



Universidad Nacional Autónoma de México

División de Ciencias de la Tierra
Facultad de Ingeniería



Detección semiautomatizada de fallas asociadas a subsidencia en interferogramas y mapas de velocidades InSAR.

TESIS

Que para obtener el grado de:

Ingeniero Geofísico

Presenta:

Gómez Jiménez Cecilia

Asesor:

Dr. Enrique Cabral Cano

Ciudad de México, México
Septiembre 2019

©2019 – CECILIA GÓMEZ JIMÉNEZ
TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS.

Detección semiautomatizada de fallas asociadas a subsidencia en interferogramas y mapas de velocidades InSAR.

ABSTRACT

The abstract

Contents

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO | 1 |
| 1.1 | Presentación | 1 |
| 1.2 | Objetivo | 1 |
| 1.3 | Justificación | 1 |
| 1.4 | Subsidencia en ciudades de Mexico y su impacto en la infraestructura crítica. | 2 |
| 1.5 | Zona de estudio | 7 |
| 1.6 | Capítulos | 7 |
| 2 | INTRODUCCIÓN | 9 |
| 2.1 | Sensores SAR | 9 |
| 2.2 | Interferometría SAR | 18 |
| 3 | METODOLOGÍA | 23 |
| 3.1 | Estado del arte en la detección de fallas sómeras por InSAR | 23 |
| 3.2 | Resolución espacial de sensores SAR y su impacto en la detección de fallas asociadas a subsidiencia | 23 |
| 3.3 | Proceso de semiautomatización del flujo de trabajo para detección de fallas | 23 |
| 4 | DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 25 |
| 4.1 | Caso de estudio en la CDMX | 25 |
| 4.2 | Validación de resultados | 25 |
| | CONCLUSIONS | 27 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 29 |
| | APPENDIX A PROGRAMA | 33 |

Lista de figuras

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Rellenos aluviales en el poniente de la Ciudad de México. Modificado de [II2017] | 3 |
| 1.2 | Auvinet, Méndez, Juárez.Mapa de velocidades de hundimiento.Modificado de [II2017]. | 5 |
| 1.3 | Auvinet, Méndez, Juárez.Zonas potenciales de agrietamiento por consolidación regional en zonas de transición abrupta.Modificado de :[II2017] | 6 |
| 1.4 | Ubicación de la zona de estudio.Oriente de la Ciudad de México. | 6 |
| 2.1 | Gonzalez Rafael C. y Woods Richard E.,El espectro electromagnético.Modificado de :[GONWOOD]. | 10 |
| 2.2 | Gonzalez C.Rafael , Woods Richard E.Illustración:(a) Sensor de imagen único.(b) Sensor de línea.(c) Sensor de matriz.Modificado de :[GONWOOD] | 11 |
| 2.3 | Gonzalez C.Rafael , Woods Richard E.Illustración:Adquisición de imágenes utilizando una tira de sensor lineal.Modificado de :[GONWOOD] | 12 |
| 2.4 | Gonzalez C.Rafael , Woods Richard E.Illustración:Generando una imagen digital. (a) Imagen continua. (b) Una línea de escaneo desde A a B en la imagen continua. (c) Muestreo.(d) Línea de escaneo digital.Modificado de :[GONWOOD] | 13 |
| 2.5 | Téllez Quiñones Alejandro.(a) Representación de la resolución en rango terrestre $\Delta y_n = \Delta r / \sin(\theta_n)$,el cual depende del ángulo θ_n con $n=1,...,N-1$.En este caso $\Delta r=r_{n+1}-r_n$ es constante y y_\bullet es una coordenada casi central respecto a la distribución de los rayos a lo largo del eje y.(b)Representación del footprint a lo largo del rango terrestre,en el cual la distancia W_y es llamada swath.Considerando a Z como la altura satelital,se tiene que $\cos(\theta_\bullet)=Z/R_0$.Modificado de:[QUIA1] | 15 |
| 2.6 | UNAVCO.Illustración :Varias agencias apoyan las diferentes misiones SAR. Modificado de:[UNAV] | 17 |
| 2.7 | Xiaobing Zhou, Ni-Bin Chang y Shusun Li.Illustración :Modelo geométrico para un sistema SAR. El rango inclinado es la longitud entre la antena y el correspondiente píxel de tierra y el rango de tierra corresponde a la distancia entre la pista de tierra y el píxel de tierra. Modificado de [XINISH]. | 18 |
| 2.8 | Xiaobing Zhou, Ni-Bin Chang y Shusun Li.Illustración :Relación entre amplitud, fase y longitud de onda de una señal de radar. La intensidad de la señal del radar es proporcional a la amplitud al cuadrado. Modificado de [XINISH]. | 19 |
| 2.9 | Téllez Quiñones Alejandro.Illustración de la geometría de adquisición SAR detectadas desde las posiciones S1 (maestro) y S2 (esclavo).Modificado de:[QUIA2] | 20 |
| 2.10 | Téllez Quiñones Alejandro.Relación entre la topografía de una extensión local de terreno y la fase interferométrica asociada a un par de imágenes SAR de la misma zona, detectadas desde las posiciones S1 (maestro) y S2 (esclavo).Modificado de:[QUIA2] | 20 |

Lista de acrónimos

CDMX Ciudad de México

DEM Modelo Digital de Elevación

InSAR Interferometría de Radar de Apertura Sintética

LOS Línea de Visión

CD Formación Aluvial

QI Depósitos Lacustres

RADAR Detección de Radio y Rango (Radio Detection and Ranging)

RAR Radar de Apertura Real

SAR Radar de Apertura Sintética

DEDICATORIA

A MIS FAMILIARES.

A MIS PADRES. TODO ESTE TRABAJO HA SIDO POSIBLE POR ELLOS . A MIS MAESTROS.

A MIS AMIGOS.

Agradecimientos

To God, ...

To my ..

Se expondrá que problema es el que se pretende resolver ,los objetivos que se cumplirán en el desarrollo de la Tesis ,los motivos por los que la Tesis fue hecha ,qué método será utilizado,se dará un panorama general de lo que va a tratar la Tesis .

1

Motivación del estudio

1.1 PRESENTACIÓN

Las aplicaciones geofísicas de interferometría de radar a mediciones de cambios de superficie de terreno han sido exploradas desde principios de los años noventa. La principal ventaja de este método radica en que a) brinda una visión gráfica del proceso de deformación de terreno de una zona y b) permite generar mapas que poseen una alta resolución espacial que difícilmente podrían ser obtenidas por métodos de nivelación convencional, es decir métodos directos. La cartografía derivada de este tipo de análisis puede ser objeto de comparación y correlación de otros estudios que usan diferentes métodos, las cuales tienen como objetivo determinar riesgo y monitorear fenómenos que afectan a una población, por mencionar algunos: mapas de zonificación sísmica, mapas de fracturas, mapas de riesgos, etc.

1.2 OBJETIVO

- General:Realizar un script el cual permita localizar fallas en mapas de desplazamiento, asociadas a subsidencia .
- Particular:Mediante la técnica geodésica Interferometría de Radar de Apertura Sintética(InSAR) ,obtener interferogramas y mapas de velocidades de (Iztapalapa,),CDMX.Realizar un análisis espacio-temporal de deformaciones terrestres debido a la extracción de agua subterránea .

1.3 JUSTIFICACIÓN

Varias ciudades del Centro de Mexico experimentan un proceso de subsidencia y fallamiento superficial ,las cuales afectan directamente a casas habitación, obras civiles e infraestructura urbana. Esta situación se presenta como un fenómeno asociado a la intensa extracción de agua subterránea. Cada

año, la planicie lacustre de la Ciudad de México registra un hundimiento de cuarenta centímetros (Auvinet,2015)debido a la excesiva extracción de agua de los acuíferos, con efectos catastróficos para la infraestructura urbana.La severidad de este proceso y la dinamica de sus fallas asociadas obliga a su estudio detallado mediante técnicas de geodesia satelital para determinar con un alto grado de detalle su detección, su caracterización espacial y su comportamiento temporal.

1.4 SUBSIDENCIA EN CIUDADES DE MEXICO Y SU IMPACTO EN LA INFRAESTRUCTURA CRÍTICA.

1.4.1 GEOLOGÍA

La geología es imprescindible para la descripción de las características del subsuelo del Valle de México .El fondo de la antiplanicie donde se ubica la Cuenca de la Ciudad de México está constituido por calizas mezozoicas las cuales se formaron a principios de la era terciaria(Vizcaino y Bistrain,1952),Este tipo de calizas no se advierten en la cuenca debido a hundimientos geológicos y acciones orogénas :(1)Prolongadas emisiones y erupciones de rocas volcánicas;(2)Formación de capas tepetatosas discontinuas en laderas bajas de las montañas volcánicas ,efecto de erupciones explosivas con productos cineríticos;(3)Acumulación de volúmenes de agua en el fondo de ese depósito.Con la presencia de lluvias y la acción del viento era evidente el arrastre de material volcánico al fondo de la cuenca generando el acomodo de sucesivos depósitos .Las cenizas, producto de las erupciones depositadas en la oquedad y los acarreos fluviales constituyeron a través del tiempo un suelo arcilloso ,compresible del Valle de la Ciudad de México.

La estratigrafía del subsuelo de la Ciudad de México se puede observar en la figura 1.1 .Sobresalen diversas formaciones como el Cerro de la Estrella,Peñón del Marqués,el Pedregal,así como la cadena montañosa de conos volcánicos de la Sierra de Santa Catarina,el Cerro de Xico y el de Tlapacoya.Además se distinguen zonas geológicas aisladas ,tales como formaciones volcánicas de lavas basálticas ,andesíticas aluviales y lacustres pertenecientes al período cuaternario.La formación de Depósitos Lacustres (QI) pertenece al período del Cuaternario ,la unidad está constituida principalmente por arcillas y limos con algunas intercalaciones de gravas y arenas , con escasos horizontes de tobas mal definidos .En el interior de la Cuenca de la Ciudad de México existe intercalado dentro de la arcilla y a una profundidad de alrededor de 30[m] ,existe un estrato llamado capa dura(CD).En otras partes del Valle existen capas similares a profundidades diversa,proviene de erupciones originadas en el Volcán Cerro de la Palma [II2017].La formación Aluvial (Qal),pertenece al período Cuaternario con menor extensión que la superficie lacustre.Dichos depósitos se caracterizan por la alternancia de capas correspondientes a fases de acumulación de piroclastos ,residuos rocosos,material arenoso y limos interestratificados con lavas.

1.4.2 COMPOSICIÓN E IDENTIFICACIÓN DE LOS SUELOS

De acuerdo a [ALMAN] ,las series arcillosas son materiales heterogéneos formados principalmente por :limos y arcillas de alta plasticidad con microorganismos y varios minerales .Con respecto a la microestructura ,los suelos con alta humedad presentan una microestructura dispersa,flocculada e irregular .El contenido de agua es una de las características más importantes de las arcillas,debido al fenómeno de consolidación y compresibilidad ,los suelos lacustres del Valle de México contribuyen al hundimiento regional.

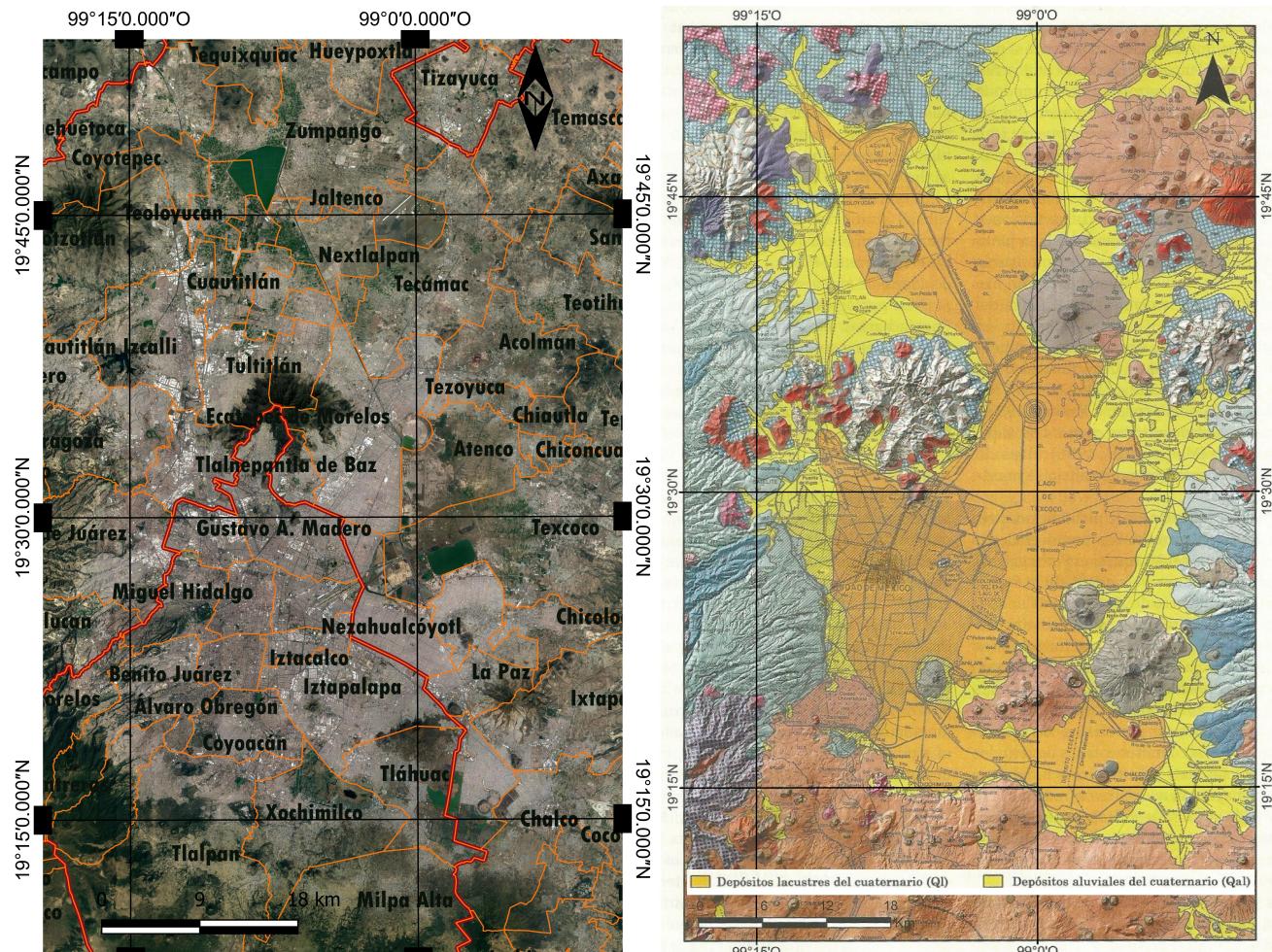


Figure 1.1: Rellenos aluviales en el poniente de la Ciudad de México. Modificado de [II2017]

1.4.3 HUNDIMIENTO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

R.J Marsal y M. Mazari(1959) consideraron al hundimiento como un fenómeno de gran importancia debido a la manifestación de problemas de estabilidad en las construcciones asentadas específicamente al fondo del antiguo Lago de Texcoco. El fenómeno del hundimiento por consolidación regional que presenta la planicie cubierta antiguamente por los lagos del Valle de México continua ,con efectos que se van acumulando a través del tiempo causando asentamientos totales y diferenciales de gran importancia[CARN]. Con la creciente población de la metrópoli, se solucionó el problema del abastecimiento de agua mediante la explotación del acuífero de la cuenca. La explotación de pozos artesianos* se sustituyó rápidamente mediante el bombeo de agua de pozos profundos, este bombeo induce abatimientos piezométricos† que conducen a un aumento de esfuerzos efectivos‡ en el subsuelo las cuales inducen deformaciones y causa un hundimiento de magnitud variable.

1.4.4 VELOCIDADES DE HUNDIMIENTO EN EL VALLE DE MEXICO

"En la parte superior de la figura 1.2 se muestra la distribución espacial de la celeridad del hundimiento para el periodo 1999-2008 en la zona lacustre del Valle de México(Auvinet et al.2015a). Se observa que la velocidad de hundimiento se acerca en algunos sitios a 40[cm/año]. La elaboración del mapa se realizó mediante la combinación de datos que los autores obtuvieron de varias dependencias. Cabe señalar que actualmente los sitios de mayor celeridad ya no ubican en la antigua traza de la Ciudad; ahora se localizan en varios sitios del oriente y del sur del Valle de México. Estos sitios corresponden a las zonas donde el subsuelo presenta mayores espesores de arcilla."(Auvinet, Méndez, Juárez,2017, p. 193)

1.4.5 AGRIETAMIENTO DEL SUELO

El problema del agrietamiento del suelo constituye un grave factor de riesgo ,la presencia de grietas debe tomarse en cuenta en el diseño de construcciones e instalaciones para evitar o disminuir el daño que puedan ocasionar a edificaciones .Este fenómeno tiene distintas causas que de acuerdo a Auvinet ,Méndez y Juárez(2008)se puede deber a:(a)La contracción de las arcillas lacustres por secado.(b)La existencia de esfuerzos de tensión asociados al peso de las construcciones.(c)El fracturamiento hidráulico en zonas de encharcamiento y los movimientos sísmicos.Las grietas más importantes y de orden destructivo son consecuencia directa de la consolidación regional por efecto de bombeo de agua en estratos profundos. El Valle de México,específicamente la zona de transición, presenta un agrietamiento asociado subsidencia, por efecto del bombeo de agua a estratos profundos ,este tipo de grietas se presentan en las zonas de transición abrupta entre los contactos de suelos firmes con suelos blandos. El mapa de la figura 1.3.a ,se puede observar la distribución espacial de grietas ,la figura 1.3.b ,se muestra las zonas que han experimentado agrietamiento por consolidación regional en la zona de transición abrupta(rojo,zonas más susceptibles al agrietamiento).

*Hoyo que se excava en la tierra o en la roca hasta dar con el agua contenida a presión entre las capas subterráneas.

†Pérdida de altitud o profundidad (en relación a la superficie del suelo) del límite entre la capa freática y la zona vadosa en un acuífero.Este nivel se mide usando un piezómetro.

‡Es una medida de la carga transmitida por la estructura del suelo.Comportamiento de resistencia y cambios volumétricos de un suelo.

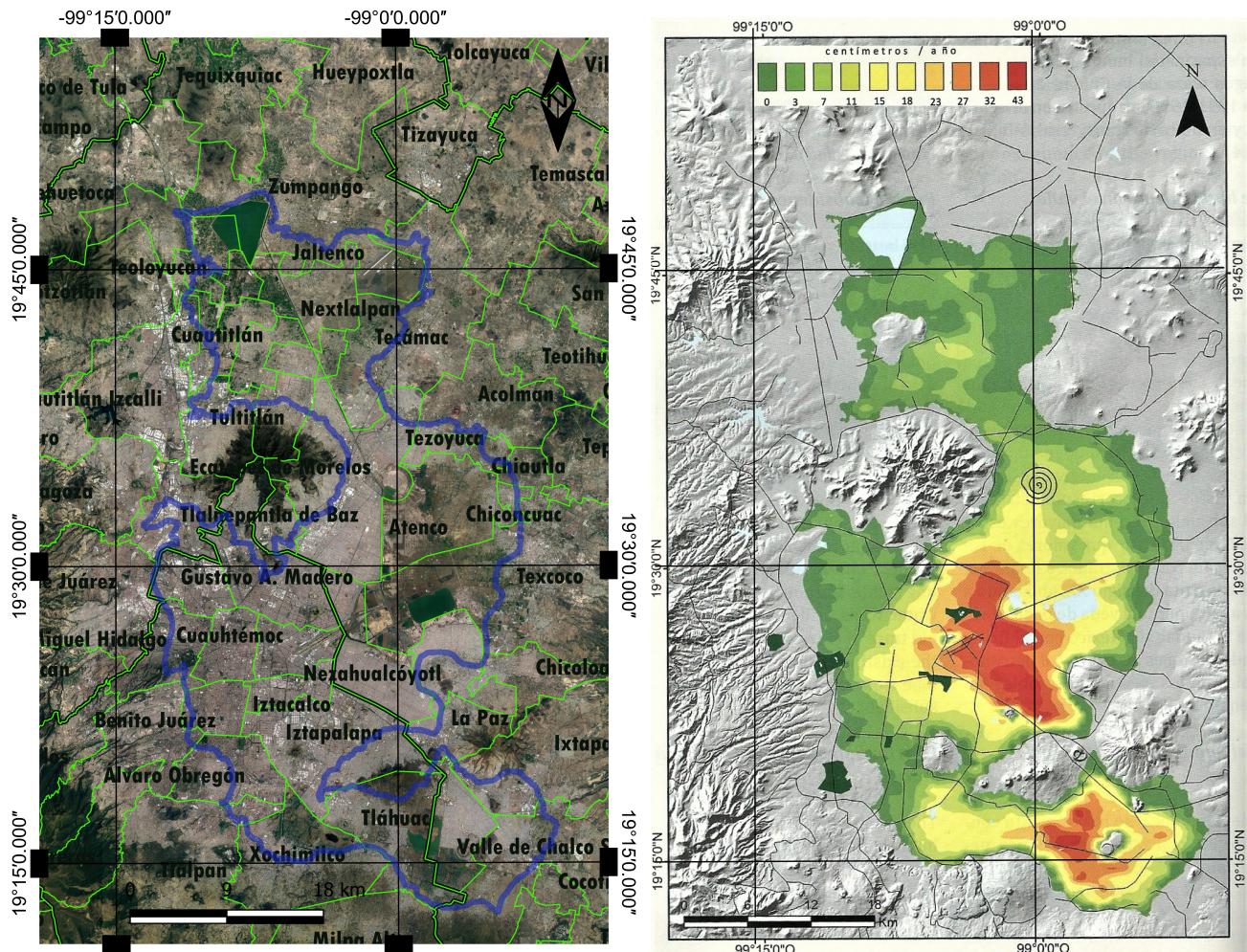


Figure 1.2: Auvinet, Méndez, Juárez. Mapa de velocidades de hundimiento. Modificado de [II2017].

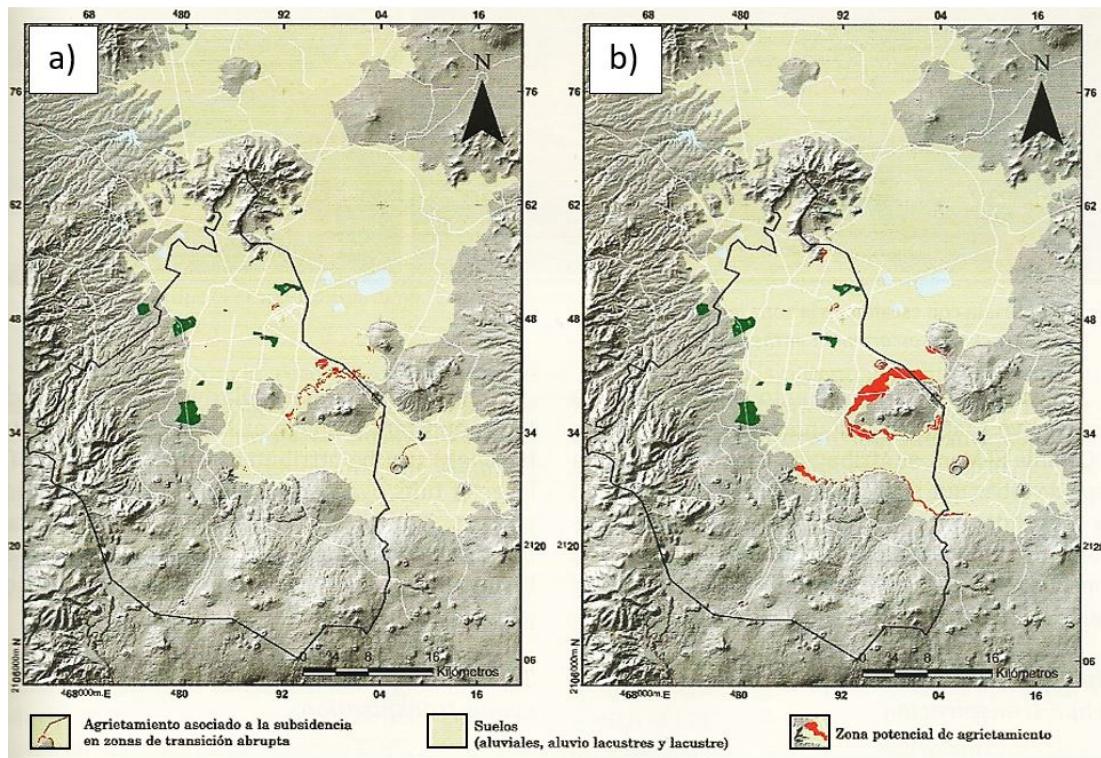
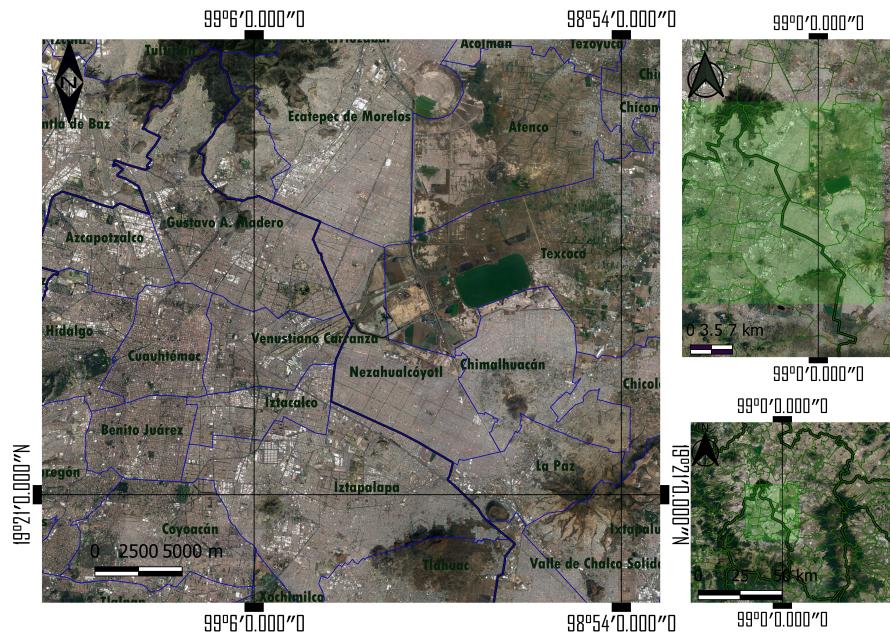


Figure 1.3: Auvinet, Méndez, Juárez.Zonas potenciales de agrietamiento por consolidación regional en zonas de transición abrupta.Modificado de :[II2017]



1.5 ZONA DE ESTUDIO

La zona a estudiar se encuentra al oriente del Valle de México la cuál se encuentra encerrada por una cuenca de manera natural.Fisiográficamente el oriente del Valle de México se divide en subregiones :la parte sur de Chalco ,la parte central de Texcoco y la parte norte de Temascalapa .

1.6 CAPÍTULOS

La presente tesis presenta la siguiente estructura :

En el capítulo 1 se presenta un panorama general de la razón por la cual de eligió el tema a desarrollar en la tesis , una descripción del problema que se pretende resolver ,los objetivos y alcances del presente trabajo de investigación.

En el capítulo 2 se introduce brevemente a la técnica a emplearse.Es decir ,la teoría referente a los sensores SAR y la técnica InSAR(Interferometría de Radar de Apertura Sintética),que va a ser la técnica que va a fundamentar el proyecto con base al planteamiento del problema que se ha realizado.

En el capítulo 3 se abordan las bases teóricas de la investigación las cuales sustentan el proyecto de investigación y el flujo de trabajo para realizar el proceso de semiautomatización para la detección de fallas.Se describe la parte operacional de la tesis,en donde se desarrolla el método y las distintas operaciones a las que serán sometidos los datos ,el procedimiento realizado para llevar a cabo la investigación aplicado a un caso particular de estudio,Iztapalapa ,Ciudad de México.

En el capítulo 4 se expone un panorama conceptual sobre el análisis de datos .Se hace una descripción de algunos elementos importantes de los interferogramas ,mapas de desplazamiento ,mapas de velocidades y principalmente se valida el resultado de la investigación .

Coordenadas básicas a partir de las cuales se desarrolla la técnica InSAR(Interferometría de Radar de Apertura Sintética) y el término asociado SAR(Radar de Apertura Sintética). A los efectos de la coincidencia espacial y temporal de dos o más ondas se le llama interferencia. La interferometría es un método de medición que aplica el fenómeno de interferencia de las ondas (generalmente, ondas de luz, radio o sonido).

2

Introducción

2.1 SENSORES SAR

2.1.1 EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Se define la propagación como un mecanismo de transporte de energía en el espacio y en el tiempo. Una onda es una propagación de una perturbación de alguna propiedad en un medio determinado, la propagación simultánea de los campos eléctrico y magnético producidos por una carga eléctrica en movimiento describe a una onda electromagnética. Las principales características de las ondas electromagnéticas son las siguientes;(a)No necesitan un medio para propagarse,pueden propagarse en el vacío o en cualquier otro medio;(b)Son tridimensionales,se propagan en tres direcciones del espacio y (c)son transversales,la perturbación se produce perpendicularmente a la dirección de propagación.

ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Al flujo saliente de energía de una fuente en forma de ondas electromagnéticas se le denomina radiación electromagnética. Esta radiación puede ser de origen natural o artificial. El espectro electromagnético es el conjunto de todas las frecuencias (número de ciclos de la onda por unidad de tiempo) posibles a las que se produce radiación electromagnética.Las ondas electromagnéticas son tratadas y moduladas (normalmente, variando de forma controlada la amplitud, fase y/o frecuencia de la onda original), para emplearse para la transmisión de información, dando lugar a una forma de telecomunicación.Las ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias se usan para la transmisión de información por medios guiados (par trenzado, cable coaxial, fibra óptica, etc.) y por medios no guiados (normalmente el aire o el vacío).Las frecuencias utilizadas en cada caso dependen del comportamiento de las mismas en los diferentes materiales utilizados como medios de transmisión, así como de la velocidad de transmisión deseada.

DIVISIÓN DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

No todas las ondas electromagnéticas tienen el mismo comportamiento en el medio de propagación, la misma procedencia o la misma forma de interacción con la materia. Por ello, el espectro electromagnético se divide convencionalmente en segmentos o bandas de frecuencia. Esta división se ha realizado en función de diversos criterios, y en todo caso no es exacta, produciéndose en ocasiones solapamientos en las bandas, pudiendo una frecuencia quedar por tanto incluida en dos rangos (por ejemplo, debido a diferentes fenómenos físicos que originan la radiación, o a diferentes aprovechamientos de la energía radiada a una frecuencia concreta). La clasificación más típica del espectro electromagnético establece las siguientes categorías de radiación electromagnética (Figura 2.1).

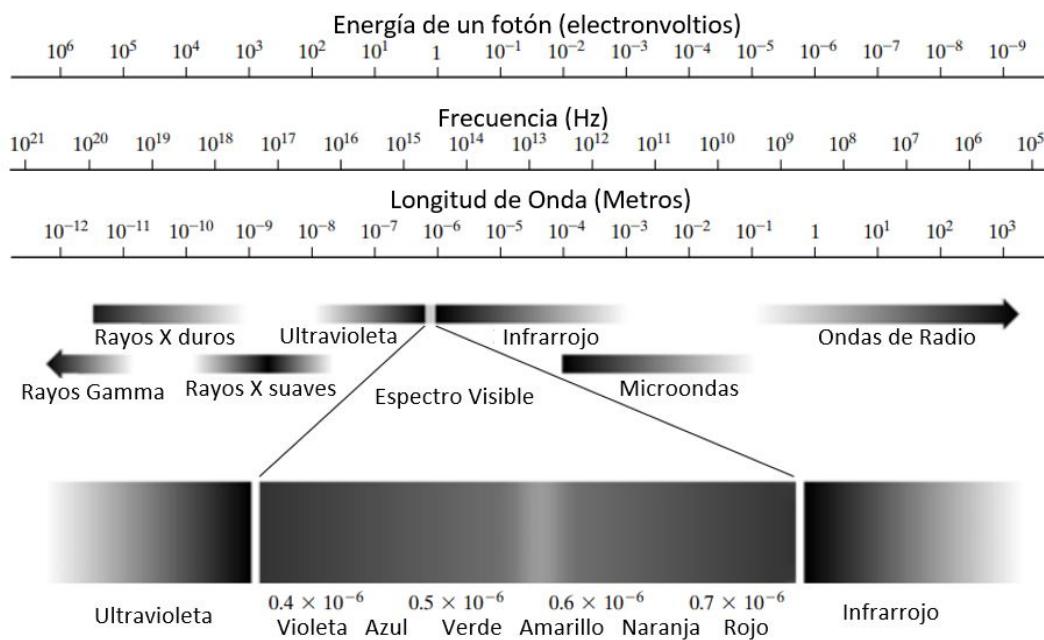


Figure 2.1: Gonzalez Rafael C. y Woods Richard E., El espectro electromagnético. Modificado de :[GONWOOD].

Cada segmento del espectro electromagnético en general se comporta de forma diferente en su propagación por el medio de transmisión. Existen multitud de aspectos a considerar para establecer diferentes clasificaciones del espectro electromagnético y para utilizar las diferentes frecuencias para distintos propósitos. Entre los elementos a tener en cuenta se encuentran: Atenuación con la frecuencia; (1) Frecuencia, a menor frecuencia menor atenuación de la señal y por tanto mayor alcance o cobertura; (2) Afectación de la climatología, factores como lluvia, nieve, niebla, calor, no afectan por igual a las diferentes frecuencias del espectro; (3) Comportamiento frente a obstáculos, importante para cubrir grandes distancias; (4) Capacidad de penetración de la señal la cual varía con la frecuencia; (5) Capacidad de transmisión de acuerdo a un ancho de banda, a frecuencias bajas hay menos espectro disponible para compartir y las tasas de transmisión son muy bajas; (6) Comportamiento frente a las capas atmosféricas, las distintas frecuencias no se comportan igual en la ionosfera o en la troposfera, existen ondas que se propagan por la superficie terrestre.

2.1.2 SENSOR Y ADQUISICIÓN

Dependiendo de la naturaleza de la fuente, la energía de iluminación se refleja o se transmite a través de los objetos. La Figura 2.2 muestra los tres arreglos principales de sensores utilizados para transformar energía de iluminación en imágenes digitales. El funcionamiento es el siguiente: la energía entrante se transforma en un voltaje mediante la combinación de la energía eléctrica de entrada y el material del sensor que responde al tipo particular de energía que se detecta. La forma de onda del voltaje de salida es la respuesta de los sensores, y se obtiene una cantidad digital de cada sensor digitalizando su respuesta.

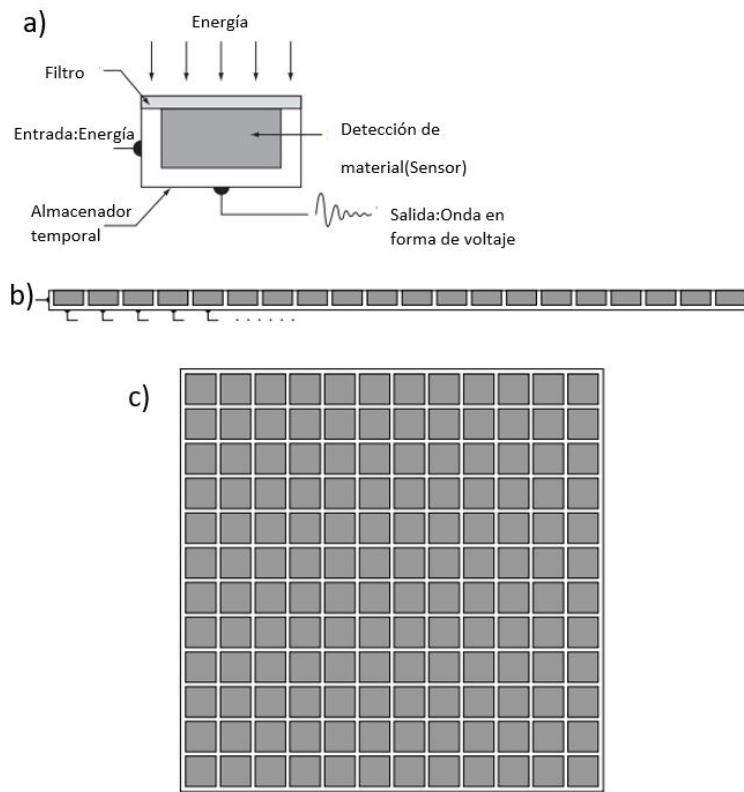


Figure 2.2: Gonzalez C.Rafael , Woods Richard E.Illustración:(a) Sensor de imagen único.(b) Sensor de línea.(c) Sensor de matriz.Modificado de :[GONWOOD] .

ADQUISICIÓN DE IMÁGENES CON FRANJAS DE SENSORES

Una geometría que se usa con mucha frecuencia es la disposición en línea de sensores en forma de una tira de sensores, como se muestra en la figura 2.2.b. La tira proporciona elementos de imagen en una dirección. El movimiento perpendicular a la tira proporciona imágenes en la otra dirección, como se muestra en la figura 2.3. Los sensores en línea se usan de manera rutinaria en aplicaciones de imágenes en el aire, en las que el sistema de imágenes es montado en un avión que vuela a una altitud y velocidad constantes sobre el área geográfica a ser fotografiada. Se montan tiras de sensores de imágenes unidimensionales que responden a varias bandas del espectro electromagnético perpendicular a la dirección de vuelo. La tira de imágenes proporciona una línea de imagen a la vez, y el movimiento

de la tira completa la otra dimensión de una imagen bidimensional. Las lentes u otros esquemas de enfoque se utilizan para proyectar el área a escanear en los sensores. El número de sensores en la tira establece las limitaciones de muestreo en una dirección de imagen.

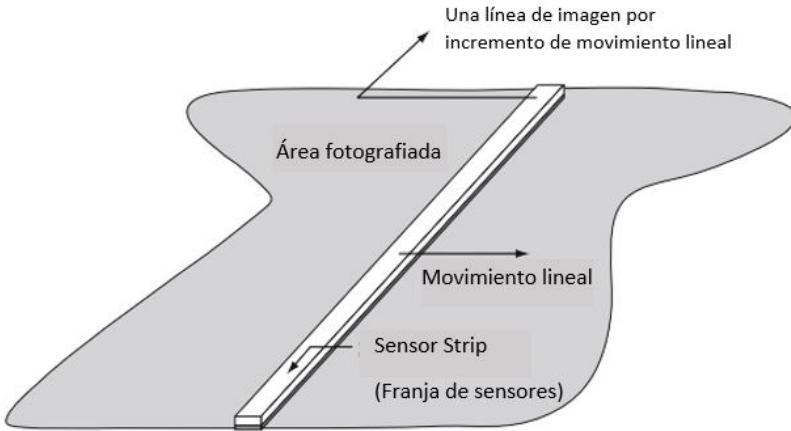


Figure 2.3: Gonzalez C.Rafael , Woods Richard E.Illustración:Adquisición de imágenes utilizando una tira de sensor lineal.Modificado de :[GONWOOD] .

UN MODELO DE FORMACIÓN DE IMAGEN SIMPLE

Se puede denotar a una imagen mediante funciones bidimensionales de la forma $f(x, y)$. El valor o la amplitud de f en coordenadas espaciales (x, y) es una cantidad escalar positiva cuyo significado físico está determinado por la fuente de la imagen. Cuando se genera una imagen de un proceso físico, sus valores son proporcionales a la energía radiada por una fuente física. Como consecuencia, $f(x, y)$ debe ser distinto de cero y finito; es decir

$$0 < f(x, y) < \infty \quad (2.1)$$

La función $f(x, y)$ se caracteriza por dos componentes: (1) la cantidad de iluminación de la fuente incidente en la escena que se está viendo, y (2) la cantidad de iluminación reflejada por los objetos en la escena, estos componentes se llaman iluminación y reflectancia y se denotan por $i(x, y)$ y $r(x, y)$, respectivamente. Las dos funciones se combinan como producto para forma $f(x, y)$:

$$f(x, y) = i(x, y)r(x, y) \quad (2.2)$$

La naturaleza de $i(x, y)$ está determinada por la iluminación de la fuente, y $r(x, y)$ está determinado por las características de los objetos fotografiados. La idea básica detrás del muestreo de una imagen se ilustra en la figura 2.4. Figura 2.4 (a) muestra una imagen continua, $f(x, y)$, que se quiere convertir a una forma digital. Una imagen puede ser continua con respecto a las coordenadas x y y , y también en amplitud. Para convertirlo a forma digital, es necesario muestrear la función en ambas coordenadas y en amplitud. Digitalizar los valores de coordenadas es llamado muestreo. La digitalización de los valores de amplitud se denomina cuantización.

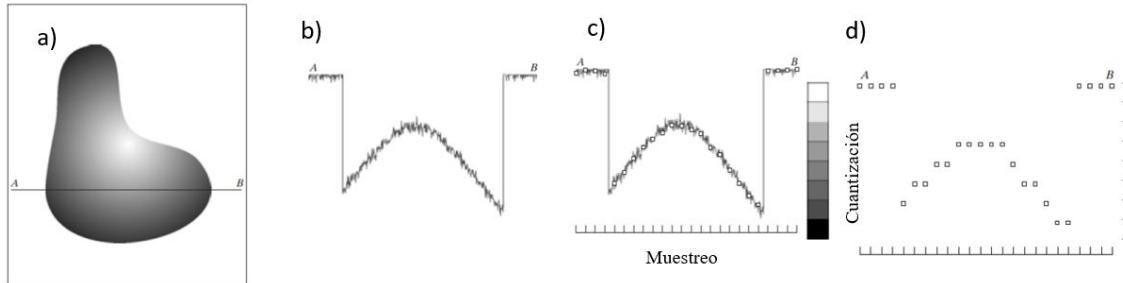


Figure 2.4: Gonzalez C.Rafael , Woods Richard E.Illustración:Generando una imagen digital. (a) Imagen continua. (b) Una línea de escaneo desde A a B en la imagen continua. (c) Muestreo.(d) Línea de escaneo digital.Modificado de :[GONWOOD].

2.1.3 IMÁGENES RADAR Y SAR

IMÁGENES EN LA BANDA DE MICROONDAS

Las microondas constituyen el segmento superior del espectro radioeléctrico*. Habitualmente se consideran microondas aquellas ondas radioeléctricas entre 300 [Mhz] y 30 [Ghz]. La aplicación dominante de las imágenes en la banda de microondas es el radar. La característica de las imágenes de radar es su capacidad de recopilar datos sobre prácticamente cualquier región en cualquier momento, independientemente del clima o las condiciones de iluminación ambiental. Algunas ondas de radar pueden penetrar en las nubes y, bajo ciertas condiciones, también pueden ver a través de la vegetación, el hielo y la arena extremadamente seca. En muchos casos, el radar es la única forma de explorar regiones inaccesibles de la superficie de la Tierra. Un radar de imágenes funciona como una cámara de flash, ya que proporciona su propia iluminación (pulsos de microondas) para iluminar un área en el suelo y tomar una imagen instantánea. En lugar de una lente de cámara, un radar utiliza una antena y un procesamiento de computadora digital para grabar sus imágenes. En una imagen de radar, solo se puede ver la energía de microondas que se reflejó hacia la antena del radar.

LA IMAGEN SAR Y LOS CONCEPTOS DE RESOLUCIÓN

El término SAR hace referencia al acrónimo en Inglés *Synthetic Aperture Radar*(Radar de Apertura Sintética). Un SAR es un método formador de imágenes mediante microondas, activo, cuya principal aplicación tiene como principal aplicación en percepción remota la formación de mapas ,aprovechando las propiedades de dispersión de la superficie terrestre . Las regiones brillantes en una imagen de radar representan la amplitud de la energía de la onda devuelta, que depende de la pendiente de la superficie y la rugosidad y las características dieléctricas del material superficial. El sistema formador de imágenes más simple mediante radar se denomina RAR, del inglés *real aperture radar* . En una configuración RAR, las dimensiones de la antena definen a la resoluciónn azimutal y mientras más grande sea la antena, mayor será está resolución. Sin embargo, un SAR supera por mucho en resolución azimutal a un RAR.

*Espectro radioeléctrico ,se trata del medio por el cual se transmiten las frecuencias de ondas de radio electromagnéticas que permiten las telecomunicaciones (radio, televisión, Internet, telefonía)

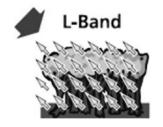
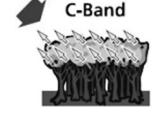
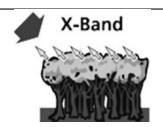
| Banda | Rango de frecuencia [Ghz] | Longitud de Onda[cm] | Satélite | Penetración |
|--------------------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------------------|---|
| Banda L | 1-2 | 15.0-30.0 | J-ERS y ALOS |  |
| Banda C | 4-8 | 3.75-7.50 | ERS, Envisat, Sentinel, Radarsat |  |
| Banda X | 8-12 | 2.50-3.75 | X-SAR |  |
| Región del espectro electromagnético | | | | |
| Denominación | | Longitud de Onda[cm] | Rango de frecuencia | |
| Microondas | | 0.1-100 | 300[Mhz] y 30 [Ghz] | |

Table 2.1: Los sistemas SAR satelitales operativos funcionan en alguna de las siguientes bandas de microondas. El dibujo inferior en el recuadro refiere a la “penetración” de las bandas [MOREI].

CONGRUENCIA ENTRE BANDA Y ESPECTRO

La importancia de la banda presente en cualquier satélite afecta directamente en la penetración de la señal en la superficie terrestre ,ejemplo de ello, si a banda L corresponde al dominio en longitudes de onda $15 \leq \lambda \leq 30$ en centímetros [$\text{cm}=10^{-2}\text{m}$] y al dominio en frecuencia dado por $1 \leq \tau \leq 2$ en GHz [$\text{GHz}=10^9\text{Hz}$] (ver Tabla 2.1). Como $\tau = c/\lambda$, entonces

$$\lambda = 15[\text{cm}] = 3x5x10^{-2}[\text{m}] \implies \tau = \frac{c}{\lambda} = \frac{3x10^8[\text{m/s}]}{3x15x10^{-2}[\text{m}]} = 2[\text{GHz}] \quad (2.3)$$

Por consiguiente $\lambda = 30[\text{cm}] \implies \tau = 1[\text{GHz}]$

ESTIMACIÓN DE UN RANGO

Cuando un objeto se encuentra a una distancia $r_{obj}[\text{m}]$ respecto de una antena radar, una señal modulada en frecuencia, es emitida y enviada por la antena. La antena cambia de modalidad emisora a receptora a intervalos de tiempo cortos Δt (a una frecuencia de pulso $\tau_c = 1/\Delta t$ [GHz]). La antena puede determinar el tiempo t_{obj} [seg] que le toma al pulso recorrer la distancia r_{obj} dos veces (de la antena al objeto y del objeto a la antena), siempre que $\Delta t \leq t_{obj}$. Como la velocidad a la que se mueve el pulso es $c=3x10^8[\text{m/s}]$ (la velocidad de la luz), se sigue que,

$$v = \frac{d}{t} \implies c = \frac{2r_{obj}}{t_{obj}} \implies r_{obj} = \frac{ct_{obj}}{2} \quad (2.4)$$

donde t_{obj} es conocido como tiempo de retardo (como se cita en Téllez Quiñones, 2018).

RESOLUCIÓN EN RANGO OBLICUO(SLANT RANGE)

Para encontrar la distancia o rango (r) a la cual se encuentra un objeto arbitrario, conociendo el tiempo de retardo "t", es claro que $r = ct/2$, despejando, $r/t=c/2 \Rightarrow dr/dt=c/2$. Esto ayuda a la siguiente expresión

$$\frac{\Delta r}{\Delta t} \approx \frac{c}{2} \Rightarrow \Delta r \approx \frac{c\Delta t}{2} = \frac{c}{2} * \frac{1}{\tau_c} = \frac{c}{2\tau_c} \quad (2.5)$$

Donde Δt o τ_c representa el periodo o ancho del pulso el cual describe la duración del chirp o pulso modulado en frecuencia. Es decir $\Delta t=\tau_c$ y $\tau_c=1/c$.

Ejemplo sobre el cálculo de la resolución en rango oblicuo: Si se tiene un radar cuyo ancho de pulso modulado en frecuencia es $\Delta t=64[\text{ns}]$ (es decir $\tau_c=15.55[\text{MHz}]$), entonces

$$\Delta r = \frac{c\Delta t}{2} = \frac{3 \times 10^8 [\text{m/s}] * 64 \times 10^{-9} [\text{s}]}{2} = 9.6 [\text{m}] \quad (2.6)$$

Se puede decir que el sistema va a tener una resolución en rango oblicuo de 9.6[m].

FOOTPRINT Y SWATH

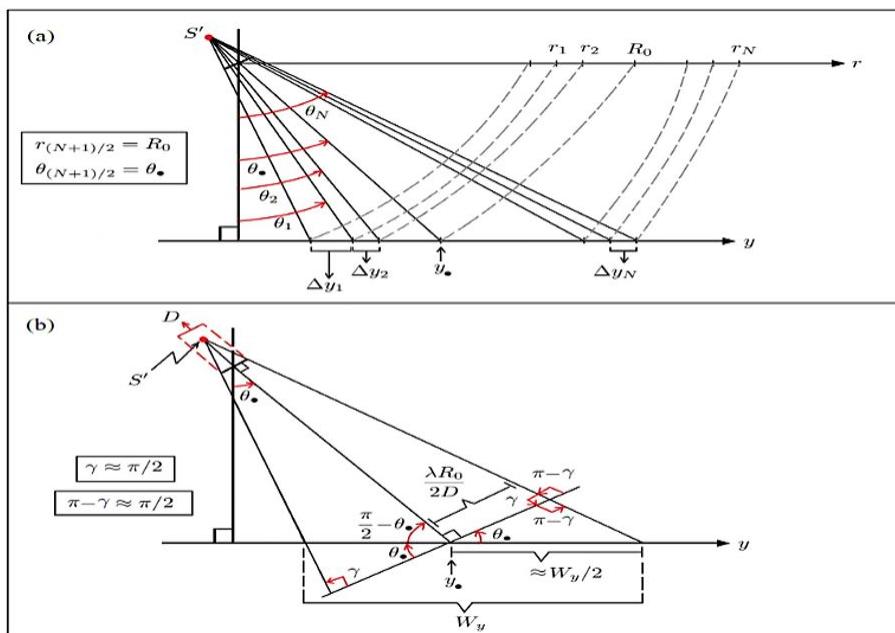


Figure 2.5: Téllez Quiñones Alejandro.(a) Representación de la resolución en rango terrestre $\Delta y_n = \Delta r / \sin(\theta_n)$, el cual depende del ángulo θ_n con $n=1, \dots, N-1$. En este caso $\Delta r = r_{n+1} - r_n$ es constante y y_\bullet es una coordenada casi central respecto a la distribución de los rayos a lo largo del eje y .(b) Representación del footprint a lo largo del rango terrestre, en el cual la distancia W_y es llamada swath. Considerando a Z como la altura satelital, se tiene que $\cos(\theta_\bullet) = Z/R_0$. Modificado de:[QUIA1]

De acuerdo Tellez Alejandro(2018) se puede interpretar al footprint, como la huella de radiación que una antena rectangular (o el panel de una antena) proyecta sobre el terreno terrestre. Esta huella de radiación sobre el terreno tiene forma de una mancha tipo sinc al cuadrado, distorsionada a lo largo del eje y , pero manteniendo su forma a lo largo del eje x . Sin embargo, es el lóbulo central de esta mancha

lo que corresponde propiamente al footprint, de la cual, su extensión a lo largo del eje y es conocida como swath. El swath se denota como W_y , así

$$W_y \approx \frac{\lambda R_0}{D \cos(\theta)} = \frac{\lambda R_0^2}{D Z} \quad (2.7)$$

D corresponde a la longitud de la antena en dirección perpendicular al rango central R_0 cuyo ángulo de look principal es θ . Un sistema SAR con una antena de longitud azimutal L, que emite una radiación λ , y que opera con un rango R_0 , el factor es

$$W_x = \frac{\lambda R_0}{L} \quad (2.8)$$

Esta ecuación puede describir el ancho azimutal del footprint de dicho sistema, tal y como se especifica en [HANSSEN] citado por [QUIA1]. A manera de ejemplo ilustrativo, un sistema SAR con $\lambda=0.056[\text{m}]$ (5.35[GHz], banda C), con una antena de longitudes $L=9.7[\text{m}]$ y $D=53[\text{cm}]$, trabajando a una altura $Z=800[\text{km}]$ con un ángulo de observación $\theta=23^\circ$, producirá un slant range de valor de $R_0 \approx 869.08[\text{km}]$. Con estos valores se puede obtener el footprint: $W_x \approx 5[\text{km}]$ y $W_y \approx 99.75[\text{km}]$. Cabe señalar que hay limitantes físicas para establecer la resolución rango oblicuo, también las hay para la resolución azimutal de un SAR. Si la antena es muy pequeña, habrá una mayor resolución pero se comprometería la ganancia del cociente-senal-ruido ya que esta ganancia es proporcional al cuadrado de la apertura del sistema. Es así que se muestra como el rango de frecuencia o banda del sensor del radar y otros factores como la altura del satélite en órbita por ejemplo, afectan en la resolución espacial de la imagen SAR.

SATÉLITES DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (SAR)

Los satélites con el Radar de Apertura Sintética (SAR) orbitan la Tierra en una órbita polar síncrona [†] y las adquisiciones de datos se pueden realizar en cualquier momento del día o de la noche, recolectando datos de amplitud y fase (Figura 2.8). Los satélites SAR tienen rutas repetidas y operan a frecuencias designadas con banda L, banda C y banda X que son las longitudes de onda predominantes. En la Figura 2.6 se muestra una tabla de misiones satelitales SAR pasadas, presentes y proyectadas.

SENTINEL 1

La misión Sentinel-1 comprende una constelación de dos satélites de órbita polar, que operan día y noche realizando imágenes de radar de apertura sintética en banda C, lo que les permite obtener imágenes independientemente del clima. La misión SENTINEL-1 incluye imágenes en banda C que operan en cuatro modos de imágenes exclusivos con diferente resolución (hasta 5 m) y cobertura (hasta 400 km). El sensor proporciona información con doble polarización en tiempos de revisión muy cortos y entrega rápidamente el producto. Para cada observación, se necesitan mediciones de la posición y altitud de la nave espacial. La misión se compone de una constelación de dos satélites, SENTINEL-1A(Descendente) y SENTINEL-1B(Ascendente), que comparten el mismo plano orbital. SENTINEL-1 está diseñado para funcionar en un modo de operación preprogramado y sin conflictos, capturando imágenes de todas las masas de tierra, zonas costeras, etc.

[†]Una órbita síncrona es una órbita geocéntrica que combina altitud e inclinación para lograr que un objeto en esa órbita pase sobre una determinada latitud terrestre a un mismo tiempo solar local.

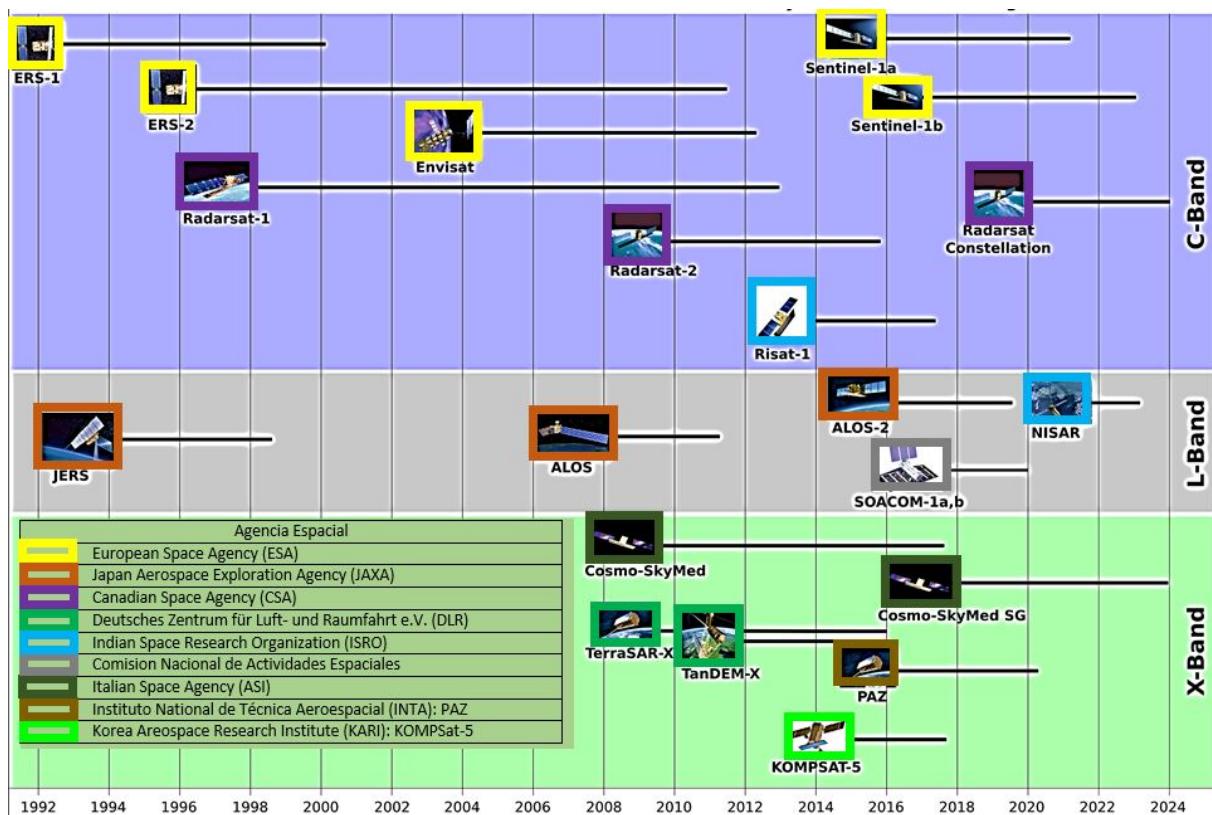


Figure 2.6: UNAVCO.Illustración :Varias agencias apoyan las diferentes misiones SAR. Modificado de:[UNAV]

| Nombre del Sensor | RADARSAT-2 | SENTINEL-1A | RISAT-1 |
|------------------------------------|---|-----------------------|---------------|
| Agencia | CSP | ESA | ISRO |
| Instrumento | C-banda SAR (5.4[GHz]) | | |
| Ángulo de incidencia | Side-looking,15-45°off-nadir | | 36.85° |
| Polarización | HH,HV,VV y VH | (VV y VH) ó (HH y HV) | HH y HV |
| Altura del sensor sobre el Ecuador | 789[km] | 693[km] | 542 [km] |
| Órbita | Sincrónica al sol(anochecer / amanecer) | | |
| Ciclo de repetición de órbita | 24 [días] | 12 [días] | 25 [días] |
| Resolución | 100[m] | 5[m]x20[m] | ≈25[m] |
| Ancho de Swath | 500[km](ScanSAR) | 250[km](IWS) | 115[km](MRS) |
| Lanzamiento | 14.Diciembre.2007 | 03.Diciembre.2014 | 26.Abril.2012 |
| Tiempo de vida | 7 [años] | 7 [años] | 5 [años] |

Table 2.2: Podest Erika.Características de Imágenes de Radar de Diferentes Satélites.Obtenido de:[PODES]

2.2 INTERFEROMETRÍA SAR

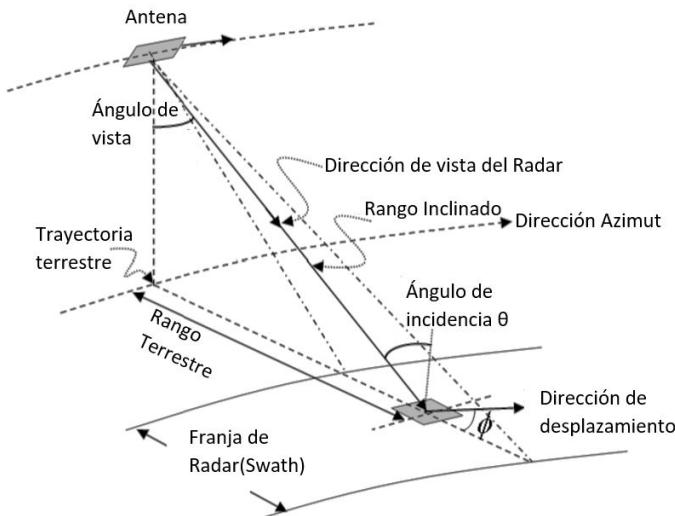


Figure 2.7: Xiaobing Zhou, Ni-Bin Chang y Shusun Li.Illustración :Modelo geométrico para un sistema SAR. El rango inclinado es la longitud entre la antena y el correspondiente pixel de tierra y el rango de tierra corresponde a la distancia entre la pista de tierra y el pixel de tierra. Modificado de [XINISH].

InSAR es una técnica de detección remota que utiliza dos o más imágenes de fase SAR adquiridas en diferentes momentos ,con las imágenes SAR es posible formar una imagen de diferencia de fase el cual se llama interferograma,en ella ,es posible observar un patrón,con la cuál es posible generar mapas con el fin de detectar y mapear cambios de propiedades espaciales y/o dieléctricas del suelo.La técnica mide directamente el cambio de fase entre dos mediciones de fase del mismo pixel terrestre de la superficie de la Tierra.Estas imágenes SAR ,pueden ser adquiridas de dos antenas ubicadas en la misma plataforma espacial,sin embargo durante la adquisición pueden estar separadas perpendicularmente (Figura 2.9-2.10) debido a la dirección del vuelo(dirección del azimut)(Figura 2.7).Cualquier factor puede

afectar la fase de la señal de radar retrodispersada, el patrón de franjas y el número de franjas en el interferograma, es por ello que se realizan consideraciones en la selección de las imágenes SAR y una serie de correcciones para poder obtener valores que describan el fenómeno a estudiar lo mejor posible.

2.2.1 CAMBIO DE FASE: MEDICIÓN BÁSICA DE IN SAR

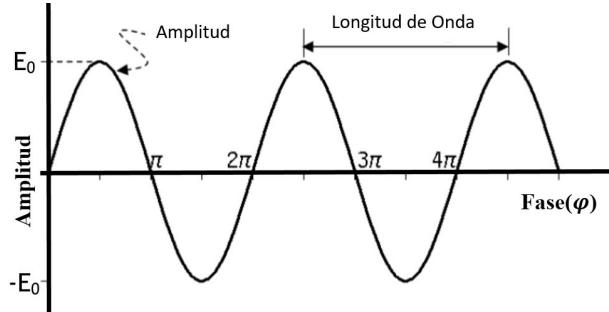


Figure 2.8: Xiaobing Zhou, Ni-Bin Chang y Shusun Li. Ilustración :Relación entre amplitud, fase y longitud de onda de una señal de radar. La intensidad de la señal del radar es proporcional a la amplitud al cuadrado. Modificado de [XINISH].

La expresión general para el campo eléctrico de una onda electromagnética plana, que es una solución de las ecuaciones de Maxwell, es:

$$E = E_0(R, t)e^{i(kR - \omega t)} = E_0(R, t)e^{i\Phi} \quad (2.9)$$

Donde $E_0(R, t)$ corresponde a la amplitud del pulso electromagnético y la fase del ángulo es:

$$\Phi = kR - \omega t \quad (2.10)$$

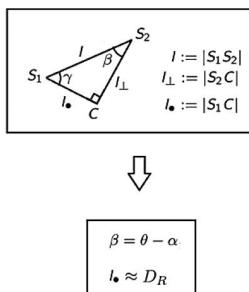
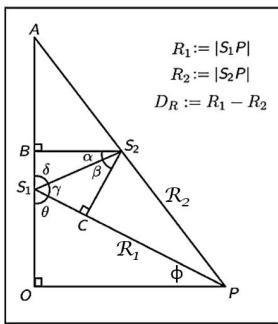
$K=K\hat{e}$ es el vector de onda complejo (\hat{e} es un vector unitario en la dirección de propagación), k representa el número de onda complejo. La onda se propaga a lo largo del vector espacial R (distancia oblicua). ω es la frecuencia angular de la onda y t el tiempo. Por lo tanto, el eco recibido por la antena de un radar de imágenes de un píxel terrestre se caracteriza por dos cantidades: amplitud y fase(Figura 2.9).

Cuando se tienen un par de imágenes SAR complejas $\mu_1=A_1e^{i(\Phi_{1scat}+\Phi_{1scat})}$ y $\mu_2=A_2e^{i(\Phi_{2scat}+\Phi_{2scat})}$ de la misma zona geográfica, es posible construir una tercera imagen que contenga la información combinada de los términos de fase, $\Phi_1=4\pi R_1/\lambda$ y $\Phi_2=4\pi R_2/\lambda$. Las imágenes μ_1 y μ_2 se obtienen de las capturas de las posiciones S_1 y S_2 considerando un ángulo de elevación $\alpha=0$ entre las dos posiciones de captura(Figura 2.9). Si se considera que las componentes de retrodispersión de estas imágenes, Φ_{1scat} y Φ_{2scat} , son iguales, es posible realizar la multiplicación de la imagen 1 con el complejo conjugado de la imagen 2.

$$u = \left[\frac{\mu_1}{|\mu_1|} \right] \left[\frac{\mu_2^*}{|\mu_2|} \right] = e^\Phi = \cos(\Phi) + i\sin(\Phi) \quad (2.11)$$

Seguidamente se calcula ,para la parte real e imaginaria

$$s_\Phi = \text{imag} \left[\frac{\mu_1 \mu_2^*}{|\mu_1||\mu_2|} \right], c_\Phi = \text{real} \left[\frac{\mu_1 \mu_2^*}{|\mu_1||\mu_2|} \right] \quad (2.12)$$



$$\beta = \theta - \alpha$$

$$l_* \approx D_R$$

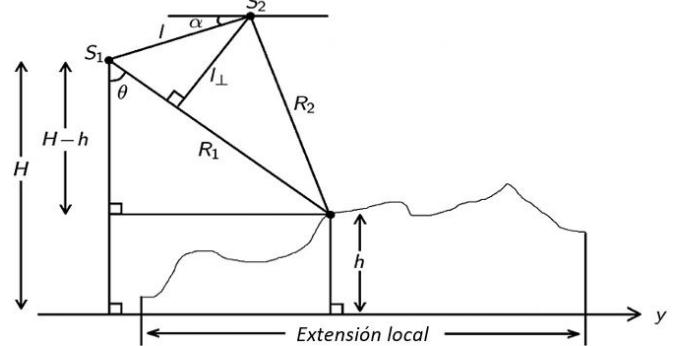


Figure 2.9: Téllez Quiñones Alejandro. Ilustración de la geometría de adquisición SAR detectadas desde las posiciones S1 (maestro) y S2 (esclavo). Modificado de:[QUIA2]

Figure 2.10: Téllez Quiñones Alejandro. Relación entre la topografía de una extensión local de terreno y la fase interferométrica asociada a un par de imágenes SAR de la misma zona, detectadas desde las posiciones S1 (maestro) y S2 (esclavo). Modificado de:[QUIA2]

μ_2^* corresponde al complejo conjugado de μ_2 y

$$\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = \frac{4\pi D_R}{\lambda} \quad (2.13)$$

La fase Φ , es lo que se conoce como fase interferométrica asociada a μ_1 y μ_2 . El ángulo θ , se encuentra referido a la imagen maestra μ_1 , permite relacionar intrínsecamente a la topografía de la zona geográfica con el término Φ . Cuando $\alpha=0$, la línea de base ortogonal (orthogonal baseline) inducida por la posición S2 o imagen esclava μ_2 , está dado por

$$l_{\perp} = l \cos(\theta) \quad (2.14)$$

l_{\perp} describe la línea base, es decir, la separación de las posiciones S1 y S2, las variables $\Phi, R_1, R_2, D_R, l_{\perp}$ y θ (Figura 2.9), son dependientes de (x, R).

2.2.2 FASES ENVUeltas O INTERFEROGRAMAS SAR

Un interferograma o patrón interferométrico, en el lenguaje de SAR, corresponde al patrón de franjas resultante de la estimación de Φ , mediante una función equivalente a arctan o tangente inversa. La señal $u = e^{i\Phi}$, un interferograma SAR corresponde a la imagen resultante de la operación:

$$\psi = W[\Phi] := \text{arctan2}[Im(u), Re(u)]\psi := \text{arctan2}[s_{\Phi}, c_{\Phi}] \quad (2.15)$$

Donde $Re(u)$ e $Im(u)$, son las partes real e imaginaria de u . En este caso ψ es una función discontinua comprendida entre $\pi \leq \psi \leq \pi$, el cual recibe el nombre de fase envuelta (wrapped phase) una función descrita en términos del operador de envolvimiento W [Ghiglia, citado de Tellez Quiñonez], la salida del operador W , específicamente ψ , requiere ser desenvuelta para poder estimar Φ .

2.2.3 DETECCIÓN DE CAMBIO DE RANGO DE INTERFEROGRAMA

Para derivar el desplazamiento del suelo de un interferograma, los efectos debidos a la topografía, la línea base, el cambio, la atmósfera, el cambio de propiedad dieléctrica de la superficie del suelo, el ruido

del sistema y el ajuste de fase se pueden corregir en principio de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} D_R + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{HB_{\perp}}{R\sin\theta} + \frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel} + \Delta\Phi_{atm} + \Delta\Phi_{dielectric} + \Delta\Phi_{pn} + 2n\pi \quad (2.16)$$

Donde D_R es el desplazamiento de la línea de visión (LOS) (desplazamiento de superficie en la dirección entre satélite y píxel terrestre), λ es la longitud de onda del sistema SAR, B_{\perp} y B_{\parallel} son la vertical y componentes paralelos de la separación de la órbita de referencia del par de imágenes SAR, H es la altura de un píxel sobre una superficie de referencia, R el rango inclinado entre el píxel de tierra y la antena de la imagen maestra. θ es el ángulo de incidencia local, el ángulo entre el haz del radar y una línea perpendicular a la superficie en el punto de incidencia.

CORRECCIONES DE LA FASE

En la ecuación (2.16), el primer término representa el componente de la fase interferométrica debido a la LOS(diferencia de rango),esta diferencia de rango puede deberse a la deformación de la superficie durante el intervalo de tiempo de adquisición de datos.El segundo término de la ecuación corresponde al efecto topográfico.Para calcular el efecto topográfico,es necesario utilizar un modelo de elevación digital preciso (DEM),posteriormente se genera un interferograma sintetizado del DEM. Para eliminar el efecto topográfico, este interferograma sintetizado se resta del interferograma diferencial original sin procesar.El tercer término de la ecuación,describe el cambio de fase de la imagen esclava en relación con la imagen maestra debido a un cambio en la trayectoria orbital entre las dos adquisiciones de imágenes por B_{\parallel} en el LOS.El cambio de fase debido a la línea de base paralela B_{\parallel} puede estimarse utilizando órbitas precisas. $\Delta\Phi_{atm}$,representa el efecto atmosférico.Este componente de la fase atmosférica es difícil de calcular. Un método práctico para reducir el efecto atmosférico en un interferograma ,es generar y combinar múltiples interferogramas, una técnica conocida como apilamiento. $\Delta\Phi_{dielectric}$ en la ecuación (2.16) representa el efecto debido a cambios en la propiedad dieléctrica del píxel del suelo . $\Delta\Phi_{pn}$ representa el ruido de fase. Para reducir el ruido de fase en un interferograma, generalmente se utilizan técnicas de filtrado. $2n\pi$,el último término en la ecuación ,representa la ambigüedad general 2π asociada con el ajuste de fase. La eliminación de fases es necesaria para resolver esta ambigüedad.El objetivo del desenvolvimiento de fase es encontrar una estimación del valor de fase "verdadero" dado su valor de envoltura principal.Un desenvolvimiento de fase bidimensional (2D) es una tarea importante pero complicada. Aunque es imposible desenvolver por completo la fase verdadera, se ha desarrollado una amplia gama de métodos para obtener buenas estimaciones de fase.

DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL

El desplazamiento LOS (D_R) se puede convertir en el desplazamiento horizontal (ΔD) en la dirección de desplazamiento :

$$\Delta D = \frac{D_R}{\sin\theta\cos\Phi} \quad (2.17)$$

donde Φ es el ángulo entre la dirección del desplazamiento horizontal y la proyección del radar mirando en la dirección del rango del suelo, como se muestra en la Figura 2.7. Una vez que se obtiene el desplazamiento, la deformación se estima dividiendo el desplazamiento por el lapso de tiempo entre las dos adquisiciones de imágenes utilizadas para formar el interferograma.

2.2.4 SELECCIÓN DE UN PAR INTERFEROMÉTRICO

El éxito de la técnica de interferometría (InSAR) depende en gran medida de la alta correlación[‡] y coherencia[§] de los conjuntos de señales registradas durante los pases repetidos y silas propiedades de dispersión de la superficie del suelo permanecen intactos entre los pases repetidos. En general, la selección de un par interferométrico se basa en la sensibilidad del interferograma formado a partir del par de imágenes corregistradas a la topografía expresada por la ambigüedad de altitud (h_a) y coherencia. La ambigüedad de la altitud (h_a) está relacionada con la separación orbital entre las imágenes adquiridas. La h_a está dada por:

$$h_a = \frac{\lambda R \sin \theta}{2B_{\perp}} \quad (2.18)$$

La correlación interferométrica, o coherencia, mide la varianza de la fase interferométrica calculada a partir de dos o más de imágenes SAR, complejas. La coherencia se encuentra definida entre los valores 0 y 1. La estimación generalmente se calcula a partir del par de imágenes complejas. La coherencia disminuye al aumentar el ruido del sistema, debido tal vez a dispersión de la señal. La meteorización, la vegetación, el cambio aleatorio en la propiedad dieléctrica dentro de una escala de subpixeles afectan la fase, que conduce a la descorrelación temporal. La coherencia es, por lo tanto, un parámetro que caracteriza la calidad de un interferograma formado a partir de un par o más imágenes complejas corregistradas. Por cada par de tales imágenes, la correlación se estima utilizando la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{\left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M C_1(i, j) C_2(i, j)^* \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M C_1(i, j) C_2(i, j)^*} \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M C_2(i, j) C_1(i, j)^*}} \quad (2.19)$$

Donde C_1 y C_2 representan las imágenes complejas maestro y esclavo. De $C(i,j)$, representa el valor complejo de píxel (i,j) , i representa la dirección del rango y j representa la dirección en azimut. $C(i,j)^*$ es el complejo conjugado de $C(i,j)$. N es el número de pixeles en la dirección del rango y M es el número de pixeles en la dirección azimutal, que se deben promediar para generar correlación de un solo píxel que tiene una resolución diferente de las imágenes complejas originales.

[‡]Relación lineal que existe entre distintas variables. Si los valores de una variable se modifican de manera sistemática con respecto a los valores de otra, se dice que ambas variables se encuentran correlacionadas.

[§]Dos fuentes de onda son perfectamente coherentes si tienen una diferencia de fase constante, la misma frecuencia y la misma forma de onda. La coherencia es una propiedad ideal de las ondas que permite la interferencia estacionaria (es decir, temporal y espacialmente constante).

El procesamiento para generar un interferograma , varía según el software utilizado y la aplicación específica .

3

Metodología

- 3.1 ESTADO DEL ARTE EN LA DETECCIÓN DE FALLAS SÓMERAS POR INSAR
- 3.2 RESOLUCIÓN ESPACIAL DE SENSORES SAR Y SU IMPACTO EN LA DETECCIÓN DE FALLAS ASOCIADAS A SUBSIDENCIA
- 3.3 PROCESO DE SEMIAUTOMATIZACIÓN DEL FLUJO DE TRABAJO PARA DETECCIÓN DE FALLAS

4

Discusión de resultados

4.1 CASO DE ESTUDIO EN LA CDMX

4.2 VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Conclusión

Bibliografía

References

- [ALMAN] Almanza-Hernández F.,Rangel-NúñezJ.L. y Garfias-García E.,2013,Study on the composition and microstructure of lacustrine soft soil deposits in Mexico City,ISSMGE TC-214 Workshop on Extreme Soil Mechanics ,SMIG,pp.3-12.
- [CARN] Carrillo, N., 1948, Influence of artesian wells on the sinking of México City, en Proceedings of the Second International Conference on Soils Mechanics: Rotterdam, Holanda, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, VII.
- [GONWOOD] Gonzalez C.Rafael , Woods Richard E. (2002). Digital Image Fundamentals. En Digital Image Processing(42-48). New Jersey,EE.UU.: Prentice Hall.
- [HANSSEN] R.F. Hanssen, Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis, (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 2001).
- [II2017] Auvinet Gabriel,Méndez Edgar,Juárez Moises. (2017). El Subsuelo de la Ciudad de México. CDMX: UNAM,Instituto de Ingeniería.
- [LUOR] Luque Ordóñez Javier . (2017). Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. 10.09.2019, de ACTA Sitio web: https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/062017.pdf
- [MARMA] Marsal,R.J. y Mazari,M.,1959,El Subsuelo de la Ciudad de México ,contribución de la UNAM al 1^{er} Congreso Panamericano de mécanica de suelos e ingeniería de cimentaciones ,Congreso Internacional de la Sociedad Internacional de Mécanica de Suelos e Ingeniería en Cimentaciones ,1969,Tercera Edición 2016:Vol I y Vol. II ,del libro [II2017],Ciudad de México,México.
- [VIBI] Mooser,F. y Molina,C.,1993,Nuevo modelo hidrogeológico para la cuenca de México,Boletín del Centro de Investigación Sísmica,Fundación Javier Barros Sierra,3(1-26),,Ciudad de México,México.
- [MOREI] A. Moreira, 4th Advanced Training Course in Land Remote Sensing-Synthetic Aperture Radar (SAR): Principles and Applications, (Horokopio University-ESA, 2013).
- [PODES] Podest Erika. (2017). Procesamiento y Análisis de Imágenes SAR. 17.09.2019, de National Aeronautics and Space Administration Sitio web: <https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/disasters/SAR-17/Session2-SAR-Spanish.pdf>
- [QUIA1] Téllez Quiñones Alejandro.La imagen SAR y los conceptos de resolución.CentroGEO. PowerPoint.Abril-Junio 2018.
- [QUIA2] Téllez Quiñones Alejandro.Interferometría SAR.CentroGEO.PowerPoint.Abril-Junio 2018.

[UNAV] UNAVCO. (2018). Synthetic Aperture Radar (SAR) Satellites. 13.09.2019, de UNAVCO Sitio web: <https://www.unavco.org/instrumentation/geophysical/imaging/sar-satellites/sar-satellites.html>

[VIBI] Vizcaino,F. y Bistrain,P.,1952,Problemas generales del valle y de la Ciudad de México,Congreso Mexicano en el IV Centenario de la fundación de la UNAM,Ciudad de México.

[XINISH] Xiaobing Zhou, Ni-Bin Chang y Shusun Li. (2009). Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research . Sensors, 9, 37.

A

Programa



TESIS presentado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autonóma de México (UNAM) para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Geofísica.

Cecilia Gómez Jiménez
correo:
cecygomezjim@gmail.com
Mayo, 2019