROZ; la solicitud del software se realizó a través de la página web oficial de SARPROZ (<https://www.sarproz.com/application-form/>) al llenar un formato con datos personales, el tipo de software que se requiere y definir el área de aplicación.

3.3 Creación de las esquinas reflejantes

Los objetos que son más aptos para ser estudiados por PSInSAR son las estructuras de ingeniería civil debido a su capacidad de reflejar la señal que emite el satélite SAR, sin embargo, el problema que se presenta al implementar la metodología es que el elemento que se estudia se localiza dentro de un píxel con ciertas dimensiones dependiendo de la misión satelital, lo que significa, que la fase

del píxel donde se ubica nuestro objeto de interés es también producto de otros elementos, por lo que, nuestro objeto debe de ser el reflectante dominante. Es importante mencionar que entre más pequeño sea el píxel de la imagen, mayor será el número de puntos a los cuales se les puede dar seguimiento en el estudio, no obstante, el costo de las imágenes se incrementa.

En este trabajo de investigación se implementan las imágenes de la misión Sentinel-1 que tienen una resolución espacial de 5x20 metros y una longitud de onda de 5.6 centímetros (banda “C”), por lo tanto, no se puede obtener un estudio de un puente con alta resolución como al usar datos de otras misiones satelitales como TerraSAR-X (resolución de 3x3 metros y longitud de onda de 3.1 centímetros). En este caso, es necesario implementar antenas reflejantes que permitan a un punto de interés ser el reflejante predominante. La antena reflejante se tiene que diseñar a partir de los datos de imágenes provenientes de Sentinel-1 que se presentan en la tabla 3.1 [26].

Tabla 3.1 Características de la imagen IWS de Sentinel-1

Modo de imagen	Resolución Azimutal (m)	Resolución Rango Inclinado (m)	Resolución Rango terrestre (m)	Rango terrestre Resolución área (m2)	Ruido de fondo (dB)
Interferometric Wide Swath	20.0	5.0	8.7	174.3	-12

Al determinar la dimensión de la antena, es necesario considerar el error efectivo de la fase, el cual puede ser estimado con la ecuación 3.1 [27-29]:

$$\varphi_{err} = \frac{1}{\sqrt{2*SCR}} \quad 3.1$$

Donde *SCR* (*signal to clutter ratio*) es la razón entre la señal y el ruido de fondo ($SCR = \text{radarcrosssectionTarget}/\text{radarcrosssectionBackground}$). La estimación del error de fase se puede convertir a errores de desplazamiento en la línea de vista usando la longitud de onda de la señal (λ) [26]:

$$d_{err} = \frac{\varphi_{err} \times \lambda}{4\pi} \quad 3.2$$

Estableciendo un error de 0.1 milímetros el valor de *SCR* se puede determinar con la ecuación 3.3, la cual relaciona las ecuaciones 3.1 y 3.2:

$$SCR = \frac{\left(\frac{\lambda}{0.0001 \times 4\pi}\right)^2}{2} \quad 3.3$$

El resultado señala que el valor de *SCR* debe ser aproximadamente igual a 30 dB, por lo tanto, el valor de *RCS* (*radar cross section*) de la antena se va a calcular basado en la siguiente ecuación (3.4) [30]:

$$SCR = RCS - (10 \log(A) + Clutter) \quad 3.4$$

Donde A es el área del píxel (174.3 m²), $Clutter$ es el ruido de fondo (-12) y SCR es igual a 30 dB. El resultado indica que la antena debe generar un RCS igual o mayor a 40.4 dBm². El valor de RCS de la antena depende de su geometría y tamaño, en este caso, se utilizará un tetraedro cuadrado por su alto valor de RCS y fácil construcción. El máximo valor de RCS para dicha figura es dado por la ecuación 3.5 [31], donde a es la longitud de los lados.

$$MaxRCS = \frac{12\pi a^4}{\lambda^2} \quad 3.5$$

Si se busca obtener un valor de RCS de 40.4 dBm² se requiere una antena con lados de 1 metro aproximadamente. El siguiente paso es construir la antena e instalarla sobre un punto de interés, posteriormente, se debe de orientar de acuerdo al ángulo de incidencia/azimut con la que es emitida la señal electromagnética por el satélite, por último, se tiene que desarrollar el procesamiento con PSInSAR para obtener series en el tiempo. La antena reflejante construida se observa en la figura 3.1 previamente a ser instalada y orientada.



Figura 3.1 Antena reflejante previamente a ser instalada

3.4 Instalación y orientación de la antena reflejante

Las imágenes seleccionadas para desarrollar el experimento de la antena reflejante son recolectadas en órbita ascendente por ambos satélites (A y B), con un azimut de 349° (ángulo medido desde el norte en el sentido de las manecillas del reloj) y un ángulo de incidencia de 39.5811° (ángulo medido entre la señal emitida por el satélite y la vertical); por lo que, la orientación de la antena reflejante tiene que ser con un azimut de 259°, para llegar a este valor, es necesario sumarle 90° a la orientación del satélite ya que el radar viaja de forma perpendicular al lado derecho

de éste, lo que indica que el radar está orientado con un azimut de 79° ($349^\circ+90^\circ-360^\circ$) y la antena reflejante debe instalarse en sentido contrario para recibir y reflejar la señal, es decir, con 180° más que la orientación del radar ($79^\circ+180^\circ$). Por otro lado, la inclinación de la antena reflejante fue de 15° , ya que el ángulo incidente de la señal es de aproximadamente 39° y la zona de la antena que mejor refleja es a los 54° aproximadamente [32].

3.5 Determinar la antena reflejante como un punto persistente

El primer procesamiento PSInSAR tiene el objetivo de definir si la antena reflejante fue instalada y orientada de manera correcta; para esto se implementaron 18 imágenes SAR en donde la antena reflejante debe de aparecer y reflejar la señal de manera estable en cada una de ellas. Las imágenes empleadas fueron recolectadas desde el doce de junio hasta el veintinueve de septiembre del 2021. La tabla 3.2 proporciona información de las imágenes SAR utilizadas.

Tabla 3.2 Imágenes utilizadas en la primera etapa de la metodología

Fecha	Satélite	Dirección
12/06/2021	S1A	Ascendente
18/06/2021	S1B	Ascendente
24/06/2021	S1A	Ascendente
30/06/2021	S1B	Ascendente
06/07/2021	S1A	Ascendente
12/07/2021	S1B	Ascendente
18/07/2021	S1A	Ascendente
24/07/2021	S1B	Ascendente
30/07/2021	S1A	Ascendente
05/08/2021	S1B	Ascendente
17/08/2021	S1A	Ascendente
23/08/2021	S1B	Ascendente
29/08/2021	S1A	Ascendente
04/09/2021	S1B	Ascendente
10/09/2021	S1A	Ascendente
16/09/2021	S1B	Ascendente
22/09/2021	S1A	Ascendente
28/09/2021	S1B	Ascendente

A continuación, se presenta el mapa de reflectividad (área del IMT) de cada imagen definida en la tabla 3.2, además, se marca con un círculo rojo la posición de la antena reflejante.

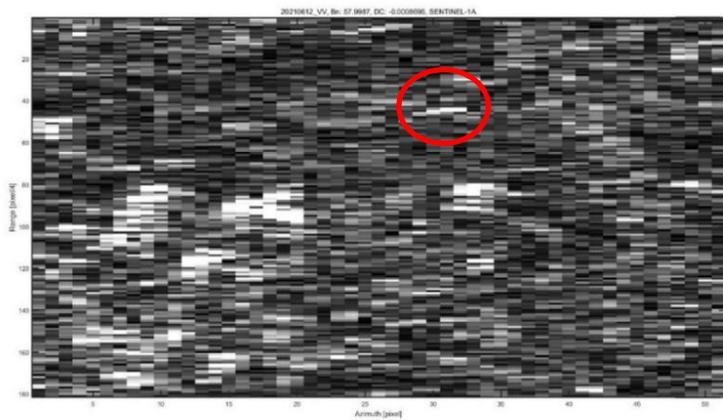


Figura 3.2 Imagen 12/06/2021

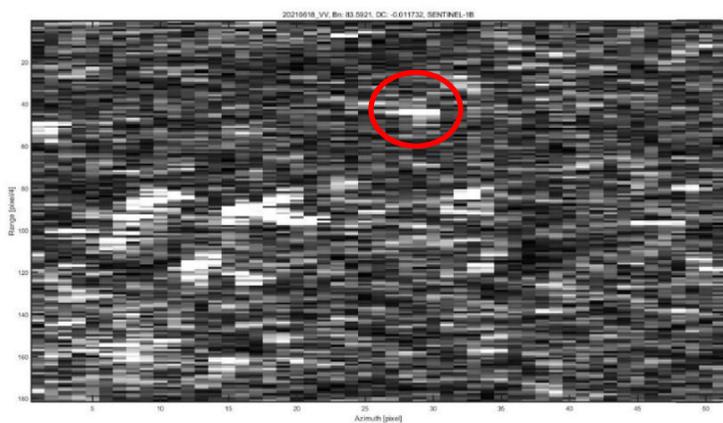


Figura 3.3 Imagen 18/06/2021

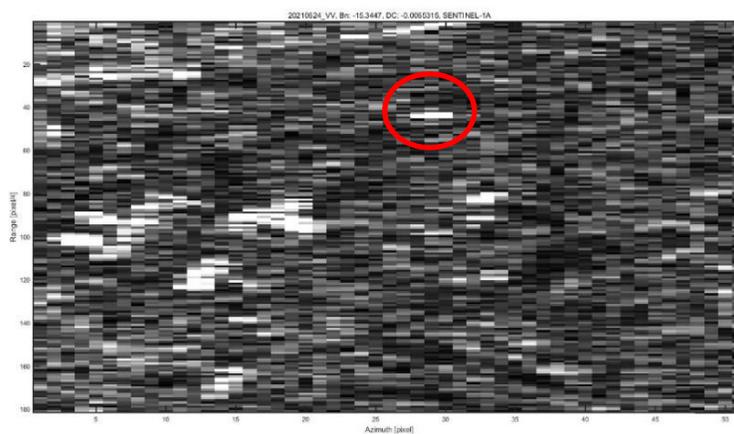


Figura 3.4 Imagen 24/06/2021

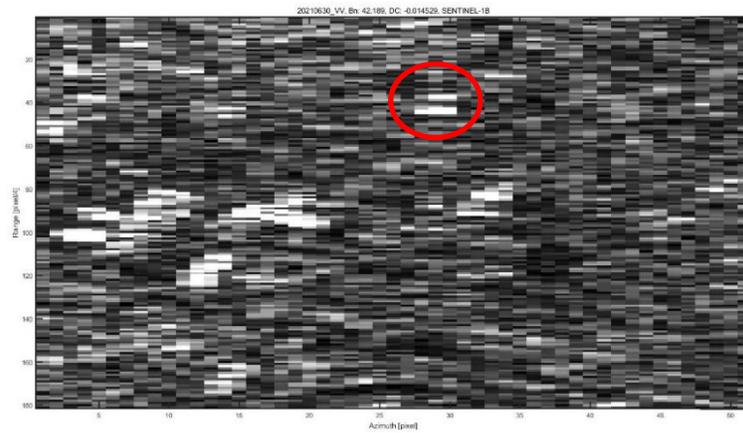


Figura 3.5 Imagen 30/06/2021

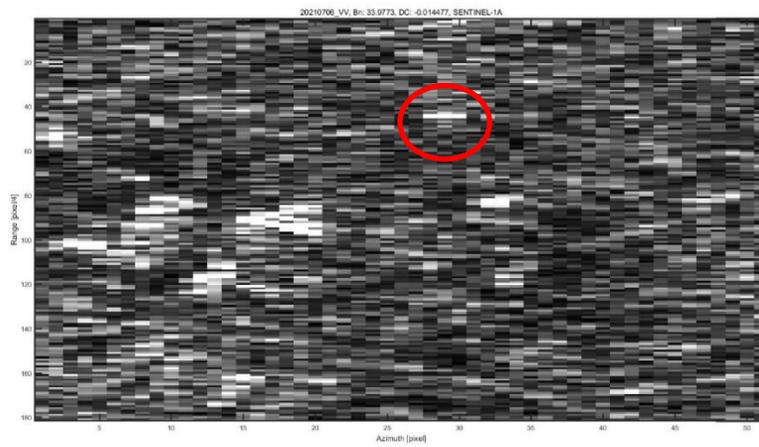


Figura 3.6 Imagen 06/07/2021

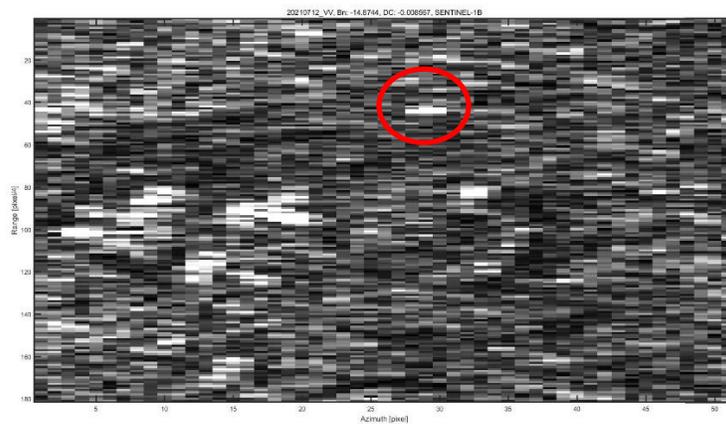


Figura 3.7 Imagen 12/07/2021

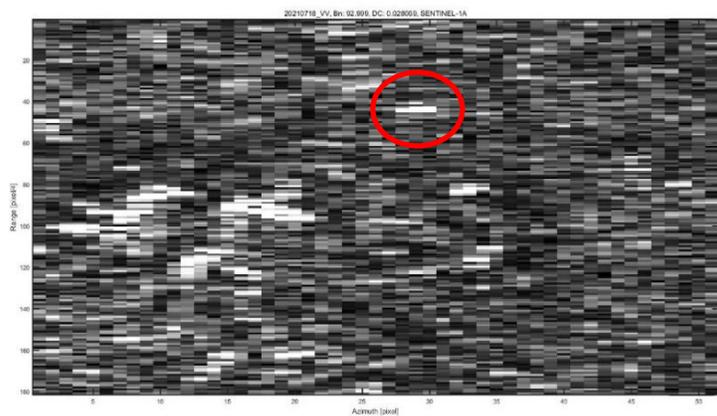


Figura 3.8 Imagen 18/07/2021

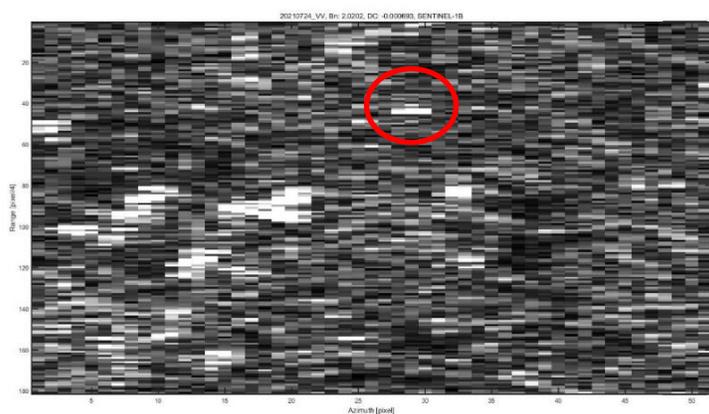


Figura 3.9 Imagen 24/07/2021

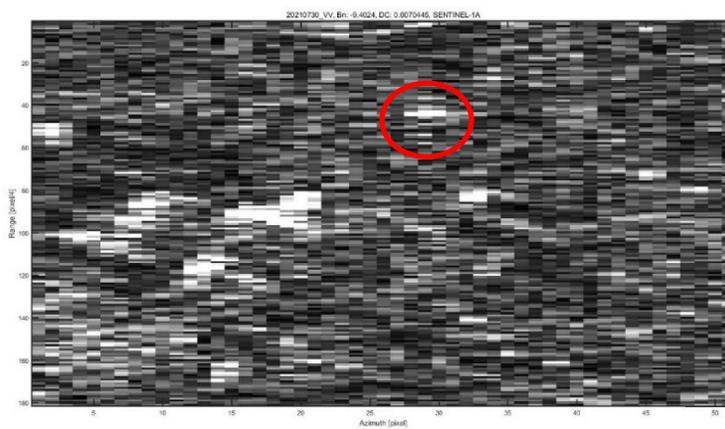


Figura 3.10 Imagen 30/07/2021

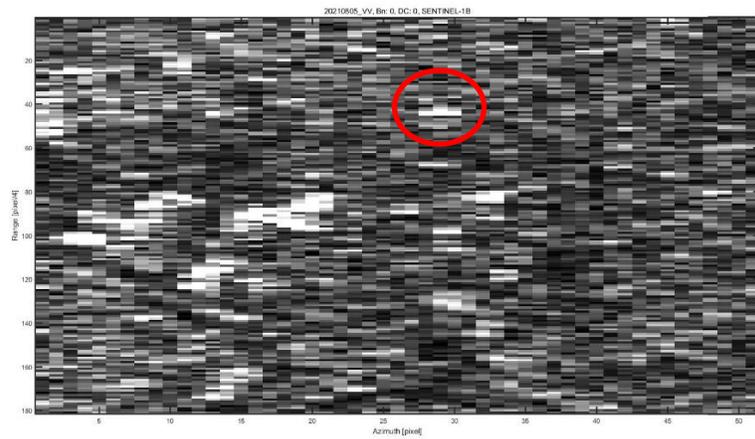


Figura 3.11 Imagen 05/08/2021

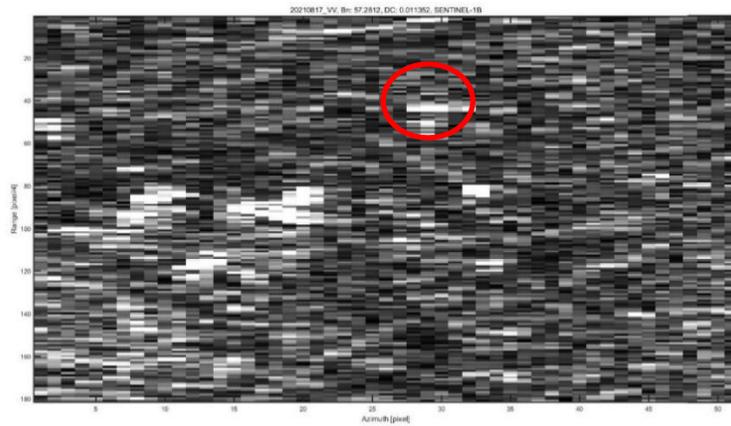


Figura 3.12 Imagen 17/08/2021

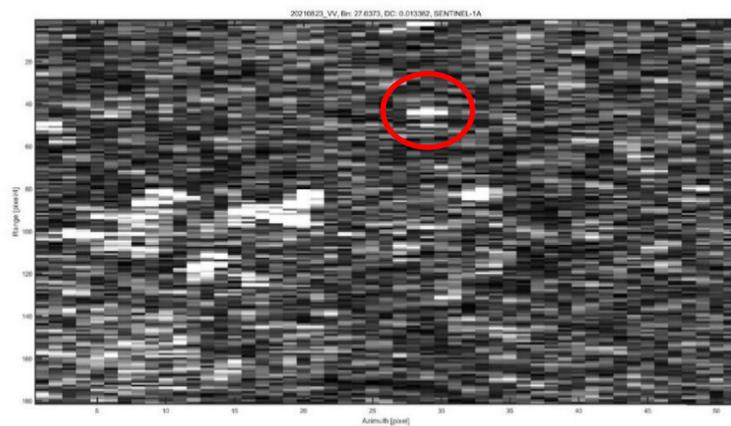


Figura 3.13 Imagen 23/08/2021

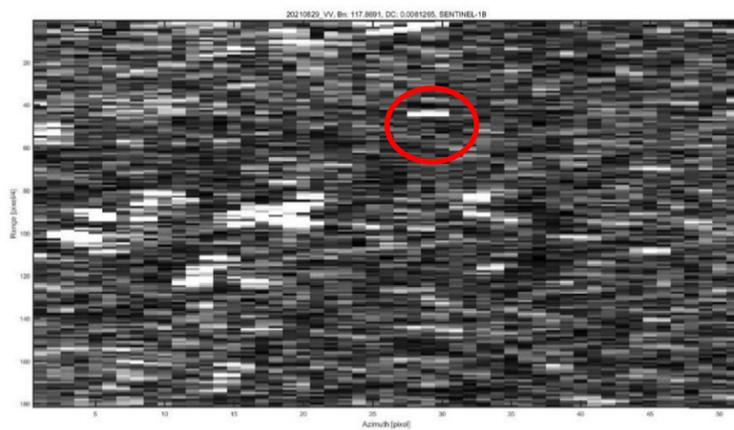


Figura 3.14 Imagen 29/08/2021

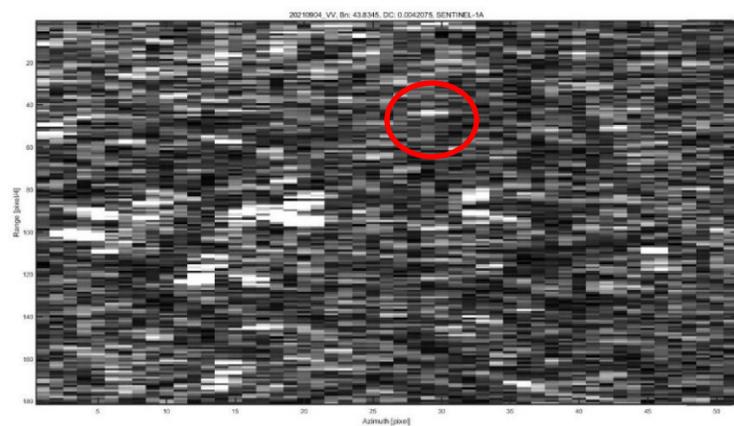


Figura 3.15 Imagen 04/09/2021

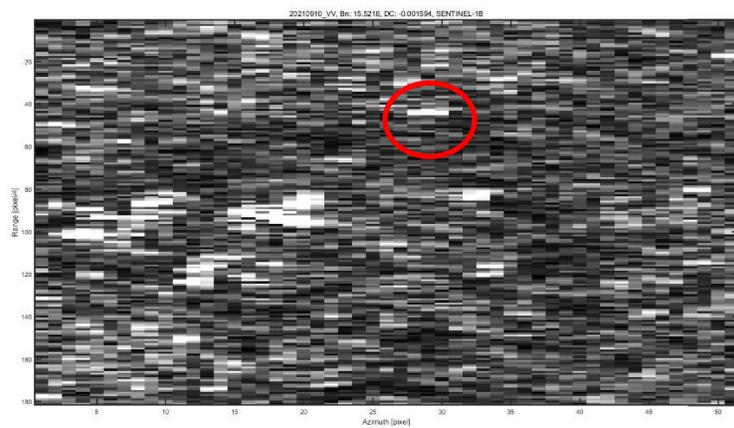


Figura 3.16 Imagen 10/09/2021

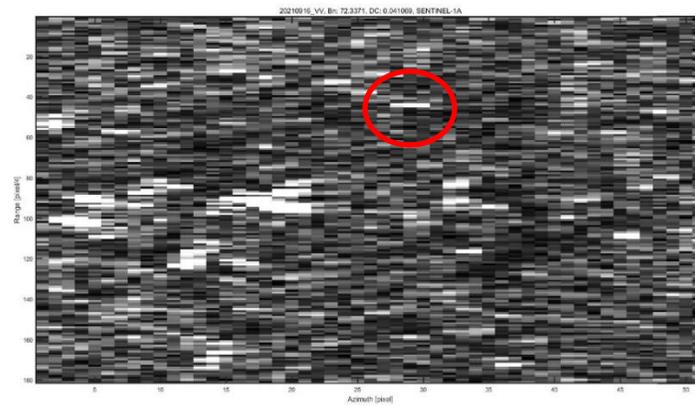


Figura 3.17 Imagen 16/09/2021

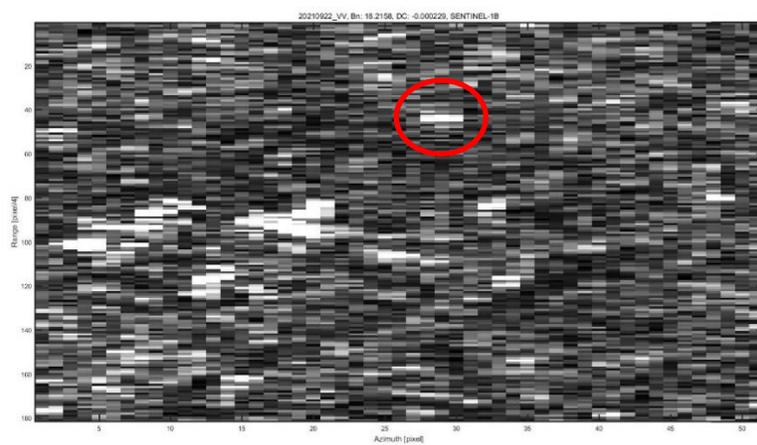


Figura 3.18 Imagen 22/09/2021

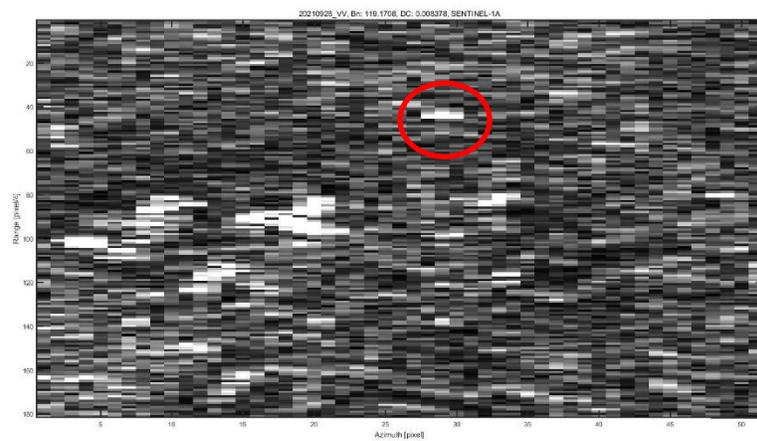


Figura 3.19 Imagen 28/09/2021

3.6 Cambios de posición vertical de la antena reflejante

Una vez que se determinó que la antena es un elemento que refleja la señal de manera estable, se procedió a anclarla al terreno. En el terreno donde se colocaron los apoyos de la antena se generaron agujeros de 15 x 30 cm, para empotrar una sección de PTR donde embonan los apoyos de la antena, la sección de PTR tiene perforaciones horizontales a ciertas distancias al nivel de unos cuantos centímetros (resolución milimétrica) con el objetivo de cambiar la posición vertical de la antena y comparar los desplazamientos reales respecto a un nuevo procesamiento PSInSAR, es decir, llevar a cabo un experimento de validación. Cada vez que se recolectó una imagen SAR la posición fue cambiada de acuerdo con la tabla 3.3, donde el máximo desplazamiento fue de +0.79 mm, en algunos periodos se dejó la antena estática con la finalidad de determinar falsos movimientos. Las imágenes SAR contempladas en el segundo procesamiento son las definidas en la tabla 3.3 y 3.2 para cumplir con el requisito de utilizar al menos 15 o 20 imágenes SAR [3, 33].

Tabla 3.3 Cronología de desplazamientos verticales en la antena

Fecha	Satélite	Desplazamiento
16/10/2021	S1A	Nueva posición inicial
22/10/2021	S1B	Sin desplazamiento
28/10/2021	S1A	Sin desplazamiento
03/11/2021	S1B	Sin desplazamiento
09/11/2021	S1A	+0.79 cm
15/11/2021	S1B	Sin desplazamiento
22/11/2021	S1B	+0.79 cm

3.7 Cambios de posición horizontal de la antena reflejante

A pesar de que InSAR es altamente sensible a los desplazamientos, la medición resultante es efectuada a través de la dirección LOS (Line Of Sight) que es perpendicular a la dirección en la que viaja el satélite. Este desplazamiento está formado por vectores de proyección de deformación real vertical, oeste-este, y norte-sur, en la dirección de la onda de radar [34]. La descomposición del vector de desplazamiento se define en la siguiente ecuación 3.6 [35].

$$dLOS = Ay^T \quad 3.5$$

Donde $A = [(\cos \theta \sin \theta \cos \alpha \sin \theta \sin \alpha)]$; $y = [(dv \ dl \ dt)]$; α es el rumbo relativo del puente, θ es el ángulo incidente; dv , dl , dt se refiere al vector de desplazamiento vertical, longitudinal y transversal, respectivamente.

La sensibilidad del desplazamiento LOS en la componente vertical es mayor que en la horizontal, esto se debe a que las mediciones de interferometría no hay sensibilidad con respecto a la deformación norte-sur por la órbita cuasi polar en la que viaja el satélite [34], por ejemplo, para un ángulo incidente de 30° , casi el 90% del desplazamiento en la componente vertical es detectado, mientras que en la componente horizontal se aprecia el 50% [4]. Es por esto que en el presente proyecto se decidió enfocarse totalmente en el desplazamiento generado en la componente vertical. Es importante mencionar que la sensibilidad en la componente horizontal y vertical varía de acuerdo con la posición geoespacial que presente la estructura que se quiere monitorear y el ángulo de incidencia/azimut en la que el satélite emite la señal electromagnética.

3.8 Condiciones que presenta el puente Mezcala

Como parte de los objetivos, también se realizó el procesamiento PSInSAR con imágenes del puente Mezcala en el estado de Guerrero, con el propósito de conocer las condiciones que tiene la estructura para ser estudiada a través de la metodología. El estudio cubre el periodo desde primero de enero del 2021 hasta el dieciséis de septiembre del mismo año, siendo un total de 43 imágenes en dirección ascendente. La información que se busca establecer es el número de puntos reflejantes naturales, el valor de *RCS* del puente y los posibles puntos de referencia en la zona.

4. Resultados

A continuación, se presentan los resultados de las dos pruebas experimentadas realizadas.

4.1 Procesamiento con datos del puente Mezcala

El procesamiento PSInSAR de 43 imágenes recolectadas por ambos satélites de la misión Sentinel-1 tiene como objetivo ver las condiciones del puente Mezcala para ser estudiado por la metodología descrita. El procesamiento se llevó a cabo con el software SARPROZ utilizando el módulo para áreas pequeñas, se seleccionaron los puntos con un índice de estabilidad de la amplitud mayor a 0.6 y se buscó determinar los desplazamientos no lineales. El principal problema encontrado en el procesamiento fue el ubicar un punto de referencia sin desplazamiento, ya que es una zona sísmica, por lo cual se optó por utilizar el punto persistente más estable del puente. El punto de referencia es importante porque el movimiento de todos los elementos está referido a éste, es decir, que, si este punto se mueve, el resultado de todos los demás estará afectado. La estabilidad del punto considerado como referencia se presenta en las figuras 4.1 y 4.2.

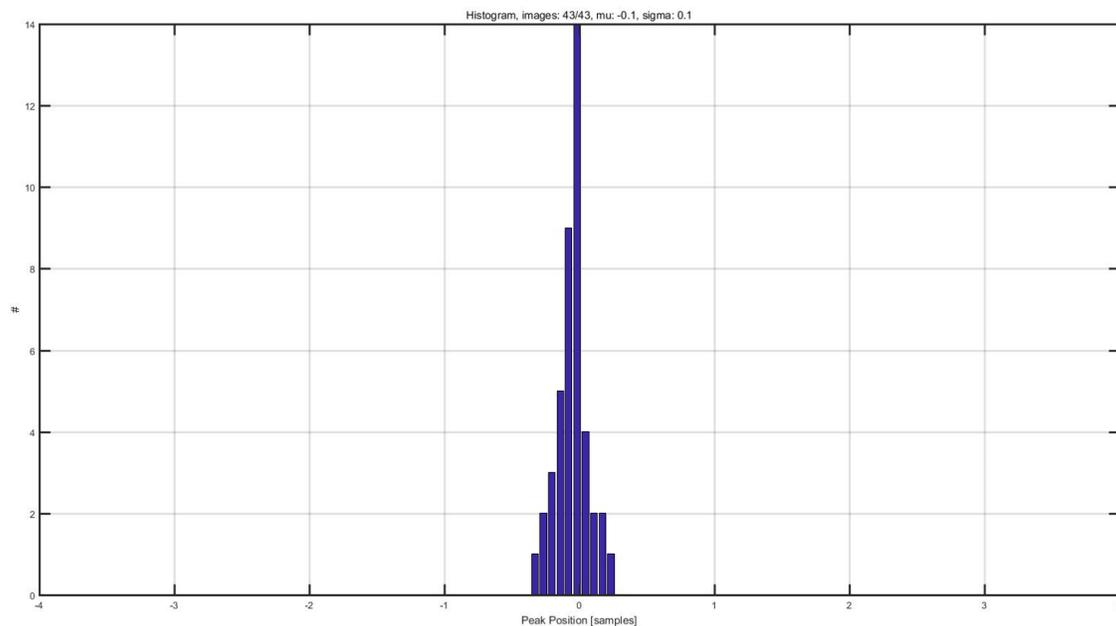


Figura 4.1 Histograma de amplitud del punto de referencia

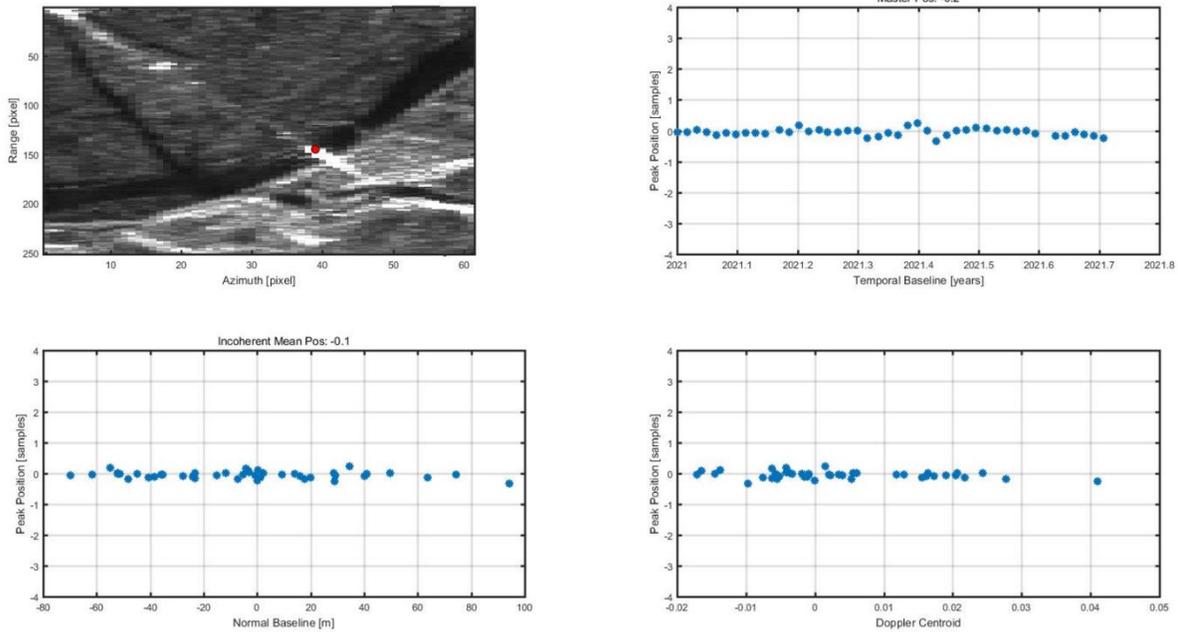


Figura 4.2 Ubicación, línea base, línea base temporal del punto de referencia

Al terminar el procesamiento, se obtuvieron 9 puntos reflejantes de manera natural en el puente Mezcala (figura 4.3), localizados en la zona norte de la estructura (cuadro rojo en la figura 4.3) con una coherencia temporal mayor a 0.9.



Figura 4.3 Puntos reflejantes del puente Mezcala

Los valores de RCS de los puntos reflejantes se muestran en la figura 4.4, donde el valor más alto encontrado es de 36000 m^2 que es igual a 45.5 dBm^2 y el más bajo de 1600 m^2 que representa 32 dBm^2 . La antena reflejante desarrollada e instalada en el IMT fue creada para que idealmente alcanzara un valor máximo de reflectividad de 40.4 dBm^2 , por lo que, en el caso de necesitar colocar una antena reflejante, la que se elaboró no debería tener problemas para ser identificada en el puente Mezcala.

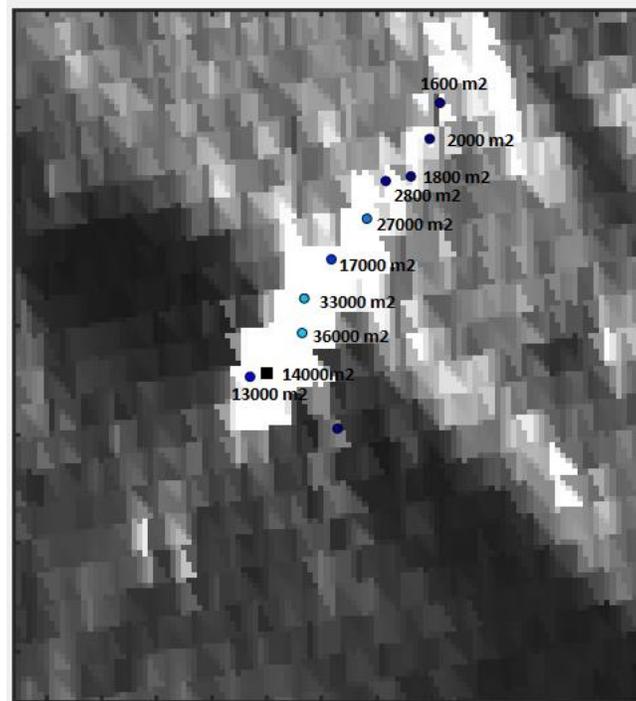


Figura 4.4 RCS de puntos reflejantes del puente Mezcala

En los desplazamientos no-lineales obtenidos en cada uno de los puntos reflejantes del puente Mezcala no se observa ninguna tendencia y el desplazamiento acumulado es de -7 milímetros (figura 4.5).

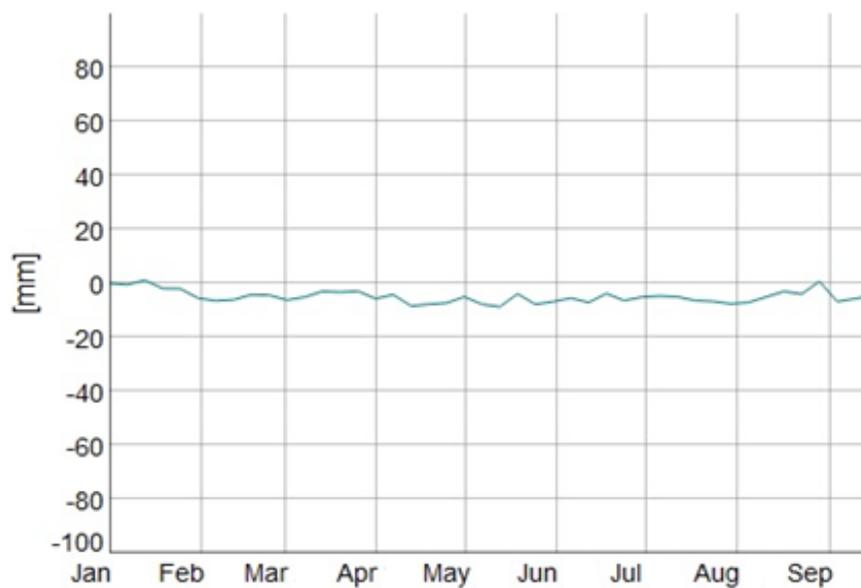


Figura 4.5 Ejemplo de desplazamiento no lineal de unos de los puntos reflejantes

4.2 Estabilidad de la antena reflejante

Para definir la estabilidad de la antena colocada dentro del área del IMT y su orientación adecuada, el procesamiento PSInSAR contempló: analizar un total de 18 imágenes SAR, determinar desplazamientos no-lineales, evaluar la deformación por cambios en la temperatura y seleccionar puntos PS a partir de valores mayores que 2 en el mapa de reflectividad. A pesar de que la magnitud de RCS encontrado en la antena reflejante del IMT es alto y está presente en cada una de las imágenes mencionadas en la tabla 3.2, su valor en el índice de estabilidad de amplitud es igual a 0.5 (figura 4.6), esto se debió a que durante las primeras 4 imágenes, periodo desde el doce hasta el treinta de junio, la antena se movió constantemente, lo cual se puede apreciar en la figura 4.7. Posteriormente, la antena se estabilizó hasta inicios de septiembre, donde se generaron desplazamientos debido a que la antena se llenó de agua, por último, la antena se volvió a mover para el diez de septiembre.

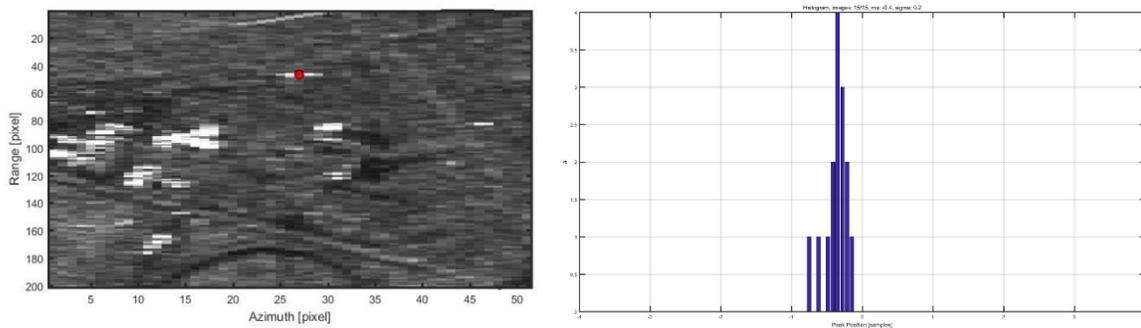


Figura 4.6 Estabilidad de antena reflejantes

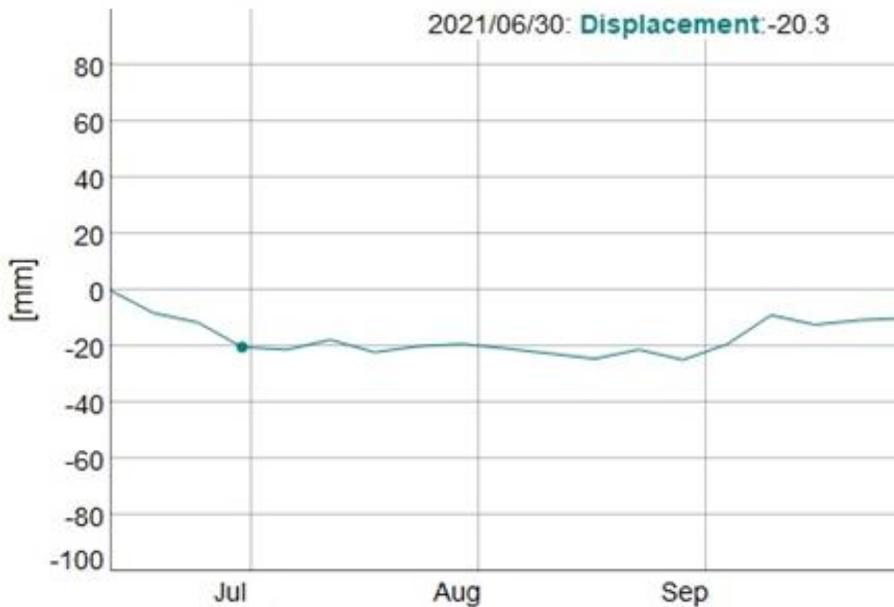


Figura 4.7 Comportamiento de la antena reflejante durante su estabilización

El desplazamiento acumulado de la antena desde el doce de junio hasta el veintiocho de septiembre es de -4.3 mm con una coherencia temporal de 0.79.

4.3 Validación de PSInSAR con antena reflejante

Para validar el procesamiento PSInSAR se desarrollaron 2 procesamientos en modo de pequeñas áreas del software SARPROZ considerando deformación por temperatura, desplazamientos no lineales, mapa de reflectividad para seleccionar puntos PS y 27 imágenes SAR recolectadas por ambos satélites, cubriendo desde el doce de junio hasta el veintidós de noviembre del 2021; ambos procesamientos utilizan los mismos parámetros de configuración excepto por el punto de referencia. Los resultados del primer procesamiento se presentan en las figuras 4.8 y 4.9; la primera gráfica es una comparativa entre los desplazamientos esperados (tabla 3.3) y los obtenidos a través de PSInSAR, mientras que la segunda muestra los errores resultantes. En resumen, el promedio de los errores es de 1.27 mm, el máximo error es de 2.12 mm, el mínimo es 0.5 mm y la desviación estándar es igual a 0.56 mm.

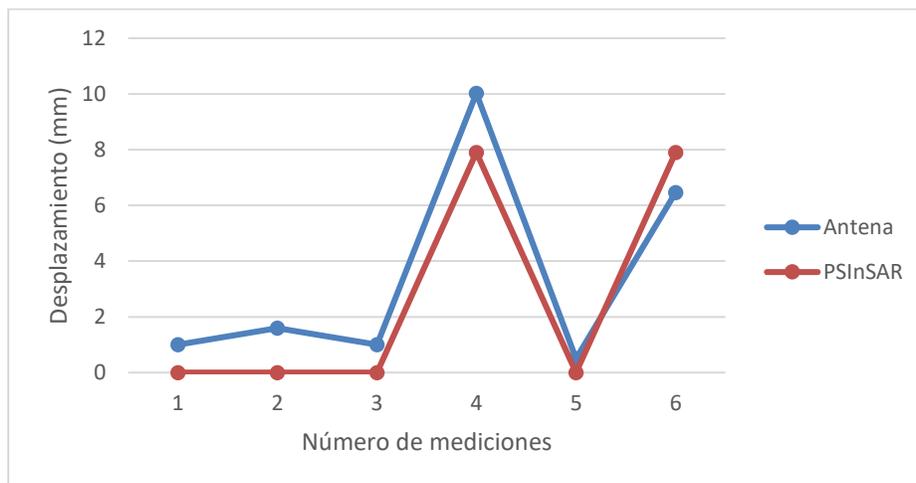


Figura 4.8 Comparación desplazamiento real y el medido por PSInSAR (1)

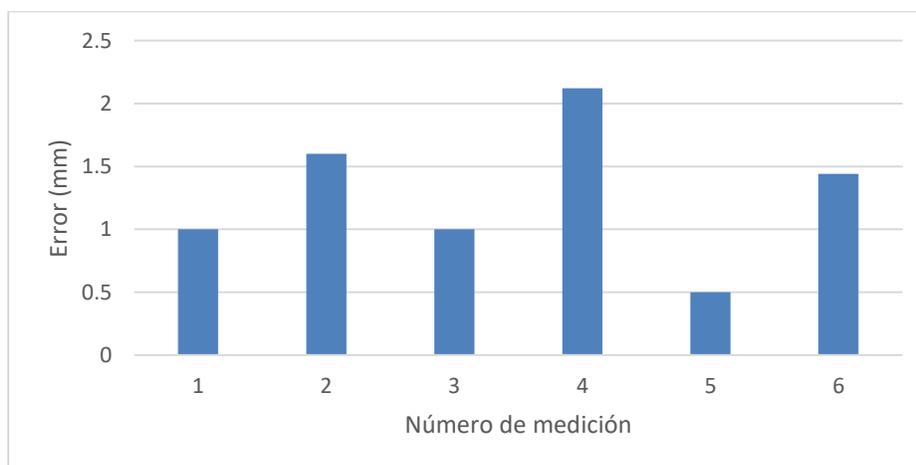


Figura 4.9 Error de las mediciones PSInSAR primer procesamiento

El segundo procesamiento proporciona el mismo comportamiento, pero con diferentes magnitudes que el primero. La figura 4.10 ilustra la comparación entre PSInSAR y el movimiento real (tabla 3.3), el error de las mediciones del segundo proceso se aprecia en la figura 4.11. Los resultados indican un promedio de error de 0.66 mm, máximo error de 1.1 mm, mínimo error de 0.15 y la desviación estándar de 0.47 mm. En este caso los errores fueron de menor magnitud que en el primer procesamiento, esto se debe a que el error proporcionado por el elemento de referencia es menor que en el primer procesamiento. Para este experimento ambos puntos de control fueron edificios y como es bien sabido son afectados por cambios en la temperatura, además de que ambas mediciones contienen errores ocasionados por la limitante de sensibilidad del desplazamiento en LOS para la componente vertical.

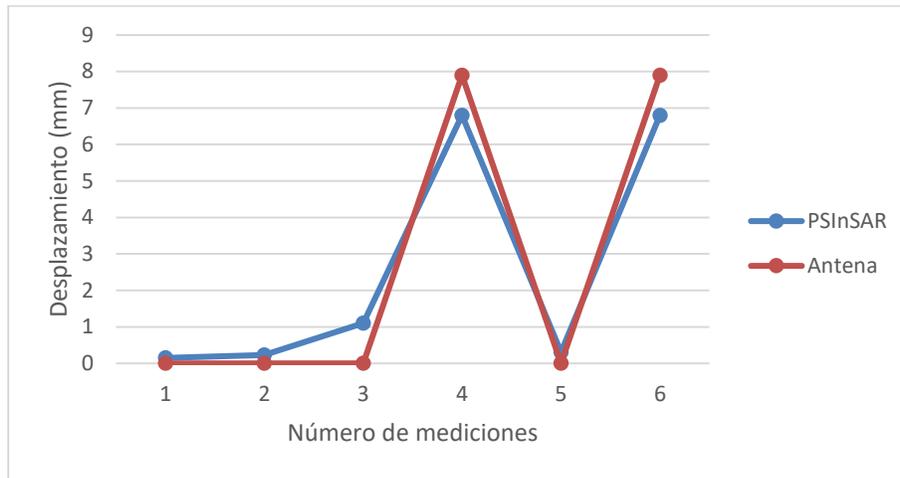


Figura 4.10 Comparación desplazamiento real y el medido por PSInSAR (2)

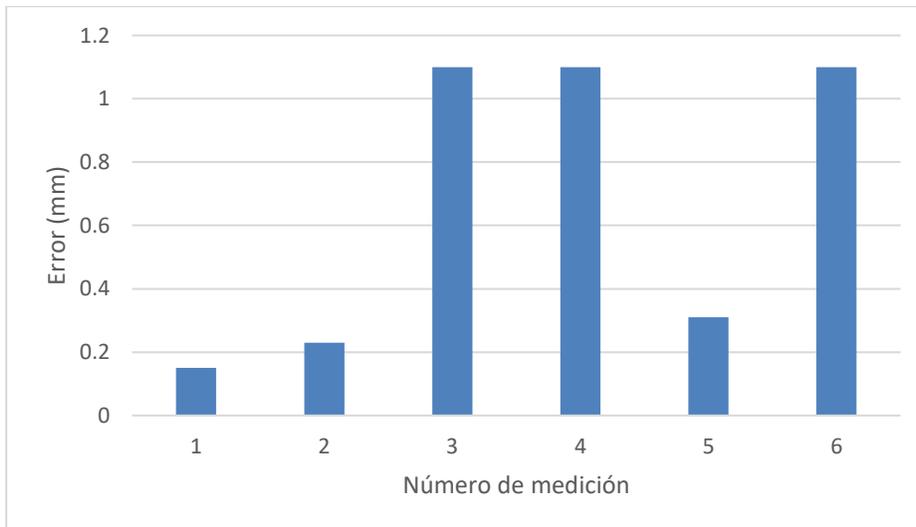


Figura 4.11 Error de las mediciones PSInSAR segundo procesamiento

5. Conclusiones

Se puede concluir que la metodología PSInSAR es capaz de detectar desplazamientos con precisión milimétrica cuando se emplea un elemento de referencia estable y confiable, lo cual lo convierte en una herramienta de monitoreo y análisis estructural para evaluar el comportamiento de manera inicial de los puentes, taludes y túneles que conforman la infraestructura carretera de nuestro país. La información que puede ser proporcionada mediante PSInSAR son desplazamientos denominados semi-estáticos [36]; sin embargo, no es capaz de determinar todos los posibles desplazamientos dentro de este conjunto de datos, es decir, solamente brinda información de cambios en las estructuras producidos por fenómenos lentos y que se pueden detectar con una frecuencia de muestreo de 6 o 12 días, por lo tanto, las futuras investigaciones se deben enfocar principalmente en movimientos producidos por cambios de temperatura y por subsidencia o socavación en la estructura. Para monitorear los puentes de la infraestructura carretera de México, se puede tomar como referencia el comportamiento histórico de las estructuras de interés a través de la base de datos de imágenes SAR, por ejemplo, la misión Sentinel-1 tiene datos desde mediados del 2014. Con un tiempo de por lo menos un año de datos procesados a través de InSAR se conoce un ciclo completo de las variaciones en el puente ocasionadas por los cambios de temperatura y es suficiente para determinar si existe una tendencia previa en la componente vertical ocasionada por socavación o subsidencia.

Por otra parte, se puede concluir que los 9 puntos reflejantes del puente Mezcala muestran que la estructura presenta un comportamiento estable (desplazamiento acumulado de -7 mm) con respecto al elemento de referencia seleccionado, lo anterior, si bien indica que existe un desplazamiento estable en todos los puntos seleccionados, hace necesario tener otro elemento reflejante externo al puente que no presente movimiento para verificar la información; una manera de resolver este problema es colocando una antena reflejante fuera del puente y medir el cambio de posición con receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) para validar los resultados. De acuerdo con los valores de *RCS* de los 9 puntos reflejantes, la antena con lados de 1 metro creada durante la investigación, puede ser un elemento reflejante que domine dentro de un pixel de las imágenes SAR provenientes de Sentinel-1 en el cuerpo del puente Mezcala; sin embargo, se debe encontrar una antena reflejante de menor dimensión, ya que la antena actual, aunque es fácil de detectar en imágenes proporcionadas por la misión Sentinel-1, su instalación en un puente se complica por el área que abarca y los requerimientos que necesita para estar anclada, esto se puede solucionar seleccionando zonas del puente con el potencial de reflejar la señal emitida por los satélites y agregando material de una antena reflejante para mejorar su desempeño, de esta manera se crea un punto reflejante mixto, es decir, mitad natural (parte de la estructura) y mitad artificial.

Por último, es importante mencionar que por todos los beneficios que implica InSAR en el monitoreo estructural, vale la pena el desarrollo o adquisición de un software para llevar a cabo la metodología.

6. Trabajo futuro

En los siguientes trabajos de investigación se realizará el análisis de los desplazamientos obtenidos a través de las diferentes metodologías de InSAR, por ejemplo, los movimientos por sensibilidad térmica pueden ser utilizados para detectar daños, siempre y cuando, estos afecten la respuesta típica generada por los cambios térmicos [37]. Por otro lado, cambios de posición de la estructura en la componente vertical pueden ser identificados como posibles movimientos generados por subsidencia o socavación [38]. Asimismo, es necesario determinar si los desplazamientos detectados están en el rango de comportamiento normal o si están asociados a una etapa inicial de daño. De acuerdo con [37], los límites deben establecerse a partir de observaciones, mediciones a través del tiempo o conocimientos de expertos; por ejemplo, el departamento de transporte de Estados Unidos propone el uso de dos límites verticales en el movimiento del tablero de los puentes, los cuales son: un límite de precaución (bandera amarilla) y otro crítico (bandera roja). El límite de cada etapa, se realiza a partir de calcular la velocidad de desplazamiento mensual y anual, mediante mediciones recolectadas mes tras mes. En el caso de exceder una velocidad de 2.5 cm por año, se genera una bandera amarilla y si, se presentan velocidades superiores a 1.3 cm por mes, entonces se produce una bandera roja. De esta forma la información se utiliza como guía para el personal que evalúa los puentes [24]. Otra investigación [37] propone el uso de algunos parámetros estadísticos basados en información histórica que pueden ser definidos por las autoridades que monitorean los puentes.

Bibliografía

- [1] Alaska Satellite Facility (2022). How to Create an Interferogram Using ESA's Sentinel-1 Toolbox. Publicación en línea. Recuperado de <https://asf.alaska.edu/how-to/data-recipes/create-an-interferogram-using-esas-sentinel-1-toolbox/>
- [2] Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), 8-20.
- [3] Hoppe, E. J., Novali, F., Rucci, A., Fumagalli, A., Del Conte, S., Falorni, G., & Toro, N. (2019). Deformation monitoring of posttensioned bridges using high-resolution satellite remote sensing. *Journal of Bridge Engineering*, 24(12), 04019115.
- [4] Perissin, D. (2016). Interferometric SAR multitemporal processing: Techniques and applications. In *Multitemporal Remote Sensing* (pp. 145-176). Springer, Cham.
- [5] Tre Altamira (2022). InSAR at a Glance. Publicación en línea. Recuperado de <https://site.tre-altamira.com/insar/>
- [6] Flores-Anderson, A. I., Herndon, K. E., Thapa, R. B., & Cherrington, E. (2019). *The SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*.
- [7] Agencia Espacial Europea (2022). Sentinel-1. Publicación en línea. Recuperado de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>
- [8] Woodhouse, I. H. (2017). *Introduction to microwave remote sensing*. CRC press.
- [9] Ferretti, A. (2014). *Satellite InSAR data: reservoir monitoring from space*. EAGE publications.
- [10] Devanbéry, 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.
- [11] 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.

- [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] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Meyer F. J. (2018). Sentinel-1 InSAR processing using the Sentinel-1 Toolbox. USA: Alaska Satellite Facility.
- [21] Veci L. (2016). TOPS Interferometry Tutorial. European Space Agency.
- [22] Fárová, K., Jelének, J., Kopačková-Strnadová, V., & Kycl, P. (2019). Comparing DInSAR and PSI techniques employed to Sentinel-1 data to monitor highway stability: a case study of a massive Dobkovičky landslide, Czech Republic. *Remote Sensing*, 11(22), 2670.
- [23] Guzmán-Acevedo, Quintan-Rodríguez, Gasca-Zamora, Carrión-Viramontes, Martínez-Trujano, Hernández-Figueroa, Hernández-Guzmán, Valenzuela-Delgado, & Anaya Díaz. (2018). Análisis del potencial de tecnología satelital InSAR para el

monitoreo de la infraestructura carretera. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 593. Sanfandila, Qro, 2020

[24] 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.

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

[26] Garthwaite, M. C. (2017). On the design of radar corner reflectors for deformation monitoring in multi-frequency InSAR. *Remote Sensing*, 9(7), 648.

[27] Ketelaar, V. G. (2009). *Satellite radar interferometry: Subsidence monitoring techniques* (Vol. 14). Springer Science & Business Media.

[28] Ketelaar, G., Marinkovic, P., & Hanssen, R. (2005, April). Validation of point scatterer phase statistics in multi-pass InSAR. In *Envisat & ERS Symposium* (Vol. 572).

[29] Adam, N., Kampes, B., & Eineder, M. (2004). Development of a scientific permanent scatterer system: Modifications for mixed ERS/ENVISAT time series. In *Proceedings*.

[30] Nahli, A., Simonetto, E., Tatin, M., Durand, S., Morel, L., & Lamour, V. (2020). On the combination of PsInSAR and GNSS techniques for long-term bridge monitoring. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 325-332.

[31] Qin, Y., Perissin, D., & Lei, L. (2013). The design and experiments on corner reflectors for urban ground deformation monitoring in Hong Kong. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2013.

[32] Algafsh, A., Inggs, M., & Mishra, A. K. (2016, November). The effect of perforating the corner reflector on maximum radar cross section. In *2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)* (pp. 1-4). IEEE.

[33] Perissin, D., & Wang, T. (2011). Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(1), 271-280.

[34] Ren, H., & Feng, X. (2020). Calculating vertical deformation using a single InSAR pair based on singular value decomposition in mining areas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 92, 102115.

[35] Selvakumaran, S., Rossi, C., Marinoni, A., Webb, G., Bennetts, J., Barton, E., & Middleton, C. (2020). Combined InSAR and terrestrial structural monitoring of bridges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(10), 7141-7153.

[36] Gaxiola-Camacho, J. R., Bennett, R., Guzman-Acevedo, G. M., & Gaxiola-Camacho, I. E. (2017). Structural evaluation of dynamic and semi-static displacements of the Juarez Bridge using GPS technology. *Measurement*, 110, 146-153.

[37] Cusson, D., Rossi, C., & Ozkan, I. F. (2021). Early warning system for the detection of unexpected bridge displacements from radar satellite data. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11(1), 189-204.

[38] 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.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado Galindo"
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,
Querétaro, México. C.P. 76703
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610
Fax: +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

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